

*Семенюк Вячеслав Денисович, д-р техн. наук,
Шутов Руслан Зурабович, ст. преподаватель,
Белый Николай Васильевич., магистрант
Государственное учреждение высшего профессионального
образования, «Белорусско-Российский университет»
Могилев, Беларусь*

***Несущая способность железобетонных плит покрытия
испытательного полигона РУПП «Белорусский автомобильный
завод»***

***The bearing capacity of armoured concrete slabs of covering of proof
ground RUPE "Belarussian automobile factory"***

В представленной статье коротко изложена теория расчета прочности железобетонных сечений нормальных к продольной оси элемента, а также теория расчета прочности пространственных сечений, которая учитывает физическую нелинейность бетона и арматуры. Предложенный способ был применен для расчета конкретных плит участка с пороговыми неровностями испытательной дороги РУПП «Белорусский автомобильный завод». Примеры расчета фиксируют прочность нормальных сечений плит по двум ортогональным осям, а также прочность пространственных сечений при совместном воздействии на конструкцию изгибающего и крутящего моментов.

In presented article the theory of calculation of durability of ferro-concrete sections normal to a longitudinal axis of an element, and also the theory of calculation of durability of spatial sections which considers physical nonlinearity of concrete and armature is shortly stated. The offered way has been applied to calculation of concrete plates of a site with threshold roughnesses of test road RUPP «Belarus automobile factory». Calculation examples fix durability of normal sections of plates on two orthogonal axes, and also durability of spatial sections at joint influence on a design of the bending and twisting moments.

1. ВВЕДЕНИЕ

Разработанные железобетонные плиты предназначены для испытательной дороги РУПП «Белорусский автомобильный завод» на участке с пороговыми неровностями при проведении испытаний самосвалов грузоподъемностью в 500 тонн.

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 (рис. 1, 2).

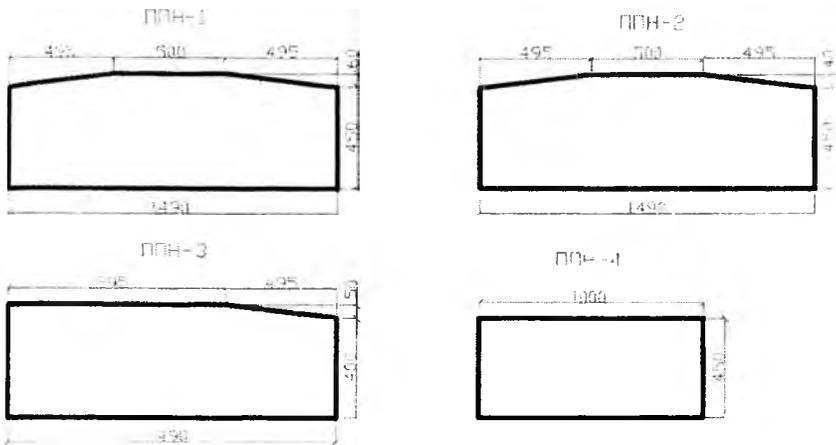


Рис. 1. Поперечные сечения плит

Плиты представляют собой элемент покрытия дороги с пороговыми неровностями размером в плане 1490×5990мм, толщиной 450 мм.

Изготовление плит производится из бетона класса С25/30. Армирование плит выполняется в виде сеток из стержней класса S400(ГОСТ 5781-82) сталь марки 35ГС или 35ГС2С диаметром 16...22 мм, связанных между собой при помощи П-образных хомутов с открылками из стержней класса S240(ГОСТ 5781-82) сталь марки Ст3пс3.

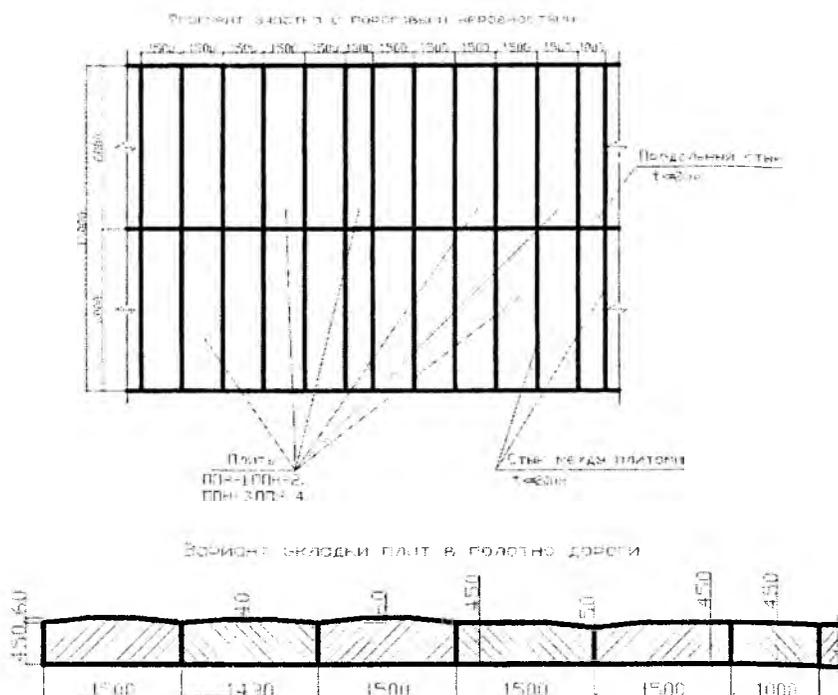


Рис. 2. Фрагмент участка с пороговыми неровностями

Железобетонные плиты тормозного участка испытательного полигона имеют маркировку ПДТ-1, ПДТ-2. Буквенный индекс обозначает – “плита дорожная тормозная”; цифровой индекс 1-прямоугольная в плане; 2-шестиугольная в плане (рис. 3).

