

**Исследование напряжений,
возникающих в дорожной конструкции
под воздействием колеса автомобиля**

Бабаскин Ю.Г.

Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Беларусь

Предметом проведенного исследования стала дорожная конструкция, состоящая из слоя асфальтобетона, деструктурированного цементобетона, слоя тощего бетона и дополнительного слоя основания из среднего песка. Дорожная конструкция рассматривалась как сложная многокомпонентная упругая среда, состоящая из материалов, отличающихся друг от друга по фракциям и прочности. В дорожной одежде соблюдался принцип применения менее прочных материалов по мере удаления от точки приложения нагрузки от колеса автомобиля.

Введение

Республика Беларусь имеет развитую дорожную сеть, общая протяженность которой превышает 86 тыс. км. Многие магистрали Республики имеют жесткое цементобетонное покрытие, протяженность которых превышает 1300 км.

Жесткое дорожное покрытие характеризуется следующими показателями.

Для цементобетона характерны следующие показатели:

- прочность на сжатие – $B_{3,5} \dots B_{105}$;
- прочность на осевое растяжение – $B_{t0,4} \dots B_{t4,0}$;
- прочность на растяжение при изгибе – $B_{tb0,4} \dots B_{tb8,0}$.

Для дорожного цементобетона, рекомендуемого для строительства однослойного покрытия на дорогах I и II категорий с интенсивностью движения до 2000 авт./сут, минимальный проектный класс бетона должен быть не ниже $B_{tb4,0}$; B_{30} ; а марка по морозостойкости F150. При интенсивности движения свыше 2000 авт./сут минимальные показатели составляют: $B_{tb4,4}$; B_{35} .

Характеристика цементобетонного покрытия

Цементобетонное покрытие характеризуется модулем упругости:

- тяжелый бетон, марки $B_{cb}4,0 - 33000$ МПа, $B_{cb}4,4 - 36000$ МПа;
- мелкозернистый $B_{cb}4,0 - 26500$ МПа, $B_{cb}4,4 - 28000$ МПа.

Следует учитывать, что расчетный модуль упругости в зоне шва покрытия значительно меньше и составляет: для $B_{cb}4,4 - 1770$ МПа, а для $B_{cb}4,0 - 1600$ МПа, что меньше аналогичного показателя для тяжелого бетона приблизительно в 18 раз.

Основанием цементобетонного покрытия служит щебеночный слой или тощий бетон. Модуль упругости щебня магматических пород составляет 300...500 МПа, в зависимости от размера фракций щебня и смеси, применяемой для различных способов строительства (плотные смеси, закладка) и типа смеси (С1...С11 с непрерывной или полупрерывистой гранулометрией). Тощий бетон представляет собой смесь оптимального зернового состава, укрепленного портландцементом в количестве 4...8 %. Модуль упругости такого материала составляет 2500...5000 МПа.

В качестве подстилающего морозозащитного слоя применяют песок гравелистый, крупный, средней крупности, для которого модуль упругости равен 120...130 МПа.

Для усиления конструкции применяется асфальтобетон, модуль упругости которого колеблется в зависимости от марки битума. Например, для плотного асфальтобетона марки I...II, модуль упругости составляет от 6000 МПа (БНД 40/60) до 2000 МПа (БНД 200/300).

В результате длительной эксплуатации жесткой дорожной конструкции в ней возникают различные дефекты, от трещин до выбоин и шелушения. В связи с этим необходимо проводить работы по улучшению верхнего слоя покрытия слоями асфальтобетона. Одним из способов, направленных на недопущение возникновения отраженных трещин, является деструктуризация цементобетона по виброрезонансной технологии. При реконструкции магистральных автомобильных дорог I технической категории была произведена деструктуризация цементобетона, в результате чего дорожная конструкция перешла из жесткого типа в нежесткий тип. Таким образом произошло поэтапное изменение прочности конструкции, когда на первом этапе, в результате деструктуризации цементобетонного покрытия, прочность уменьшилась, при численном значении модуля упругости от 33000 МПа – для монолитного цементобетона, до 500 МПа (по некоторым сведениям 220...250 МПа) – для искусственного щебня, а на втором этапе несколько возросла, путем усиления слоем асфальтобетона, при значении модуля упругости от 500 МПа до 6000 МПа. В результате реконструкции к положительным факторам следует отнести устранение трещин цементобетонных плит и недопущение возникновения отраженных

трещин на асфальтобетонном покрытии, к отрицательным – уменьшение прочности начального дорожного покрытия более чем в 5 раз.

