

**НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ПЛИТ ТОРМОЗНОГО
УЧАСТКА ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА
РУПП «БЕЛОРУССКИЙ АВТОМОБИЛЬНЫЙ ЗАВОД»**

**BEARING CAPACITY OF PLATES BRAKE IN SECTION
PROVING GROUND RUPE «BelAZ»**

Семенюк С.Д., проф., д.т.н. (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь), Кумашов Р.В., аспирант (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь), Кетнер Э.А., магистрант (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь), Семенюк Е.Я. магистрант (Белорусско-Российский университет, г. Могилев, Республика Беларусь)

Semeniuk S.D., prof., Ph.D. (Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus), Kumashov R.V., a post-graduate student (Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus), Ketner E.A., a master course student (Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus), Semeniuk E.Y. (Belarusian-Russian University, Mogilev, Belarus)

В статье приведены методика и результаты статического и конструктивного расчётов плиты на упругом основании тормозного участка испытательного полигона РУПП «Белорусский автомобильный завод», предназначенных для проведения испытаний большегрузных карьерных самосвалов грузоподъемностью 500 тонн.

The methodology and the results of the static calculations and structural slab on elastic foundation brake test area-foot landfill RUPP «BelAZ» in the article are given for testing of heavy dump trucks with carrying capacity of 500 tonnes intended.

Ключевые слова: статический расчёт, конструктивный расчёт, железобетон, покрытие, плиты, исследования, упругое основание, прочность, несущая способность.

Keywords: static calculation, structural calculation, reinforced concrete, cover, plate, research, elastic foundation, strength, load-bearing capacity.

Неравномерные деформации основания и несимметричность приложения нагрузки приводят к возникновению в сечениях плит изгибающих и крутящих моментов, что пагубно сказывается на эксплуатационных характеристиках данных плит.

В общем случае плиты 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.

Характеристики плиты

Плиты предназначены для испытательного полигона РУПП «БелАЗ» при проведении испытаний самосвалов грузоподъемностью в 500 тонн.

Плиты изготовлены из бетона класса С25/30.

Армирование плит выполнено в виде сеток из стержней класса S400 диаметром 28 мм и 32 мм, связанных между собой при помощи П-образных хомутов с открылками из стержней класса S240 диаметром 10 мм (рис.1).

Конструкции плит разработаны двух типоразмеров: прямоугольных с размерами 20000х24200х450 мм, изготавливаемых на тормозном участке в количестве 3 шт. с температурно-усадочными швами между ними в 20..30 мм и шестиугольной плиты длиной 27400 мм. Расчёт производился для прямоугольных плит.

Плита запроектирована под нагрузку от карьерного самосвала при торможении с замедлением 4 м/сек^2 , которая на переднюю ось может достигать 764 тонны.