Конструкции плит разработаны двух типоразмеров: прямоугольная с размерами 2000×2420×45 см, изготавливаемых на тормозном участке 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 2000×240 см, трапециевидная часть плиты длиной 2500 см с равнобокими скосами оканчивается размером 1200 см.

Плита запроектирована под нагрузку от карьерного самосвала при торможении с замедлением 4 м/с^2 , которая на переднюю ось

может достигать 764 тонны. Плита рассчитана как конструкция на упругом основании.

Конструкция плит запроектирована в соответствии с требованиями НБ 5.03.01-02 “Бетонные и железобетонные конструкции” [1] под нагрузку от карьерного самосвала грузоподъемностью в 500 тонн.

Основание под плиты выполнено из монолитного бетона класса С8/10 толщиной 300 мм, уложенного на уплотненный грунт из песчанно-гравийной смеси.

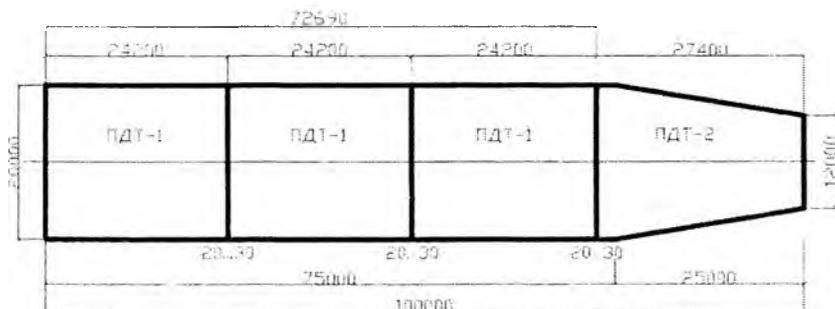


Рис. 3. Тормозной участок испытательного полигона

2. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

а) Расчет прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента.

При расчете прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, в расчет вводится бетон с прочностными и деформативными характеристиками, зависящими от предельной сжимаемости, напряженно-деформированного состояния, геометрии и компоновки сечения.

Определение предельных усилий в нормальных сечениях основывается на следующих допущениях:

– связь между напряжениями и деформациями бетона, а также между напряжениями и деформациями арматуры принимают в виде билинейной зависимости (рис. 4);

– для средних деформаций бетона конструкции и арматуры считается справедливым линейный закон распределения по высоте сечений;

– в качестве расчетного принимают сечение со средней высотой сжатой зоны “х”, соответствующей средним деформациям;

– сопротивление расчетного сечения будет исчерпано, если деформации крайних сжатых волокон бетона для растянутой арматуры достигают предельных значений.

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 (арматура классов S240, S400, S500) считается, что сопротивления арматуры и бетона используются полностью.

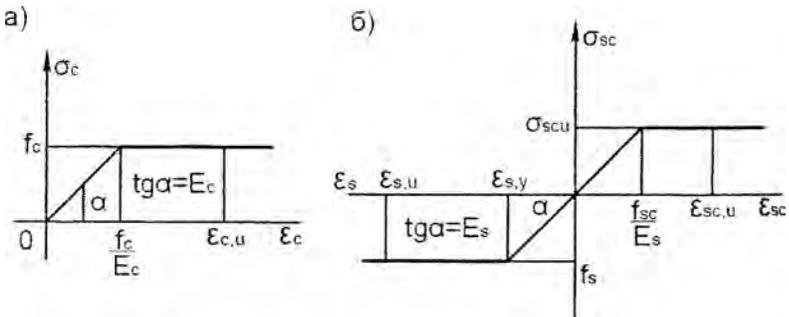


Рис. 4. Диаграммы “ $\sigma - \varepsilon$ ”:

а – для бетона; б – для арматурных сталей, имеющих физический предел текучести

Проверку прочности нормальных сечений (рис. 5) производят из условия

$$M \leq M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d - c^1). \quad (1)$$

