

ЭКСПЛУАТАЦИОННАЯ СПОСОБНОСТЬ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ДОРОЖНОГО ПОКРЫТИЯ

THE OPERATIONAL ABILITY OF THE REINFORCED CONCRETE SLABS OF PAVEMENT

Семенюк С.Д., д.т.н., зав. кафедрой (Белорусско-Российский университет, г. Могилёв, Республика Беларусь)

Semeniuk S.D., doctor of technical sciences, head of department (Belorussian-Russian University, Mogilev)

Приведены результаты численных исследований несущей способности железобетонных плит покрытия автомобильных дорог серии Б.3.503.-1. предназначенных для временных и постоянных дорог и плит испытательного полигона РУПП "Белорусский автомобильный завод", предназначенных для проведения испытаний большегрузных карьерных самосвалов грузоподъёмностью 500 тонн. Предлагаемая методика расчёта железобетонных плит покрытия автомобильных дорог по прочности нормальных и пространственных сечений выполнена на основании проведённых экспериментальных и теоретических исследований.

The results of numerical studies of the bearing capacity of reinforced concrete slabs of pavement series B.3.503.-1. intended for temporary and permanent roads and slabs test site RUPE "Belarusian Autoworks" intended for testing of heavy dump trucks with lifting capacity of 500 tons. The proposed method of calculation of reinforced concrete slabs cover the roads on the strength of normal and spatial sections performed on the basis of the conducted experimental and theoretical research.

Ключевые слова: железобетон, покрытие, плиты дорожные, исследования, сечения, нормальные, пространственные, полигон, прочность, несущая способность.

reinforced concrete, pavement, slabs of pavement, research, cross-section, normal, spatial, polygon, strength, load-bearing capacity.

Введение. Неравномерные деформации основания, возникающие при возведении и эксплуатации плит дорожного покрытия в сложных грунтовых условиях [1], следует считать одним из основных факторов, влияющих на их

несущую способность, деформативность и долговечность. При эксплуатации дорог передача нагрузки на плиту дорожного покрытия от колёс автомобиля всегда будет вне оси симметрии конструкции, а также не исключена вероятность образования выбоин, воронок и других дефектов под основанием плиты, поэтому в ней будут проявляться изгибающие и крутящие моменты, а также поперечная сила. В общем случае они работают на поперечный изгиб с кручением, в частности - на поперечный изгиб. Поэтому требуется учитывать влияние каждого из воздействий на несущую способность железобетонных плитных конструкций при их проектировании и изготовлении.

Постановка задачи и характеристики плит дорожного покрытия. Прямоугольная плита на упругом основании является важнейшим конструктивным элементом промышленного, гидротехнического и аэродромно-дорожного строительства. Однако задача проектирования плитных конструкций, наилучшим образом удовлетворяющих экономическим и эксплуатационным условиям, не может быть выполнена без теоретически строгих и экспериментально обоснованных методов их расчёта.

В соответствии с техническим договором между РУПП "БелАЗ" и Белорусско-Российским университетом кафедре "Строительные конструкции, здания и сооружения" необходимо было запроектировать и осуществить авторский надзор по изготовлению железобетонных плит покрытия тормозного участка и дороги с пороговыми неровностями испытательного полигона РУПП "Белорусский автомобильный завод".

С этой целью для тормозного участка разработаны плиты двух типоразмеров: прямоугольная с размерами 2000x2420x45 см, изготавливаемых по месту в количестве 3 шт. с температурно-усадочными швами между ними в 20...30 мм и шестиугольной плиты длиной 2740 см; при этом прямоугольная часть плиты имеет размеры 2000x240 см, трапециевидная часть плиты длиной 2500 см с равнобокими скосами оканчивается размером 1200 см. Плиты имеют маркировку ПДТ-1, ПДТ-2. Буквенный индекс обозначает - "плита дорожная тормозная"; цифровой индекс 1- прямоугольная в плане; 2- шестиугольная в плане (рис. 1).