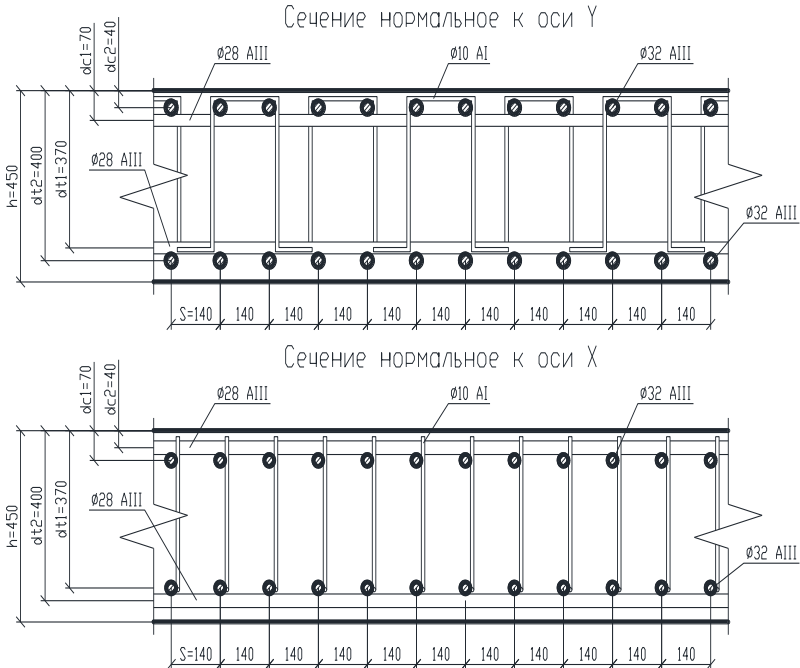


Рис. 1. Продольное и поперечное сечения плиты

Плита рассчитана как конструкция на упругом основании. Модуль деформации основания плит при расчёте принят $E_0=180$ МПа, коэффициент Пуассона основания $\nu_0=0.3$, начальный модуль упругости бетона естественного твердения $E_p=33.1$ ГПа. Нагрузка на полотно дороги в статике от одной оси самосвала 370 тонн, давление на поверхность дороги в статике 0.7 МПа. Коэффициент динамичности принят равным 2. Для плит рассматривалось 8 вариантов загрузки: центральные и краевые.

Статический расчёт плиты

Расчёт выполнялся способом Б.Н. Жемочкина и методом Ритца [2]. Плиты разбивались на $m \times n = 48 \times 50$ прямоугольных участков Б.Н. Жемочкина. В середине каждого участка прикладывали единичную сосредоточенную силу. Для определения коэффициентов канонических уравнений способа Б.Н. Жемочкина задавались функцией прогибов прямоугольной плиты с

зашемленной в начале координат нормалью в виде особого решения и совокупности частных решений Клебша:

$$W(x, y) = W_0(x, y) + \sum_{n=1}^{\infty} A_n W_n(x, y)$$

$$W_0(x, y) = \frac{Pb^2}{16\pi D} \left\{ \left[\left(\frac{x-t}{b} - \frac{t}{b} \right)^2 + \left(\frac{y-z}{b} - \frac{z}{b} \right)^2 \right] \ln \left[\left(\frac{x-t}{b} - \frac{t}{b} \right)^2 + \left(\frac{y-z}{b} - \frac{z}{b} \right)^2 \right] + \right.$$

$$+ 2 \left(\frac{xt}{b^2} - \frac{yz}{b^2} \right) \times \left[1 + \ln \left(\frac{t^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} \right) \right] - \left(\frac{t^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} \right) \ln \left(\frac{t^2}{b^2} + \frac{z^2}{b^2} \right) -$$

$$\left. - \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} \right) \ln \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} \right) \right\}$$

$$W_1(x, y) = \frac{x^2}{b^2} - \frac{y^2}{b^2}, \quad W_2(x, y) = \frac{2xy}{b^2},$$

$$W_3(x, y) = \frac{x}{b} \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} \right), \quad W_4(x, y) = \frac{y}{b} \left(\frac{x^2}{b^2} + \frac{y^2}{b^2} \right), \dots,$$

где $W_0(x, y)$ – особое решение; $W_n(x, y)$ – частное решение Клебша, априори удовлетворяющее уравнениями равновесия плиты с зашемленной нормалью под действием сосредоточенной силы и кинематическим граничным условиям в зашемлении; t, z – координаты точки приложения сосредоточенной силы; A_n – неопределенные коэффициенты; b – некоторый линейный размер плиты.

Для определения неизвестных коэффициентов составляется СЛАУ 8-го порядка при учете двух групп частных решений Клебша. В результате решения данной СЛАУ определяли свободные члены S и неизвестные коэффициенты A, B . По заданной функции прогибов и с учетом коэффициентов A, B находили коэффициенты канонических уравнений способа Б.Н. Жемочкина δ :

$$\delta_{ik} = \frac{P(1-\nu_0^2)}{\pi E_0 b} (F_{ik}^0 + F_{ik}^1) + \frac{Pb^2}{D} \left[A_{22} \left(\frac{x^2}{b^2} - \frac{y^2}{b^2} \right) + 2B_{22} \frac{xy}{b^2} + \dots \right]$$

где F_{ik}^0 – безразмерная функция для определения перемещений точки i на поверхности упругого полупространства от действия единичной силы, равномерно распределенной по прямоугольному участку k поверхности полупространства; F_{ik}^1 – корректирует F_{ik}^0 применительно к рассматриваемой модели упругого основания.

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n \left(\sum_{k=1}^n \delta_{ik} R_k + \varphi_{0x} y_i + \varphi_{0y} x_i + u_0 + \Delta_{ip} = 0 \right); \\ - \sum_{k=1}^n R_k y_k + M_{px} = 0; \\ - \sum_{k=1}^n R_k x_k + M_{py} = 0; \\ - \sum_{k=1}^n R_k + Q = 0, \end{array} \right.$$

где u_0 , φ_{0x} , φ_{0y} – линейное и угловые перемещения введенного защемления на плите; Q , M_{px} , M_{py} – равнодействующая внешних сил, действующих на плиту, и ее моменты относительно координатных осей; R_k – реактивные усилия.