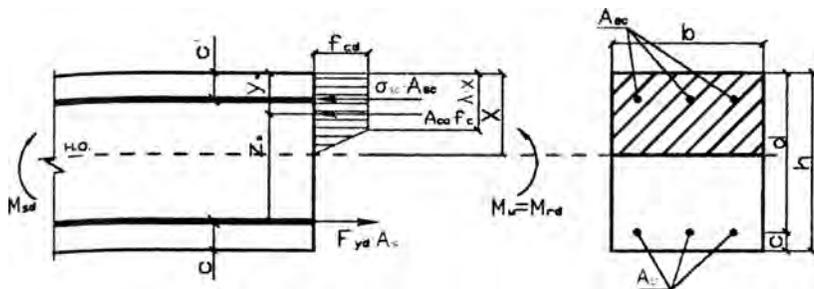


Рис. 5. К расчету прочности нормальных сечений

Высоту сжатой зоны “ x ” находят из квадратного уравнения

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

$$A_1 = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot (1 - \lambda^2) \cdot b; \quad (3)$$

$$A_2 = \alpha_m \cdot A_{s1} \cdot f_{cd} + (1 - \lambda) \cdot \sigma_{sc} \cdot A_{sc}; \quad (4)$$

$$A_3 = -\alpha_m \cdot A_{s1} \cdot d \cdot f_{ck}; \quad (5)$$

$$\alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}}; \quad (6)$$

$$\sigma_{sc} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (x - c)}{(1 - \lambda_{red}) \cdot x}. \quad (7)$$

При этом должно выполняться условие $\sigma_{sc} \leq f_{yd}$, в противном случае проверку прочности производят из условия (1) с учетом замены σ_{sc} на f_{yd} тогда

$$x = \frac{f_{yd} \cdot A_s - f_{sc} \cdot A_s}{0,5 \cdot (1 + \lambda_{red}) \cdot f_c \cdot b}. \quad (8)$$

Во всех случаях должно соблюдаться условие

$$\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + 0,02 \cdot E_s \cdot (1 - \lambda_c)} \leq x \leq \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)}. \quad (9)$$

При проектировании конструкций численные значения параметров f_{cd} , f_{ck} , f_{yk} и E_c для применяемых бетонов определяют по СНБ 5.03.01-02, коэффициент пластичности λ_c [2] вычисляют по формуле

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot f_{cd} \quad (10)$$

или по данным натурных испытаний [3].

В равенстве (10) значение f_{cd} выражено в МПа.

б) Расчет прочности пространственных сечений.

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

Положение сжатой зоны в пространстве определяется параметром c_1 – проекцией отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента. По нормали к косому сечению действуют проекции внешних расчетных моментов

$$M_y \cdot \sin \alpha \text{ и } T_x \cdot \cos \alpha,$$

где

$$\sin \alpha = \frac{b}{b_T}; \quad \cos \alpha = \frac{c_1}{b_T}; \quad b_T = \sqrt{b^2 + c_1^2}; \quad (11)$$

$c_1 = (2 \cdot h + b) \cdot ctg \beta$ – проекция отрезка нейтральной оси на продольную ось элемента.

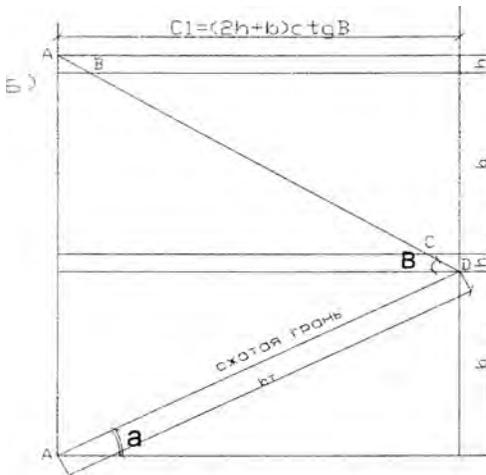
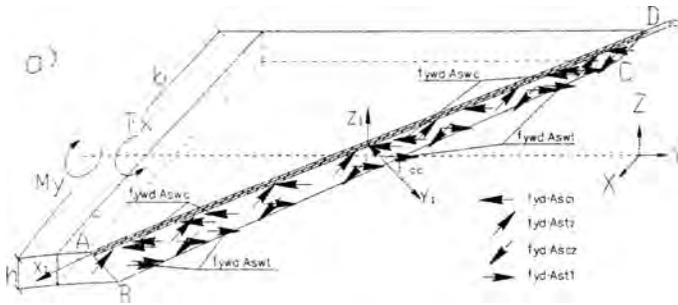


Рис. 6. Расчетная схема пространственного сечения при совместном действии крутящего и изгибающего моментов:
 а – схема внешних и внутренних усилий; б – развертка граней пространственного сечения

Из условия ограничения деформаций с учетом упругопластических характеристик бетона вычисляют граничную высоту сжатой зоны:

$$\chi_{lim} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} \quad (12)$$

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

$$\begin{cases} \sigma_{s1} = -f_{yd} \cdot \sin \alpha; \\ \sigma_{s2} = -\frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \lambda_{cd}) \cdot x} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{s3} = f_{yd} \cdot \cos \alpha; \\ \sigma_{s4} = f_{yd} \cdot \sin \alpha. \end{cases} \quad (13)$$

Определяют высоту сжатой зоны “x” из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны.