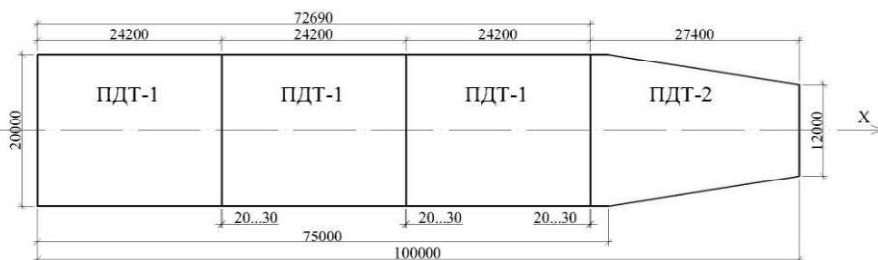


Рис. 1. Тормозной участок испытательного полигона

Плиты запроектированы из бетона класса С25/30. Армирование выполнено в виде сеток из стержней класса S400 диаметром 25-32 мм, связанных между собой при помощи П-образных хомутов с открылками из стержней класса S240 [2]. Плиты запроектированы под нагрузку от карьерного самосвала при его торможении с замедлением 4 м/сек², которая может достигать 764 тонн на переднюю ось автомобиля. Плита рассчитана как конструкция на упругом основании. Модуль деформации плит при расчёте принят $E_0=18000$ т/м², коэффициент Пуассона $\nu_0=0,3$.

Для участка дороги с пороговыми неровностями разработаны конструкции плит четырёх типоразмеров. Длина всех плит 600 см, толщина у всех плит одинаковая и равна 450 мм. Поперечные сечения плит показаны на рис. 2 и рис. 3. Плиты имеют маркировку ППН-1; ППН-2; ППН-3; ППН-4. Буквенный индекс обозначает - "Плита пороговых неровностей"; цифровой индекс 1,2,3,4- тип плиты характеризующий поперечное сечение. Плиты рассчитаны под нагрузку от карьерного самосвала грузоподъёмность 500 тонн. Нагрузка на полотно дороги в статике от одной оси самосвала 370 тонн, давление на поверхность дороги в статике 0,7 МПа. Плита рассчитана как конструкция на упругом основании. Модуль деформации основания плит при расчёте принят $E_0=18000$ т/м², коэффициент Пуассона основания $\nu_0=0,3$, начальный модуль упругости бетона естественного твердения $E_b=3310000$ т/м². Коэффициент динамичности принят равным 1,8. Конструкция плиты запроектирована в соответствии с требованиями [3]. Основание под плиту выполнено из монолитного бетона класса 8/10 толщиной 300 мм, уложенного на уплотнённый грунт песчано-гравийной смеси. Изготовление плит производилось из бетона класса С25/30; армирование - в виде сеток из стержней класса S400 диаметром 16...22 мм, связанных между собой при помощи П-образных хомутов с открылками из стержней класса S240.