В результате решения системы канонических уравнений способа Б.Н. Жемочкина получили реактивные усилия, по которым определили реактивное давление под плитой и осадки основания.

По известным осадкам основания находим внутренние усилия, возникающие в плите (изгибающие и крутящие моменты, поперечные силы). Результаты расчёта сведены в таблицу 1.

Таблиця 1

Сводная таблица результатов статического расчёта плит

| Вид загрузки | M_x кНм/м | M_y кНм/м | M_{xy} кНм/м | Q_x кН/м | Q_y кН/м |
|--------------|------------------|----------------|-------------------|---------------|---------------|
| 1 | Max 4706.19607 | 1981.63089 | 670.38009619 | 1259.39313 | 1305.67158 |
| загружение | Min -4462.60368 | -2040.09172 | -639.03318021 | -2343.07406 | -1452.21892 |
| 2 | Max 6201.78687 | 2651.13652 | 850.41241664 | 1657.38455 | 1631.6061 |
| загружение | Min -5895.71936 | -2819.31496 | -846.98838487 | -3089.55909 | -1991.99698 |
| 3 | Max 3350.50319 | 1527.07052 | 448.36903609 | 893.56662722 | 776.72713382 |
| загружение | Min -3242.09427 | -1673.6766 | -465.41603677 | -1672.68956 | -1170.06803 |
| 4 | Max 183.68554541 | 173.68733127 | 10.80841493 | 55.23845441 | 88.84562851 |
| загружение | Min -72.40473242 | -261.65339235 | -7.67941037 | -87.44068702 | -163.21676062 |
| 5 | Max 4658.47362 | 1914.43752 | 646.99182713 | 1244.89486 | 1379.2622 |
| загружение | Min -4437.19291 | -1934.40643 | -646.80632629 | -2320.29385 | -1382.25236 |
| 6 | Max 6120.68022 | 2510.92582 | 845.54100139 | 1635.20989 | 1802.98792 |
| загружение | Min -5837.59547 | -2541.01102 | -846.26998141 | -3049.03084 | -1815.24446 |
| 7 | Max 3318.27536 | 1357.01076 | 458.67081046 | 883.59598788 | 976.92609634 |
| загружение | Min -3211.9212 | -1373.41072 | -459.10193822 | -1655.0917 | -984.17726376 |
| 8 | Max 158.57482069 | 66.66927386 | 4.16198182 | 50.25520523 | 77.84185261 |
| загружение | Min -44.54641749 | -129.43389514 | -8.42823452 | -73.78053827 | -48.06718653 |

Конструктивный расчёт плиты

В основу конструктивного расчёта положена упругопластическая модель [1].

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 производим из условия:

$$M \leq M_u = 0.5 f_{cd} \cdot b \cdot x \cdot \left[(1 + \lambda) \cdot d - 0.33x \cdot (1 + \lambda + \lambda^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d - c')$$

Высоту сжатой зоны «х» находят из квадратного уравнения:

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

$$A_1 = 0.5 f_{cd} \cdot (1 - \lambda^2) \cdot b;$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_{st} - (1 - \lambda) \cdot \frac{f_{yd}}{f_{cd}} \cdot A_{sc};$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_{st} \cdot c$$

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}};$$

$$\sigma_{sc} = \frac{\alpha_m \cdot f_{cd} \cdot (d - x)}{(1 - \lambda) \cdot x};$$

$$\lambda = 0.93 - 0.014 f_{cd}$$

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.