$$\begin{aligned} 0,5 \cdot (1 + \lambda) \cdot f_{cd} \cdot b_T \cdot x = f_{yd} \cdot A_{s1} \cdot \sin \alpha + f_{yd} \cdot A_{s2} \cdot \cos \alpha - \\ - A_{sc1} \cdot \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_2 - x)}{(1 - \lambda) \cdot x} \cdot \sin \alpha - A_{sc2} \cdot f_{yd} \cdot \cos \alpha + f_{ywd} \cdot A_{swt} \cdot \frac{b \cdot \operatorname{ctg} \beta}{S} \cdot \sin \alpha - \\ - f_{ywd} \cdot A_{swc} \cdot \frac{b \cdot \operatorname{ctg} \beta}{S} \cdot \sin \alpha. \end{aligned} \quad (14)$$

Плечо внутренней пары сил для каждого арматурного ряда определяют из выражения

$$Z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)}. \quad (15)$$

Условие прочности в расчетном предельном состоянии выводится из соотношения моментов внешних и внутренних сил относительно оси, проходящей через центр тяжести сжатой зоны. При этом, учитывая упругопластическую работу бетона, эпюру напря-

жений в сжатой зоне принимают в виде прямоугольной трапеции. При симметричном армировании плиты:

$$\begin{aligned} & \sigma_{s1} \cdot A_{s1} \cdot Z_{s1} \cdot \sin\alpha + \sigma_{s2} \cdot A_{s2} \cdot Z_{s2} \cdot \cos\alpha + \sigma_{sc1} \cdot A_{sc1} \cdot Z_{sc1} \cdot \sin\alpha - \\ & - \sigma_{sc2} \cdot A_{sc2} \cdot Z_{sc2} \cdot \cos\alpha + f_{ywd} \cdot A_{swr} \cdot \frac{b \cdot ctg\beta}{S} \cdot Z_{swr} \cdot \sin\alpha + \\ & + f_{ywd} \cdot A_{swc} \cdot \frac{b \cdot ctg\beta}{S} \cdot Z_{swc} \cdot \sin\alpha, \end{aligned} \quad (16)$$

где

$$\begin{aligned} \sigma_{s1} = \sigma_{s4} &= \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_1 - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \sin\alpha, \\ \sigma_{s2} = \sigma_{s3} &= \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_1 - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x} \cdot \cos\alpha. \end{aligned} \quad (17)$$

3. ПРИМЕР РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ ПОРОГОВЫХ НЕРОВНОСТЕЙ ППН-1

Несущая способность плиты по сечению нормальному к оси "у".

Поперечное сечение дорожной плиты принято по рис. 7. Монолитный бетон класса C25/30; арматура 11Ø16 S400 с $As1 = 22,1 \text{ см}^2$ и 11Ø22 S400 с $As2 = 41,81 \text{ см}^2$.

Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$;

$$E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Определяем прочностные и деформативные характеристики бетона:

$$f_{ck} = 25 \text{ МПа}; f_{cd} = 16,667 \text{ МПа};$$

$$f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}; f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа};$$

$$E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 102214 \cdot 0,1 = 12265,7 \text{ кН} \cdot \text{см} = 122,657 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

где $W_{pl} = \frac{b \cdot h^2}{3,5} = \frac{149,0 \cdot 49^2}{3,5} = 102214 \text{ см}^3$.

Коэффициент пластичности

$$\lambda_c = 0,93 - 0,014 \cdot 16,667 = 0,697.$$

$$d = d_2 = 490 - 50 = 440 \text{ мм} = 44,0 \text{ см}, \quad \alpha_m = \frac{E_s}{E_{cd}} = \frac{20,0 \cdot 10^4}{2,4 \cdot 10^4} = 8,333.$$

Граничная высота сжатой зоны:

$$\chi_{lim} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot d}{\alpha \cdot f_{cd} + f_{yd} \cdot (1 - \lambda_c)} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 44,0}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 24,5$$

Высоту сжатой зоны определяем из квадратного уравнения:

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

где неизвестные при x :

$$A_1 = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 149,0 \cdot (1 - 0,697^2) = 638,467;$$

$$A_2 = 8,333 \cdot 16,667 \cdot 41,81 + 365 \cdot 22,1 \cdot (1 - 0,697) = 8250,978;$$

$$A_3 = -8,333 \cdot 16,667 \cdot 41,81 \cdot 44 = -255500,445;$$

$$638,467 \cdot x^2 + 8250,978 \cdot x - 255500,445 = 0;$$

$$x = \frac{-8250,978 \pm \sqrt{8250,978^2 + 4 \cdot 638,467 \cdot 255500,445}}{2 \cdot 638,467} = 14,6 \text{ см}.$$

Напряжения в арматурных рядах по высоте сечения вычисляем по формуле

$$\sigma_{si} = \frac{\alpha \cdot f_{cd} \cdot (d_i - x)}{(1 - \lambda_c) \cdot x},$$

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (5,0 - 14,6)}{(1 - 0,697) \cdot 14,6} = -301,39 \text{ МПа.}$$

Несущая способность сечения составляет

$$M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d_2 - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d_2 - c^1)$$

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 149,0 \cdot 14,6 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \cdot 44,0 - 0,33 \cdot 14,6x \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 301,39 \cdot 10^2 \cdot 22,121 \cdot (44 - 5) = 14229929 \text{ Н} \cdot \text{см} =$$

$$142299 \text{ кН} \cdot \text{м} = 142,299 \text{ тс} \cdot \text{м},$$

что на 1 м погонный составляет 95,5 тс·м.