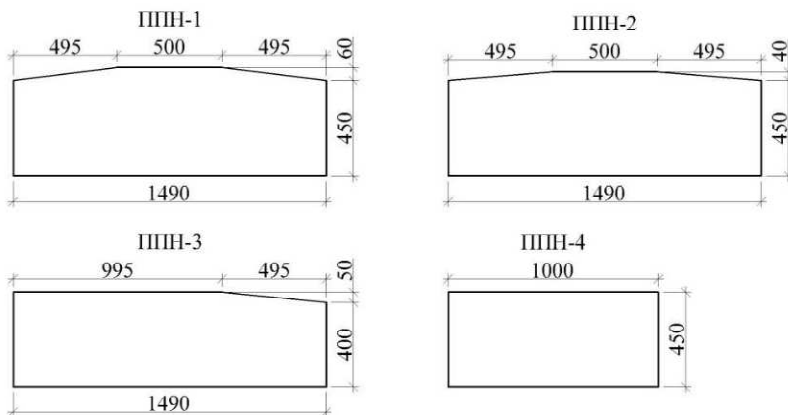


Рис. 2. Поперечные сечения плит

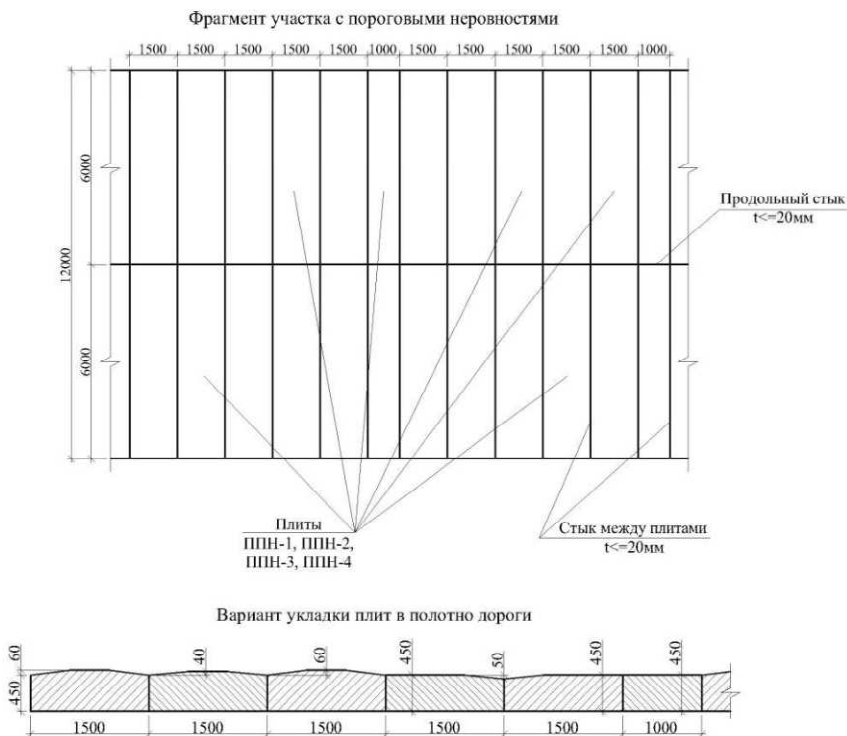


Рис. 3. Фрагмент участка с пороговыми неровностями

Также исследовались плиты железобетонные для покрытий автодорог по серии Б.3.503.1-1, которые предназначены для применения в сухих и водонасыщенных грунтах со слабо и среднеагрессивными водами. Конструкции плит разработаны институтом "БЕЛПРОЕКТ". Маркировка плит: 1ПП30.18-30- плита покрытий с ненапрягаемой арматурой для постоянных дорог - прямоугольная, размером 3000x1750x170 мм, рассчитанная под нагрузку 300 кН (30 тонн) (рис. 4). 2ПП30.18-30-плита покрытий с ненапрягаемой арматурой для временных дорог - прямоугольная, размером 3000x1750x170 мм, рассчитанная под нагрузку 30 тонн (рис. 4). Используется бетон класса 20/25 для плит временных дорог и 25/30 для плит постоянных дорог; плиты армированы верхней и нижней сеткой (С1, С2) из стали класса S400. Сетки соединены между собой при помощи двух "Г"-образных каркасов из стали класса S500 [4].

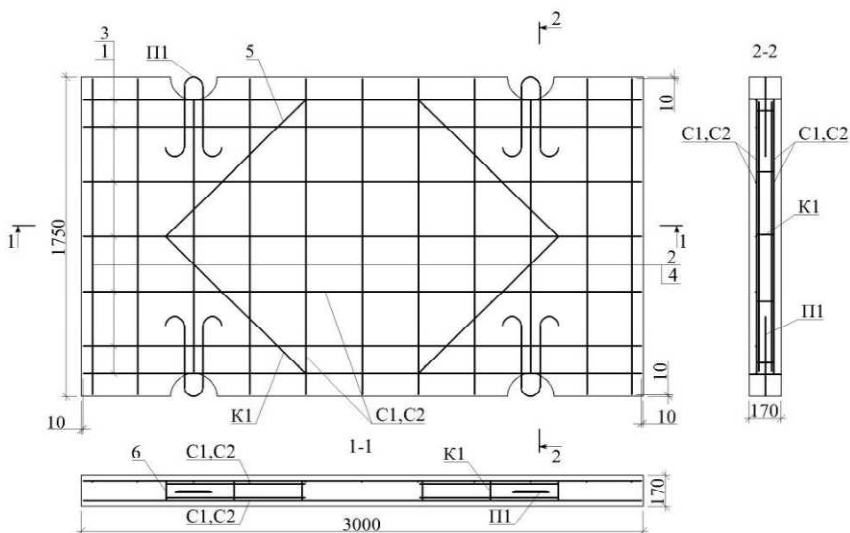


Рис. 4. Опалубочные чертежи и схемы армирования плит железобетонных для покрытий автомобильных дорог марок 1ПП30.18-30, 2ПП30.18-30

Статический расчёт плит. Расчёт выполнялся методом Б.Н. Жемочкина по специально разработанной программе, в которой при определении коэффициентов канонических уравнений задавались функцией прогибов прямоугольной плиты с защемлённой в начале координат нормалью в виде особого решения и совокупности частных решений Клебша [5]. При этом для ПДТ-1 рассматривалось 11 случаев загрузки, для ПДТ-2 – 10, а для плит дороги с пороговыми неровностями – центральное загрузке плиты и краевое её загрузке карьерными самосвалами грузоподъёмностью в 500 тонн. Результаты статического расчёта представлены в таблице 1.