При выборе конструкции усиления дорожной одежды был проведен сравнительный анализ между конструкциями, применяемыми в Республике Беларусь, и конструкциями, применяемыми в Германии. Отечественные дорожники в качестве щебня применяют смесь фракций 5...20 и 20...40 мм, при содержании зерен пластинчатой и лещадной формы не превышающем 25 %. В качестве минеральной добавки применяют доменный гранулированный шлак до 15 %. Требования к цементу ограничивают содержание трехкальцевого алюмината (8 %). Зарубежные дорожники те же параметры применяют в следующем качестве: максимальная крупность щебня 22,4 (28) мм или 31,5 (40) мм; минеральная добавка - доменный гранулированный шлак до 50 %; цемент с добавками известняка и обожженного сланца до 20 %. Прочностные показатели обоих вариантов приблизительно одинаковые. На основании этих компонентов разработаны дорожные конструкции: в РБ – цементобетонное покрытие ($h = 24$ см); слой асфальтобетона ($h = 4$ см); тощий бетон ($h = 14$ см); щебеночно-песчаная-гравийная смесь ($h = 15$ см); песок в качестве морозозащитного слоя. Для сравнения была взята жесткая дорожная конструкция, запроектированная в Германии, состоящая из следующих слоев: цементобетонное покрытие ($h = 24$ см); геотекстильный материал; гидравлически связанный несущий слой ($h = 16$ см); щебеночно-песчаная смесь ($h = 30$ см).

Применение метода виброрезонансной технологии позволило дефрагментировать существующее покрытие трещинами, доходящими до основания, на отдельные фрагменты с максимальным размером в любом измерении не более 35 см. Согласно принятому регламенту большая часть фрагментов бетона должна иметь размер 2,5...10 см.

Для расчета слоя усиления, было оценено состояние: рабочего слоя земляного полотна; морозозащитного слоя из песка, а также тощего бетона. Расчет выполнен в двух вариантах под осевую нагрузку 11,5 т, для различного состояния слоев по результатам полевого обследования. Первый вариант расчета выполнен для более высокой оценки состояния слоев, для которой толщина усиления слоев составила 11...13 см, второй вариант, для более посредственного состояния слоев, толщина усиления составила 17...22 см.

Исследование напряжений

Предметом проведенных исследований стала дорожная конструкция, состоящая из следующих слоев (рис. 1):

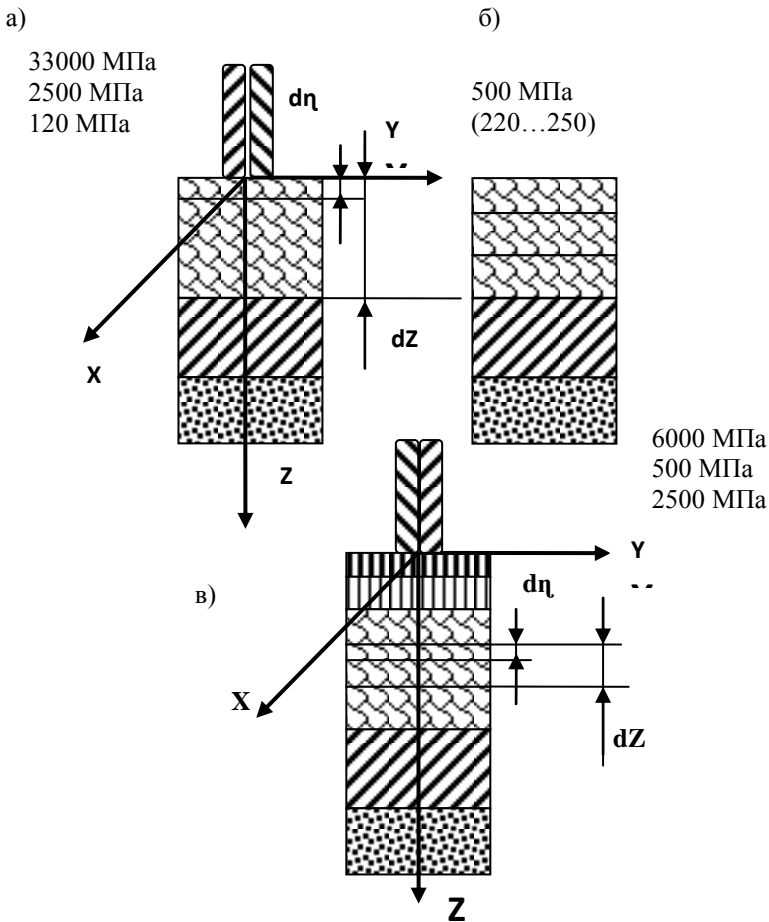


Рис. 1 – Схемы конструкции дорожной одежды при проведении реконструкции:
а) жесткая цементобетонная;
б) с деструктурированным цементбетоном;
в) с усиленным слоем асфальтобетона

- 1) плотный асфальтобетон толщиной 4 см с модулем упругости 320 МПа;
- 2) пористый асфальтобетон толщиной 6 см с модулем упругости 200 МПа;
- 3) искусственный щебень фракции 3...5 см толщиной 8 см, с модулем упругости 220 МПа;
- 4) искусственный щебень фракции 5...10 см толщиной 8 см с модулем упругости 350 МПа;
- 5) искусственный щебень фракции 10...15 см толщиной 8 см с модулем упругости 500 МПа;
- 6) цементогрунт толщиной 18 см с модулем упругости 3500 МПа;
- 7) песок средней крупности с модулем упругости 120 МПа.