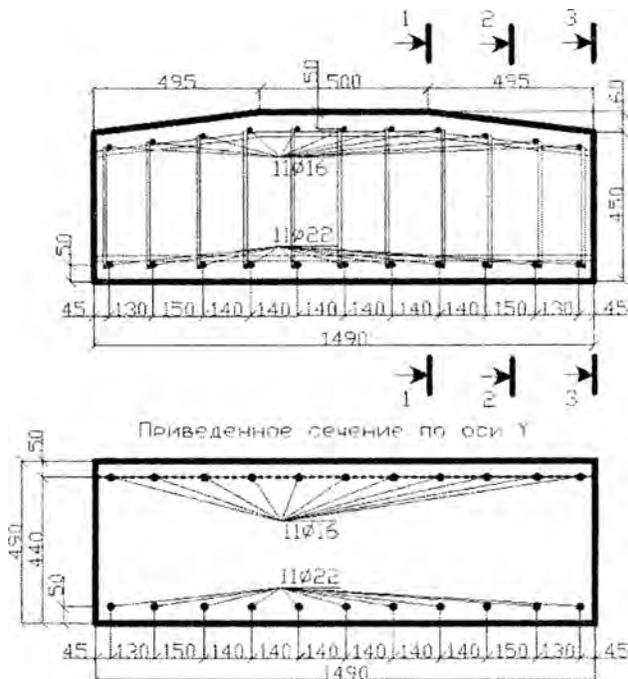


Рис. 7. Поперечное сечение дорожной плиты ППН-1

Несущая способность плиты по сечению нормальному к оси "х".
 Монолитный бетон класса C25/30; арматура 92Ø16 S400 с
 $A_s = 185,012 \text{ см}^2$.

Для рабочей арматуры

$$f_{yd} = 365 \text{ МПа}; f_{yk} = 400 \text{ МПа}; E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}.$$

Определяем прочностные и деформативные характеристики бетона:

$$f_{ck} = 25 \text{ МПа}; f_{cd} = 16,667 \text{ МПа};$$

$$f^{m}_{ctk} = 1,8 \text{ МПа}; f^{m}_{ctd} = 1,2 \text{ МПа};$$

$$E^{m}_{ck} = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E^{m}_{cd} = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

Сечение 1-1 рис. 8.

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 445142,6 \cdot 0,1 = 53417,1 \text{ кН} \cdot \text{см} = 534,171 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $W_{pl} = \frac{599,0 \cdot 51^2}{3,5} = 445142,6 \text{ см}^3$.

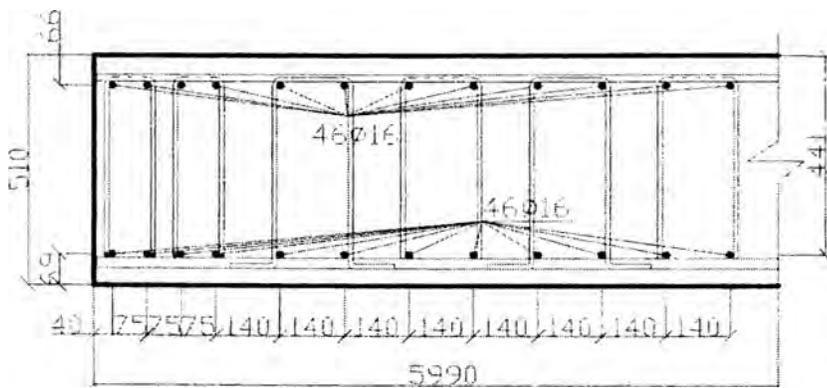


Рис. 8. Сечение 1-1 дорожной плиты ППН-1

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем коэффициент пластичности

$$\lambda_c = 0,697, d = d_2 = 51 - 6,9 = 44,1 \text{ см}, \alpha_m = 8,333.$$

$$\chi_{\text{lim}} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 44,1}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 24,55 \text{ см}.$$

“ χ ” находим из квадратного уравнения

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

$$\text{где } A_1 = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 599,0 \cdot (1 - 0,697^2) = 2566,721;$$

$$A_2 = 8,333 \cdot 16,667 \cdot 92,506 + 365 \cdot 92,506 \cdot (1 - 0,697) = 23078,5;$$

$$A_3 = -8,333 \cdot 16,667 \cdot 92,506 \cdot 44,1 = -566587,918;$$

$$2566,721 \cdot x^2 + 23078,5 \cdot x - 566587,918 = 0;$$

$$x = 11,0 \text{ см}.$$

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (6,6 - 11,0)}{(1 - 0,697) \cdot 11,0} = -183,348 \text{ МПа}.$$

Несущая способность сечения составляет

$$M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d_2 - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d_2 - c^1)$$

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 599,0 \cdot 11,0 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \cdot 44,1 - 0,33 \cdot 11,0 \cdot x \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 183,348 \cdot 10^2 \cdot 92,506 \cdot (44,1 - 6,6) = 431024500 \text{ Н} \cdot \text{см} = 4310,245 \text{ кН} \cdot \text{м} = 431,0 \text{ тс} \cdot \text{м},$$

что на 1 м погонный составляет 71,96 тс·м.

