

Методика расчета нагреваемого дорожного покрытия обобщена для расчета нагреваемого аэродромного покрытия. Разработана конструкция, в которой спроектированная система нагреваемых слоев расположена над трехслойной цементобетонной плитой, разработанной в НАУ. Исследовано напряженное состояние и прочность конструкции. Разработана математическая модель и программа расчета теплового и напряженно-деформированного состояния покрытий с поверхностными нагреваемыми слоями, которая послужила основой для практического внедрения работы в организации системы Укравтодор, аэродромного и агропромышленного комплексов.

Ключевые слова: Конструирование нагреваемого покрытия, химические электропроводные волокна, фибробетэл, термонапряженное состояние, прочность.

УДК 539.3

## РОЗРАХУНОК ШАРУВАТИХ КОНСТРУКЦІЙ ДОРОЖНЬОГО ОДЯГУ МОСТІВ АРМОВАНОГО КОМПОЗИТНИМИ МАТЕРІАЛАМИ

Піскунов В.Г., доктор технічних наук  
Цибульський В.М.

Постановка проблеми. Важливими елементами автодорожніх мостів є прогонова будова та плита проїзної частини, яка в теперішній час виготовлюється в основному з залізобетону або сталі. Створення плит проїзної частини прогонових будов, альтернативних залізобетонним та металевим, пов'язана із застосуванням арматури з композитних матеріалів (склопластиків, базальтопластиків), потребує розробки методів їх розрахунку. Переваги таких конструкцій полягає у зменшенні вагових показників, проектної вартості та збільшенні ресурсу експлуатації та надійності, що в цілому забезпечує покращення ефективності роботи мережі автомобільних доріг України. Тому актуальним є удосконалення методик розрахунку вказаних шаруватих систем.

Викладення основного матеріалу. Принципові положення методики розрахунку дорожнього одягу для вказаних типів прогонових будов зводяться до наступних:

1. Визначення зусиль для відповідної типової прогонової будови. Внутрішні зусилля (згинаючі моменти) визначаються згідно прийнятих нормативних положень [3] та методики розрахунку конструкцій прогонових будов від комбінації постійних та тимчасових навантажень, детально викладеній у [4,5]. Для розрахунку дорожнього одягу, відшарованого від плити прогонової будови, а також, при необхідності, безпосередньо плити, відокремленої від одягу, виконується розподіл розрахункового згинаючого моменту на момент, що безпосередньо сприймає дорожній одяг та момент, що сприймається конструкцією плити пропорційно до їх відповідних жорсткостей. Особливістю визначення зусиль (згинаючих моментів) є прикладання навантажень (А-15 або НК-100) безпосередньо до поверхні дорожнього одягу, оскільки він розглядається як загальна з плитою конструктивна частина, що підлягає розрахунку – оцінці міцності її шарів. Відповідний розподіл навантаження за товщиною дорожнього одягу враховується пошарово при визначенні додаткових напружень від поперечного обтиснення – врахування впливу поперечних нормальних напружень для уточнення напруженого стану дорожнього одягу

2. Формування вихідних даних щодо конструкції балок або плит прогонової будови та дорожнього одягу, як шаруватої системи. Балка або плита прогонової будови розглядається в загальному пакеті з шарами дорожнього одягу як єдина шарувата конструкція. Шарувату структуру конструкції схематично наведено на рис.1-а,б. Кожен шар  $i = 1, 2, \dots, n$  визначається товщиною  $h_i$  (м) та шириною  $b_i$  (м), модулем пружності  $E_i$  (МПа) та коефіцієнтом Пуассона  $\nu_i$ , розрахунковими опорами на розтяг  $R_p$  (МПа) та стиск  $R_{ct_i}$  (МПа). Характеристики бетону та арматури приймаються згідно [3]. Арматура замінюється еквівалентним до її загальної площі шаром з відповідною до цієї площі товщиною. Ширина шарів  $b_i$  у перерізі приймається як розрахункова ширина полоси плити для визначення згинаючого розрахункового моменту (звичайно  $b_i = b = 1$  м). Для плитних прогонових будов з пустотних блоків ширина плити дорівнює ширині блоку ( $b_i = b = 1$  м), а на рівні пустот – товщині стінки зведеного до форми двотавра зведеного перерізу плитного блока. У вихідні