Таблица 1

Максимальные значения изгибающих и крутящих моментов для плит испытательного полигона

Маркировка плит / Воздействие моментов	ПДТ-1	ПДТ-2	ППН-1	ППН-2	ППН-3	ППН-4
M_x (кН·м)	<u>270</u> -266	<u>196</u> -210	<u>341.11</u> -69.0	<u>332.10</u> -67.2	<u>346.4</u> -80.7	<u>630</u> -100.6
M_y (кН·м)	<u>313</u> -338	<u>265</u> -336	<u>130.0</u> -159.3	<u>126.49</u> -154.2	<u>126.7</u> -179.1	<u>41.26</u> -41.6
M_{xy} (кН·м)	<u>194</u> -158	<u>170</u> -158	<u>49.5</u> -49.5	<u>48.6</u> -48.4	<u>49.1</u> -49.1	<u>54.05</u> -54.05

Несущая способность запроектированных железобетонных плит испытательного полигона по прочности нормальных и пространственных сечений. По заданному армированию, геометрическим характеристикам сечения и класса бетона вычислялась несущая способность вышеперечисленных плит на прочность нормальных и пространственных сечений. В основу была положена упругопластическая модель, основы которой изложены в [6].

Прочность нормальных сечений находится в зависимости от степени использования сопротивления сжатого бетона и растянутой арматуры. При работе железобетонных плит дорожного покрытия прямоугольного сечения, армированных сталью, имеющей физический предел текучести считается, что сопротивления бетона и арматуры использованы полностью.

Проверку прочности нормальных сечений (рис. 5) производим из условия:

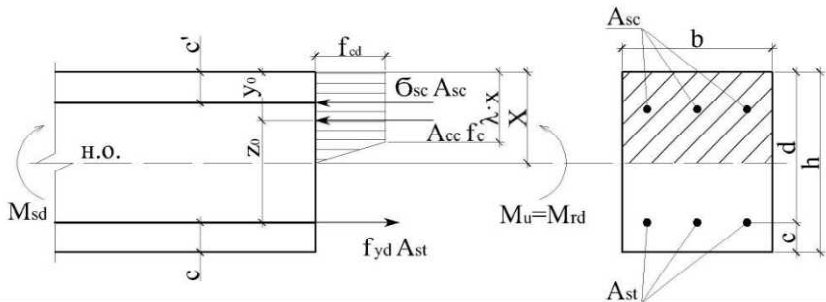
$$M \leq M_{u2} = 0,5 f_{c2} \cdot b \cdot x \cdot [(1 + \lambda) \cdot d - 0,33 \lambda \cdot (1 + \lambda + \lambda^2)] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d - c') \quad (1)$$


Рис. 5. К расчёту прочности нормальных сечений

Высоту сжатой зоны "x" находят из квадратного уравнения:

$$A_1 \cdot x^2 + A_2 \cdot x + A_3 = 0 \quad (2)$$

$$A_1 = 0,5 \lambda_{sc} \cdot (1 - \lambda^2) \cdot b; \quad A_2 = \alpha_{sm} \cdot A_{sc} - (1 - \lambda) \cdot \frac{f_{pd}}{f_{yd}} \cdot A_{ast};$$

$$A_3 = -\alpha_{sm} \cdot A_{ast} \cdot c \quad (3)$$

$$\alpha_{sm} = \frac{c}{E_{sc} d}; \quad \alpha_{sc} = \frac{\alpha_{sm} \cdot f_{sd} \cdot (x - d)}{(1 - \lambda) \cdot x}; \quad \lambda = 0,93 - 0,014 f_{cd} \quad (4)$$

Для каждой из плит была вычислена несущая способность по прочности нормальных сечений относительно оси "x" и "y".

При действии на плиту дорожного покрытия крутящего и изгибающего моментов разрушение происходит по пространственному сечению, образованному спиральной трещиной и замыкающей её сжатой зоной, расположенной под углом α к горизонтальной оси элемента (рис. 6).