Сечение 2-2 рис. 9.

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 394313,1 \cdot 0,1 = 47317,6 \text{ кН} \cdot \text{см} = 473,176 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $W_{pl} = \frac{599,0 \cdot 48^2}{3,5} = 394313,1 \text{ см}^3$.

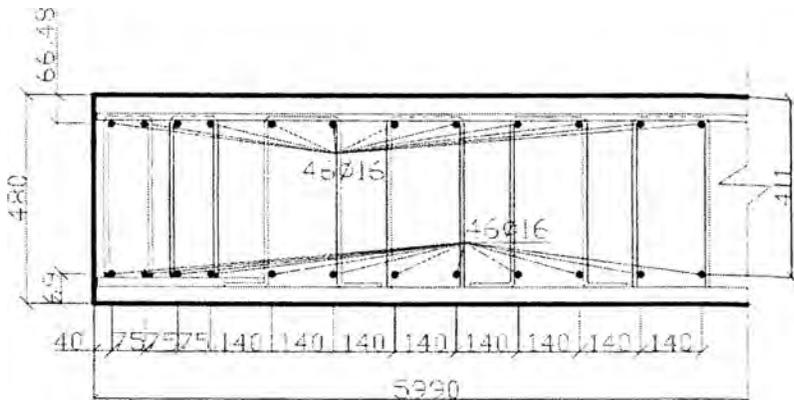


Рис. 9. Сечение 2-2 дорожной плиты ППН-1

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем коэффициент пластичности

$$\lambda_c = 0,697, d = d_2 = 48 - 6,9 = 41,1 \text{ см}, \alpha_m = 8,333.$$

$$\chi_{lim} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 41,1}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 22,88 \text{ см}.$$

“x” находим из квадратного уравнения

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

где $A_1 = 2566,721$; $A_2 = 23078,5$; $A_3 = -528044,522$;

$$2566,721 \cdot x^2 + 23078,5 \cdot x - 528044,522 = 0;$$

$x = 10,5$ см.

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (6,6 - 10,5)}{(1 - 0,697) \cdot 10,5} = -170,252 \text{ МПа.}$$

Несущая способность сечения составляет

$$M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d_2 - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d_2 - c^1),$$

$$M_u = 0,5 \cdot 16,667 \cdot 599,0 \cdot 10,5 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \cdot 41,1 - 0,33 \cdot 10,5 \cdot x \cdot (1 + 0,697 + 0,697^2)] + 170,252 \cdot 10^2 \cdot 92,506 \cdot (41,1 - 6,648) = \\ = 380184163 \text{ Н} \cdot \text{см} = 3801,8 \text{ кН} \cdot \text{м} = 380,18 \text{ тс} \cdot \text{м},$$

что на 1 м погонный составляет 63,47 тс·м.

Сечение 3-3 рис. 10.

Несущая способность бетонного сечения

$$M = f_{ctd} \cdot W_{pl} = 1,2 \cdot 346564,3 \cdot 0,1 = 41587,7 \text{ кН} \cdot \text{см} = 415,877 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

где $W_{pl} = \frac{599,0 \cdot 45^2}{3,5} = 346564,3 \text{ см}^3$.

Для определения несущей способности армированного сечения вычисляем коэффициент пластичности

$$\lambda_c = 0,697, d = d_2 = 45 - 6,9 = 38,1 \text{ см}, \alpha_m = 8,333.$$

$$\chi_{lim} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 38,1}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 21,2 \text{ см.}$$

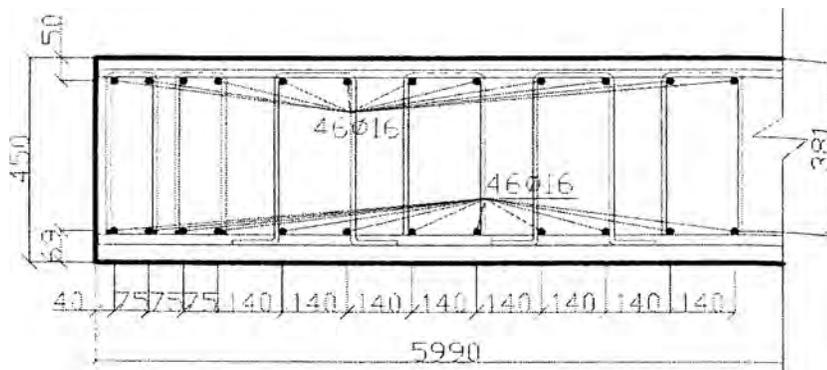


Рис. 10. Сечение 3-3 дорожной плиты ППН-1

“ x ” находим из квадратного уравнения

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

где $A_1 = 2566,721$; $A_2 = 23078,5$; $A_3 = -489501,126$;

$$2566,721 \cdot x^2 + 23078,5 \cdot x - 489501,126 = 0;$$

$x = 10,0$ см.