дані також входить розрахунковий згинаючий момент  $M$ , визначений згідно п.1, а також рівнодіюча тимчасового нормативного навантаження  $F_p$ , що діє по площі штампу навантаження А-15 або НК-100, залежно від того, яке з них визначає розрахунковий згинаючий момент. Рівнодіюча  $F_p$  визначається з урахуванням коефіцієнту надійності та динамічного коефіцієнту.

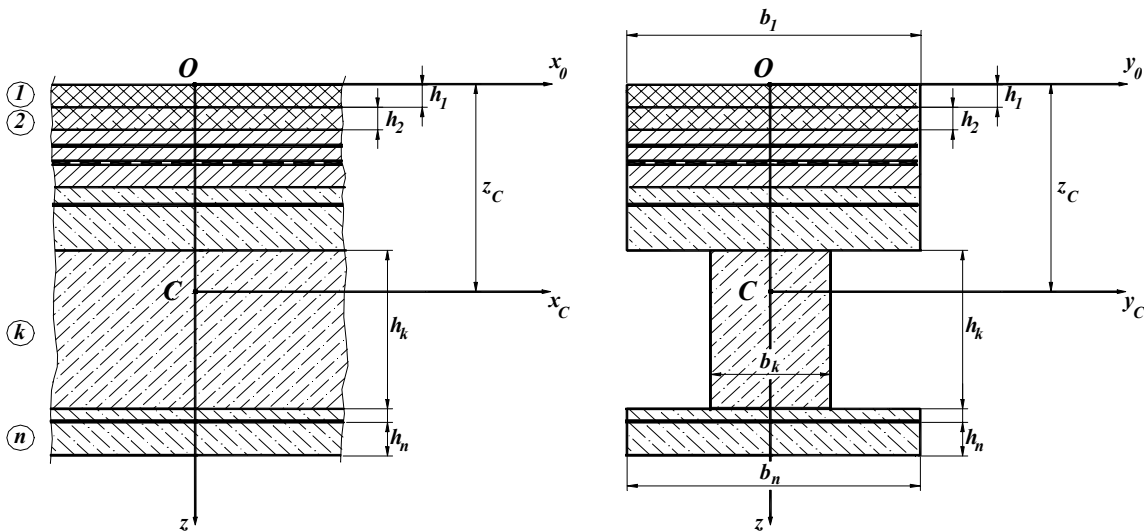


Рис.1

3. Визначення центра ваги (жорсткості). Для кожного шару визначається: жорсткість на розтяг:

$$B_i = \frac{E_i b_i h_i}{1 - \nu_i^2}, \quad (\text{МН}); \quad (1)$$

для першого (верхнього) шару ( $i = 1$ )

$$z_1 = 0.5h_1, \quad (\text{М});$$

для інших шарів ( $i = 2, 3, \dots, n$ )

$$z_{i+1} = \sum_{j=1}^i h_j + \frac{h_{i+1}}{2}, \quad (\text{М}). \quad (2)$$

Координата центра ваги (жорсткості) усього пакету шарів конструкції знаходиться за формулою:

$$z_C = \frac{\sum_{i=1}^n B_i z_i}{\sum_{i=1}^n B_i}, \quad (\text{М}). \quad (3)$$

Координата  $z_C$  визначає положення центральної осі  $Cy_C$  (рис. 1,б).

4. Визначення жорсткості конструкції при згині –циліндричної жорсткості.