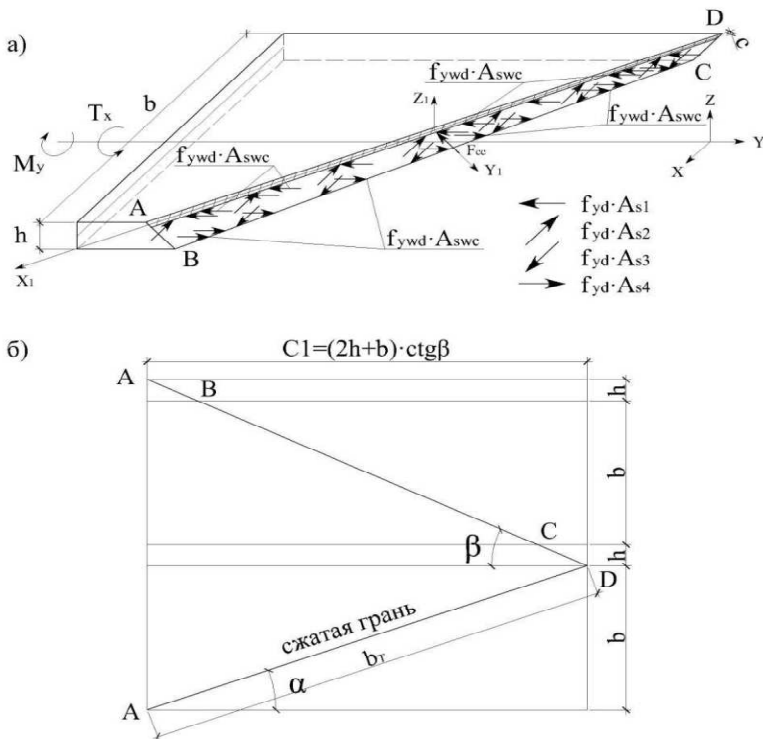


Рис. 6. Расчётная схема пространственного сечения при совместном действии крутящего и изгибающего моментов
 а- схема внутренних и внешних усилий; б- развертка граней пространственного сечения.

Положение сжатой зоны в пространстве определяются параметром C_1 - проекцией отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента. По нормали к косому сечению действуют проекции внешних расчётных моментов $M_y \cdot \sin \alpha$ и $T_x \cdot \cos \alpha_0$, где

$$\sin \alpha = \frac{b}{a}, \cos \alpha = \frac{a_1}{a}, b_1 = \sqrt{b^2 + a_1^2}, a_1 = (2h + b) \cdot \operatorname{ctg} \beta \quad (5)$$

Из положения ограничения деформаций с учётом упругопластических характеристик бетона вычисляют граничную высоту сжатой зоны:

$$\xi_{lim} = \frac{\sigma_{yk} \cdot a \cdot \sin \alpha}{\sigma_{yk} + f_{yk} \cdot (1 - \lambda)} \quad (6)$$

Так как арматурные стержни расположены не в одном уровне, то приведение их к сосредоточенному армированию даёт погрешность. Поэтому расчёт производим полагая, что $\sigma_{yk} \geq f_{yk}$ и $\sigma_{yk} < f_{yk}$ и $\sigma_{yk} \geq f_{yk}$, тогда получаем следующие зависимости при кручении с изгибом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{a1} = \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_1 - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \sin \alpha; \\ \sigma_{a2} = \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{a3} = f_{yad} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{a4} = f_{yad} \cdot \sin \alpha; \\ \sigma_{avn1} = \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_{avn1} - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \sin \alpha; \\ \sigma_{avn2} = f_{yavn} \cdot \sin \alpha \end{array} \right. \quad (7)$$

Высоту сжатой зоны "x" определяют из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны.

$$\begin{aligned} 0,5 \cdot (1 + \beta) \cdot f_{cb} \cdot b_T \cdot x = f_{yad} \cdot A_{a3} \cdot \cos \alpha + f_{yad} \cdot A_{a4} \cdot \sin \alpha + \\ + f_{yavn} \cdot A_{avn2} \cdot \sin \alpha + A_{a1} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_1 - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \sin \alpha + \\ + A_{a2} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \cos \alpha + A_{avn1} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_{avn1} - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (8)$$

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда определяют из выражения:

$$z_i = d_i - \frac{x \cdot (\beta^2 + \beta + 1)}{2 \cdot (\beta + 1)} \quad (9)$$