$$\sigma_{sc} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot (5,0 - 10,0)}{(1 - 0,697) \cdot 10,0} = -229,185 \text{ МПа.}$$

Несущая способность сечения составляет

$$M_u = 0,5 \cdot f_{cd} \cdot b \cdot x \left[(1 + \lambda_c) \cdot d_2 - 0,33 \cdot x \cdot (1 + \lambda_c + \lambda_c^2) \right] + \sigma_{sc} \cdot A_{sc} \cdot (d_2 - c^1).$$

$$\begin{aligned}
 M_u &= 0,5 \cdot 16,667 \cdot 599,0 \cdot 10,0 \cdot 10^2 \cdot [(1 + 0,697) \cdot 38,1 - 0,33 \cdot 10,0 \cdot \\
 & \quad x(1 + 0,697 + 0,697^2)] + 229,185 \cdot 10^2 \cdot 92,506 \cdot (38,1 - 5,0) = \\
 & = 356964386 \text{ Н} \cdot \text{см} = 3569,6 \text{ кН} \cdot \text{м} = 356,96 \text{ тс} \cdot \text{м},
 \end{aligned}$$

что на 1 м погонный составляет 59,6 тс·м.

Несущая способность плиты при совместном действии M_u и T_x .

Монолитный бетон класса С25/30; арматура в продольном направлении 11Ø16 S400 с $A_{sc1} = 22,121 \text{ см}^2$ и 11Ø22 S400 с $A_{st1} = 41,811 \text{ см}^2$, в поперечном направлении 11Ø16 S400 с $A_{st2} = 22,121 \text{ см}^2$ и 17Ø16 S400 с $A_{sc2} = 34,187 \text{ мм}^2$. Для рабочей арматуры $f_{yd} = 365 \text{ МПа}$; $f_{yk} = 400 \text{ МПа}$; $E_s = 2,0 \cdot 10^5 \text{ МПа}$. Для хомутов: 6Ø10 S240 с $A_{swc} = 4,71 \text{ см}^2$, 5Ø10 S240 с $A_{swt} = 3,925 \text{ см}^2$;

где A_{sc1} – площадь верхней арматуры в продольном направлении;

A_{sc2} – площадь верхней арматуры в поперечном направлении;

A_{st2} – площадь нижней арматуры в поперечном направлении;

A_{st1} – площадь нижней арматуры в продольном направлении;

A_{swc} – площадь хомутов в сжатой зоне;

A_{swt} – площадь хомутов в растянутой зоне (площадь открылок).

Для бетона:

$$f_{ck} = 25 \text{ МПа}; f_{cd} = 16,667 \text{ МПа};$$

$$f_{ctk}^m = 1,8 \text{ МПа}; f_{ctd}^m = 1,2 \text{ МПа};$$

$$E_{ck}^m = 3,2 \cdot 10^4 \text{ МПа}; E_{cd}^m = 2,4 \cdot 10^4 \text{ МПа}.$$

$$\lambda_c = 0,697, d = d_2 = 44,0 \text{ см}, \alpha_m = 8,333.$$

Граничная высота сжатой зоны:

$$\chi_{lim} = \frac{8,333 \cdot 16,667 \cdot 44,0 \cdot 0,516}{8,33 \cdot 16,667 + 365 \cdot (1 - 0,697)} = 12,6 \text{ см}.$$

Ширина сжатой зоны от действия M_u и T_x :

$$b_T = \sqrt{247^2 + 149^2} = 288,46 \text{ см};$$

$$c_1 = (2 \cdot 49 + 149) \cdot ctg 45 = 247 \text{ см};$$

$$\cos \alpha = \frac{247}{288,46} = 0,856; \sin \alpha = \frac{b}{b_T} = \frac{149}{288,46} = 0,516.$$

Определяем высоту сжатой зоны “х” из уравнения проекций всех сил, действующих в рассматриваемом пространственном сечении на нормаль к плоскости сжатой зоны.

$$0,5 \cdot (1 - \lambda^2) \cdot f_{cd} \cdot b_f \cdot x^2 - f_{yd} \cdot A_{st1} \cdot \sin \alpha \cdot (1 - \lambda) \cdot x - f_{yd} \cdot A_{st2} \cdot \cos \alpha \cdot (1 - \lambda) \cdot x + A_{sc1} \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot d \cdot \sin \alpha - A_{sc1} \cdot \alpha \cdot f_{cd} \cdot x \cdot \sin \alpha + A_{sc2} \cdot f_{yd} \cdot \cos \alpha \cdot (1 - \lambda) \cdot x - f_{ywd} \cdot A_{swt} \cdot \frac{b \cdot ctg \beta}{S} \cdot \sin \alpha + f_{ywd} \cdot A_{swc} \cdot \frac{b \cdot ctg \beta}{S} \cdot \sin \alpha = 0.$$