Для кожного шару  $i = 1, 2, \dots, n$  визначається:

власна циліндрична жорсткість при згині:

$$D_i = \frac{B_i h_i^2}{12}, \quad (\text{МНм}^2); \quad (4)$$

координати центрів ваги (жорсткості) шарів відносно центральної осі  $Cy_C$ :

$$c_i = z_i - z_C, \quad (\text{М}); \quad (5)$$

загальна циліндрична жорсткість конструкції плити при згині:

$$D = \sum_{i=1}^n (D_i + c_i^2 B_i), \quad (\text{МНм}^2). \quad (6)$$

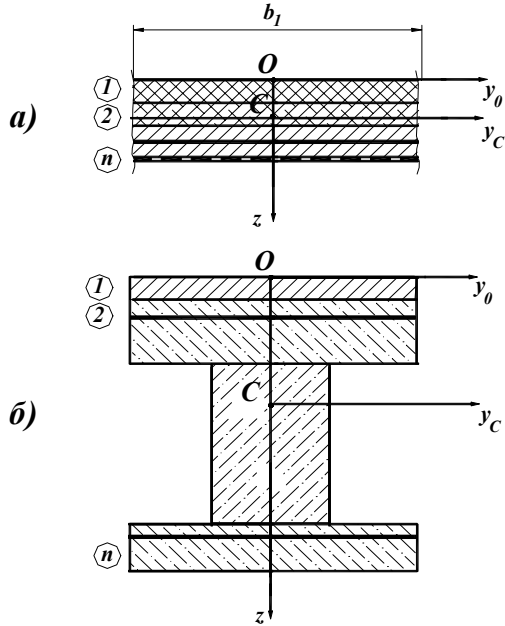
Центральна вісь  $Cy_C$  розділяє переріз плити на стиснуту та розтягнуту зони. В розтягнутій зоні утворюються тріщини в бетоні, внаслідок чого ця зона виключається з роботи плити. Для цієї зони виконується перерозподіл шарів. Шар  $i = k$  товщиною  $h_k$ , у якому розташована центральна вісь,

визначена координатою  $z_C$ , розділяється на два шари, один з яких лежить вище від осі  $Cy_C$ , а інший – нижче. Їх товщини відповідно:

$$h'_k = z_C - \sum_{i=1}^{k-1} h_i, \quad h''_k = h_k - h'_k. \quad (7)$$

Призначається нова послідовна нумерація шарів  $i = 1, 2, \dots, n$ , кількість яких збільшиться на одиницю, у зв'язку з розділенням шару, яке розглянуто вище. Згідно нової нумерації переформовуються відповідні значення  $h_i, b_i, E_i, \nu_i, R_{\rho_i}, R_{\sigma_{ti}}$ . Для бетонних шарів, які розташовані у розтягнутій зоні (нижче від осі  $Cy_C$ ) приймається модуль пружності з умовним значенням  $E_i = 1$  МПа.

Повторюється процедура визначення циліндричної жорсткості плити за формулами (1) – (6), в яких  $z_C = z'_C$ . Координата центра ваги  $z'_C$  визначає нове положення центральної осі  $C'y'_C$  (рис. 2).



Циліндрична жорсткість конструкції, яка розширована по поверхні контакту між дорожнім одягом та плитою, визначається як сума жорсткостей шарів дорожнього одягу та плити:

$$D_{\Sigma} = D_{DO} + D_{PL}, \quad (\text{МНм}^2). \quad (8)$$

Кожна з жорсткостей  $D_{DO}$  та  $D_{PL}$  знаходиться по загальній методиці за формулами (1) – (7), які застосовуються для кожного з пакетів шарів – одягу та плити (рис.2-а,б), відокремлених один від одного.

Для кожного пакету вводиться своя нумерація шарів  $i = 1, 2, \dots, n$  та відповідно до неї характеристики  $h_i, b_i, E_i, \nu_i, R_{\rho_i}, R_{\sigma_{ti}}$ .