Условие прочности в расчётном предельном состоянии выводится из соотношения внешних и внутренних сил относительно оси, проходящей через центр тяжести сжатой зоны. При этом, учитывая упругопластическую работу бетона, эпюру напряжения в сжатой зоне принимаем в виде прямоугольной трапеции. При симметричном армировании плиты:

$$\begin{aligned} \sigma_{a1} \cdot A_{a1} \cdot z_{a1} \cdot \sin \alpha + \sigma_{a2} \cdot A_{a2} \cdot z_{a2} \cdot \cos \alpha + \sigma_{a3} \cdot A_{a3} \cdot z_{a3} \cdot \cos \alpha - \\ - \sigma_{a4} \cdot A_{a4} \cdot z_{a4} \cdot \sin \alpha + f_{yad} \cdot A_{avn1} \cdot z_{avn1} \cdot \sin \alpha + \\ + f_{yavn} \cdot A_{avn2} \cdot z_{avn2} \cdot \sin \alpha \end{aligned} \quad (10)$$

$$\text{где } \sigma_{a1} = \sigma_{a4} = \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_1 - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \sin \alpha;$$

$$\sigma_{a2} = \sigma_{a3} = \frac{\alpha \cdot f_{ad} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \beta) \cdot x} \cdot \cos \alpha \quad (11)$$

По вышеприведённой методике была просчитана несущая способность плит тормозного участка, для дороги с пороговыми неровностями и плит покрытий автомобильных дорог серии Б.3.503.-1.

Результаты конструктивного расчёта плит по прочности нормальных сечений относительно оси "x" и "y", а также пространственных сечений представлена в таблице 2.

Таблица 2

Несущая способность железобетонных плит покрытий дорог

Маркировка плит / Моменты	ПДТ-1	ПДТ-2	ППН-1	ППН-2	ППН-3	ППН-4	1ПП30. 10-30	2ПП30. 10-30
$M_x(\text{кН}\cdot\text{м})$	417,7	591,6	477,5	453,8	392,75	497,0	115,2	81,2
$M_y(\text{кН}\cdot\text{м})$	673,0	570,3	298,0	297,95	232,95	276,95	95,1	69,4
$M_{xy}(\text{кН}\cdot\text{м})$	329,8	297,8	118,6	116,3	109,2	130,25	47,5	33,1

Выводы: Анализируя результаты статического и конструктивного расчёта железобетонных плит покрытия автомобильных дорог заключаем, что несущая способность плит при совместном воздействии крутящего и изгибающего моментов является наименьшей. Следовательно, данный вид загрузки является наиболее неблагоприятным и поэтому его необходимо учитывать при проектировании железобетонных плит дорожного покрытия.

Проектировщикам следует принимать во внимание реальные условия работы конструкций на грунтовом основании, так как неравномерные деформации основания, возникающие при воздействии и эксплуатации плит дорожного покрытия в сложных грунтовых условиях, следует считать одним из основных факторов, влияющих на их несущую способность, деформативность и долговечность.

Элементы, подверженные изгибу с кручением, должны быть снабжены арматурой воспринимающей усилия от действия изгибающего момента, поперечной силы и крутящего момента.

1. Семенюк С.Д. Несущая способность железобетонных плит покрытия испытательного полигона РУПП "Белорусский автомобильный завод"/ С.Д. Семенюк, Р.З. Шутов, Н.В. Белый. // Геотехника Беларуси: наука и практика. Сборник статей международной научно-технической конференции/ Минск: БНТУ, 2008.- с.218-237. 2. Семенюк С.Д. Прочность нормальных и пространственных сечений крупноразмерной железобетонной плиты испытательного полигона ПО "БелАЗ"/ С.Д. Семенюк, Н.В. Белый.// Ресурсо-экономичные материалы, конструкции, здания и сооружения. Сборник научных трудов. Вып. 17.- Ровно 2008.- с.247-256. 3. СНБ 5.03.01-02*. Бетонные и железобетонные конструкции.- Минск, 2003.- 139с. 4. Семенюк С.Д. Расчёт сечений железобетонных плит серии Б.3.503.1-1 для покрытий автомобильных дорог/ С.Д. Семенюк, Н.В. Белый.// Вестник Белорусско-Российского университета.- 2008.- №3 (20).- с.166-176. 5. Босаков С.В. Статические расчёты плит на упругом основании/ С.В. Босаков.- Минск: БНТУ, 2002.- 128с. 6. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформированном основании: монография/ С.Д. Семенюк.- Могилёв: Белорус.- Рос. ун-т, 2003.- 269с.