Для расчетов искусственного щебня и песка принят коэффициент Пуассона, равный 0,18, для тяжелого цементобетона – 0,2.

Дорожная конструкция рассматривалась как сложная многокомпонентная упругая среда, состоящая из материалов, отличающихся друг от друга по фракциям и прочности. В дорожной одежде соблюдался принцип применения менее прочных материалов по мере удаления от точки приложения нагрузки от колеса автомобиля. Деформация упругой среды, испытывающей сложное напряженное состояние, описывается обобщенным законом Гука, следовательно, деформация слоя дорожной одежды, определяемая по формулам теории линейно деформируемых тел, описывается уравнением

$$\eta_z = \frac{l}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

где η_z – величина вертикальной деформации;

E – модуль упругости материала;

l – толщина расчетного слоя материала;

$\sigma_{x,y,z}$ – нормальное напряжение, действующее в направлении осей X, Y, Z;

ν – коэффициент Пуассона;

Расчетное сопротивление бетона на растяжение при изгибе определяют из выражения

$$R_{p.u.} = B_{tb} K_{н.п.} K_y K_F$$

где B_{tb} – класс бетона на растяжение при изгибе;

$K_{н.п.}$ – коэффициент набора прочности, для естественного твердения $K_{н.п.}=1,2$;

K_F – коэффициент, учитывающий воздействие переменного замораживания и оттаивания, $K_F = 0,95$;

K_y – коэффициент усталости бетона при повторном нагружении определяют из выражения

$$K_y = 1,08N^{-0,063}$$

где N – суммарное приложение приведенной нагрузки за расчетный срок службы.

Для тяжелого бетона прочность на растяжение при изгибе можно определить на основании прочности на сжатие из выражения

$$R_{p.и.} = 0,08(10R_{сж})^{2/3}$$

Ориентировочно прочность тяжелого бетона на растяжение при изгибе составляет 0,1...0,2 от прочности на сжатие.

Исследование проводилось с учетом построения конечно-элементной модели. Для этого использованы элементы в форме параллелепипедов, содержащие восемь узлов и имеющие сорок восемь степеней свободы. Модель содержит двадцать четыре слоя конечных элементов, а каждый слой состоит из двенадцати рядов по двенадцать конечных элементов. Деформационные характеристики (модуль упругости и коэффициент Пуассона) для каждого ряда задаются в зависимости от его расположения по глубине, т.е. от того, какой слой основания моделируется. Расчет выполнен с помощью программного комплекса «Лира-8». По результатам расчета получены карты изолиний.

Полученные результаты показывают, что наибольшие осадки ($\eta_x=3,97$ мм) основания наблюдаются на уровне верхнего слоя искусственного щебня. При этом вблизи края штампа приложения нагрузки (следа колеса автомобиля) появляются вертикальные перемещение, направленные вверх – небольшой выпор щебня.

Вертикальные нормальные напряжения – сжимающие, а наибольшие их значения наблюдаются непосредственно под слоем асфальтобетона 126,11 МПа. В песчаном слое появляются слабо растягивающие вертикальные нормальные напряжения 0,82 МПа.

Горизонтальные нормальные напряжения непосредственно под местом приложения нагрузки – сжимающие и достигают значения – 56,74 МПа. По мере заглубления сжимающие напряжения быстро уменьшаются и на глубине залегания границы слоев искусственного щебня и цементогрунта близки к нулю, а затем по мере заглубления переходят в разряд растягивающих, достигая значения + 20,15 МПа.

Горизонтальные касательные напряжения знакопеременные. Максимальные их значения появляются вблизи загруженного угла плиты

на границе слоев искусственного щебня и асфальтобетона и достигают значения 8,2 МПа.

Заключение

Обобщая проведенный анализ результатов расчета основания под загруженной конструкцией, установлено, что наибольшие напряжения появляются вблизи точки приложения нагрузки. Наибольшая осадка наблюдается в верхнем слое искусственного щебня (разрушенного цементобетона), что подтверждается величинами напряжений. Вокруг точки приложения нагрузки наблюдается небольшой выпор материала. Напряжения по мере заглубления переходят из разряда сжимающих в растягивающие (с противоположным знаком), что свидетельствует о сложной деформации дорожной конструкции, в результате чего ее отдельные слои подвержены разрушению.