$$0,5 \cdot (1 - 0,697^2) \cdot 16,667 \cdot 28846 \cdot x^2 - 365 \cdot 41,811 \cdot 0,516 \cdot (1 - 0,697) \cdot x - 365 \cdot 22,121 \cdot 0,856 \cdot (1 - 0,697) \cdot x + 22,121 \cdot 8,333 \cdot 16,667 \cdot 44,0 \cdot 0,516 - 22,121 \cdot 8,333 \cdot 16,667 \cdot x \cdot 0,516 + 34,187 \cdot 365 \cdot 0,856 \cdot (1 - 0,697) \cdot x - 365 \cdot 3,925 \cdot 2 \cdot \frac{149,1}{28} \cdot 0,516 + 174 \cdot 4,71 \cdot \frac{149,1}{23,3} \cdot 0,516 = 0.$$

$$1236,05 \cdot x^2 - 2828,49 \cdot x + 64590,2 = 0; \quad x = 8,5 \text{ см.}$$

$$Z_i = d_i - \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)},$$

$$\text{где } \frac{x \cdot (\lambda_c^2 + \lambda_c + 1)}{3 \cdot (\lambda_c + 1)} = \frac{8,5 \cdot (0,697^2 + 0,697 + 1)}{3 \cdot (0,697 + 1)} = 3,7 \text{ см.}$$

Тогда

$$Z_{st1} = 44 - 3,7 = 40,3 \text{ см; } Z_{st2} = 42,1 - 3,7 = 38,4 \text{ см;}$$

$$Z_{sc1} = 5 - 3,7 = 1,3 \text{ см; } Z_{sc2} = 6,6 - 3,7 = 2,9 \text{ см;}$$

$$Z_{swc} = 5,3 - 3,7 = 1,6 \text{ см; } Z_{swt} = 44,6 - 3,7 = 40,9 \text{ см.}$$

$$\sigma_{st1} = 987,8 \text{ МПа; } \sigma_{st2} = 1551 \text{ МПа;}$$

$$\sigma_{sc1} = -97,39 \text{ МПа; } \sigma_{sc2} = -87,71 \text{ МПа.}$$

Несущая способность дорожной плиты при восприятии крутящего и изгибающего моментов:

$$\begin{aligned}
 & 365 \cdot 41,811 \cdot 40,3 \cdot 0,516 \cdot 10^2 + 365 \cdot 22,121 \cdot 38,4 \cdot 0,856 \cdot 10^2 - \\
 & - 97,39 \cdot 22,121 \cdot 1,3 \cdot 0,516 \cdot 10^2 - 87,71 \cdot 34,187 \cdot 2,9 \cdot 0,856 \cdot 10^2 + \\
 & + 365 \cdot 3,925 \cdot \frac{149 \cdot 1}{24} \cdot 40,9 \cdot 0,516 + 175 \cdot 4,71 \cdot \frac{149 \cdot 1}{23,3} \cdot 1,6 \cdot 0,516 = \\
 & = 57757268,4 \text{ Н} \cdot \text{см} = 577,57 \text{ кН} \cdot \text{м} = 57,8 \text{ тс} \cdot \text{м},
 \end{aligned}$$

что на 1 м погонный составляет 20,04 тс·м.

Аналогично рассчитываем железобетонные плиты ППН-2, ППН-3, ППН-4, ПДТ-1. Несущая способность плит по оси “у” – ППН-2 = 90,76 тс·м; ППН-3 = 78,55 тс·м; ППН-4 = 99,4 тс·м; ПДТ-1 = 83,54 тс·м;

по оси “х” – ППН-2 = 59,59 тс·м; ППН-3 = 46,59 тс·м; ППН-4 = 57,54 тс·м; ПДТ-1 = 134,6 тс·м.

При восприятии крутящего и изгибающего моментов – ППН-2 = 19,55 тс·м; ППН-3 = 18,65 тс·м; ППН-4 = 16,77 тс·м; ПДТ-1 = 65,534 тс·м;

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате расчета получаем, что несущая способность плит при совместном действии крутящего и изгибающего момента является наименьшей. Следовательно, данный вид загрузки необходимо учитывать при проектировании железобетонных плит дорожного покрытия. При эксплуатации дорог избежать совместное воздействие крутящего и изгибающего моментов не возможно, так как передача нагрузки на плиту от колес автомобиля всегда будет вне оси симметрии конструкции, а также не исключена вероятность образования выбоин, воронок и других дефектов под основанием плиты.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. СНБ 5.03.01-02 «Бетонные и железобетонные конструкции». – Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2003. – 139 с.
2. Семенюк, С.Д. Железобетонные пространственные фундаменты жилых и гражданских зданий на неравномерно деформируемом основании: монография / С.Д. Семенюк. – Могилев: Белорусско-Российский университет, 2003. – 269 с.
3. Семенюк, С.Д. К определению модуля упругости и упругопластических характеристик бетона при кратковременном центральном сжатии / С.Д. Семенюк // Вестник БГТУ. – 2001. – № 1. – С. 40–45.