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

$$T_x \cdot \cos \alpha, \quad \text{где} \quad \sin \alpha = \frac{b}{b_T}; \quad \cos \alpha = \frac{C_1}{b_T}; \quad b_T = \sqrt{b^2 + C_1^2};$$

$$C_1 = (2h + b) \cdot \operatorname{ctg} \beta.$$

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

$$x_{\lim} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha}{d \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda)}$$

Так как арматурные стержни расположены не в одном уровне, то приведение их к сосредоточенному армированию даёт погрешность. Поэтому расчёт производим полагая, что $\sigma_{s1} \geq f_{yd}$; $\sigma_{s2} \leq f_{yd}$; $\sigma_{s3} \geq f_{yd}$, тогда получаем следующие зависимости при кручении с изгибом:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{s1} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_1 - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \sin \alpha \\ \sigma_{s2} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \cos \alpha \\ \sigma_{s3} = f_{yd} \cdot \cos \alpha \\ \sigma_{s4} = f_{yd} \cdot \sin \alpha \\ \sigma_{sw1} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_{sw1} - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \sin \alpha \\ \sigma_{sw2} = f_{ywd} \cdot \sin \alpha \end{array} \right.$$

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

$$\begin{aligned}
 0.5 \cdot (1 + \lambda) \cdot f_{cd} \cdot b_T \cdot x &= f_{yd} \cdot A_{s3} \cdot \cos \alpha + f_{yd} \cdot A_{s4} \cdot \sin \alpha + \\
 &+ f_{ywd} \cdot A_{sw2} \cdot \sin \alpha + A_{s1} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_1 - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \sin \alpha + \\
 &+ A_{s2} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \cos \alpha + A_{sw1} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_{sw1} - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \sin \alpha
 \end{aligned}$$

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

$$z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda^2 + \lambda + 1)}{3 \cdot (\lambda + 1)}$$

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:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot z_{s1} \cdot \sin \alpha + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot z_{s2} \cdot \cos \alpha + \sigma_{s3} \cdot A_{s3} \cdot z_{s3} \cdot \cos \alpha - \\
 - \sigma_{s4} \cdot A_{s4} \cdot z_{s4} \cdot \sin \alpha + f_{ywd} \cdot A_{sw1} \cdot z_{sw1} \cdot \sin \alpha + \\
 + f_{ywd} \cdot A_{sw2} \cdot z_{sw2} \cdot \sin \alpha,
 \end{aligned}$$

$$\text{где } \sigma_{s1} = \sigma_{s4} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \sin \alpha ;$$

$$\sigma_{s2} = \sigma_{s3} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{x \cdot (1 - \lambda)} \cdot \cos \alpha .$$

По вышеприведённой методике были выполнены расчёты прочности нормальных сечений и расчёты прочности пространственных сечений плит тормозного участка дороги испытательного полигона РУПП «БелАЗ». В результате расчёта было установлено, что несущая способность плиты по сечению, нормальному к оси Y составит 745.978 кНм/м; по сечению, нормальному к оси X – 537.860 кНм/м; при совместном действии изгибающего и крутящего моментов – 620.017 кНм/м.

Статический расчёт показывает, что в условиях эксплуатации плиты покрытия автодорог всегда будут подвержены сложному деформированию, так как нагрузки от колес автомобиля прикладываются вне оси симметрии плиты и дорожное основание под плиты неоднородно как по длине плиты, так и по ширине.

Анализируя результаты конструктивного расчёта железобетонных плит тормозного участка заключаем, что несущая способность большеразмерных плит по сечению, нормальному к оси X, является наименьшей. Следовательно, данный вид загрузки является наиболее неблагоприятным и поэтому его необходимо учитывать при проектировании большеразмерных железобетонных плит дорожного покрытия.

Также можно заключить, что элементы, подверженные изгибу с кручением, должны быть снабжены арматурой, воспринимающей усилия от действия изгибающего момента, поперечной силы и крутящего момента.

1. Семенюк С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформированном основании: монография/ С.Д. Семенюк. – Могилев: Беларус.-Рос. ун-т, 2003. – 269 с.

2. Босаков С.В. Статические расчеты плит на упругом основании/ С.В. Босаков. – Минск: БНТУ, 2002. – 128 с.

3. 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.

4. Семенюк С.Д. Расчет железобетонных балок прямоугольного сечения при совместном воздействии поперечных сил, крутящих и изгибающих моментов / С.Д. Семенюк, А.В. Зезюлин, Е.Я. Семенюк // Проблемы современного бетона и железобетона: сб. науч. тр. / Ин-т БелНИИС; редкол.: О.Н. Лешкевич [и др.]. – Минск, 2015. – Вып. 7. – с. 40-45.

5. ВСН 46-83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа. – Москва, 1985.

6. ТКП 45-3.03-244-2011 (02250). Автомобильные дороги. Дорожные одежды жесткого типа. Строительные нормы проектирования. – Минск, 2012. – 60с.