Отже, циліндричні жорсткості  $D_{DO}$  та  $D_{PL}$  визначаються за кінцевою формулою всієї процедури (6), у якій  $D = D_{DO}$  та  $D = D_{PL}$ .

Рис.2

Жорсткість  $D_{\Sigma}$  є їх сумою згідно формули (8).

5. Визначення напружень в шарах конструкції. Напруження в дорожньому одязі, який працює спільно з плитою, визначається пошарово для загального пакету шарів від розрахункового згинаючого моменту  $M$ . Якщо ж дорожній одяг відшарований від плити, то напруження в ньому розраховують від моменту  $M_{DO}$ , що сприймає дорожній одяг, а напруження у плиті – від моменту  $M_{PL}$ , що сприймає плита:

$$M_{DO} = M \frac{D_{DO}}{D_{\Sigma}}, \quad M_{PL} = M \frac{D_{PL}}{D_{\Sigma}}. \quad (9)$$

Відповідно  $D_{\Sigma}$  визначається за формулою (8), а  $D_{DO}$  та  $D_{PL}$  за формулою (6), в якій приймається  $D = D_{DO}$  та  $D = D_{PL}$ . Загальний згинаючий момент дорівнює їх сумі:

$$M = M_{DO} + M_{PL}. \quad (10)$$

Процедура визначення напружень в усіх випадках однакова:

обчислюються координати верхньої та нижньої поверхонь шарів відносно центральної осі  $Cy_C$  (при виключенні бетону з роботи в розтягнутій зоні – відносно осі  $C'y'_C$ ):

$$z_i^{(\pm)} = c_i \pm \frac{h_i}{2}, \quad z_i^{(-)} = z_{i+1}^{(+)} \quad (\text{м}); \quad (11)$$

визначаються напруження для верхньої (+) та нижньої (-) поверхонь кожного шару:

$$\sigma_i^{(\pm)} = \frac{E_i M}{(1 - \nu_i^2) D} z_i^{(\pm)}, \quad (\text{МПа}); \quad (12)$$

для визначення напружень у шарах дорожнього одягу та плити відшарованих один від одного, у формулі (12) приймається відповідно  $M = M_{DO}$ ,  $D = D_{DO}$  та  $M = M_{PL}$ ,  $D = D_{PL}$ . Проводиться

уточнення напружень за рахунок впливу поперечного обтиснення (поперечних нормальних напружень), для чого виконується розподіл рівнодіючої  $F_P$  тимчасових навантажень, від яких виникає розрахунковий згинаючий момент, за товщиною дорожнього одягу згідно схеми (рис. 3): визначаються площі, через які передається рівнодіюча  $F_P$  на верхню поверхню дорожнього одягу ( $A_1^{(+)} = e_1 d_1$ ) та верхні поверхні послідовних шарів ( $A_i^{(+)}$ ):

$$A_i^{(+)} = e_i d_i = (e_{i-1} + 2h_i)(d_{i-1} + 2h_i), (\text{м}^2) \quad (13)$$

$$A_{i-1}^{(-)} = A_i^{(+)};$$

де  $e_1, d_1$  – розміри площадки (відповідно вздовж і поперек осі моста) передачі навантаження  $F_P$  на верхню поверхню дорожнього одягу;  $h_i$  – товщина  $i$ -того шару; визначається тиск на поверхні одягу та поверхнях між шарами й відповідні поперечні нормальні напруження:

$$\sigma_{z_{i-1}}^{(-)} = \sigma_{z_i}^{(+)} = -q_i^{(+)} = -\frac{F_{\text{РОЗР}}}{A_i^{(+)}}, (\text{МПа}), \quad (14)$$

визначаються повні уточнені нормальні напруження в шарах одягу з урахуванням поперечних нормальних напружень:

$$\bar{\sigma}_i^{(\pm)} = (1 - \nu_i^2) \sigma_i^{(\pm)} + \nu_i \sigma_{z_i}^{(\pm)}. \quad (15)$$

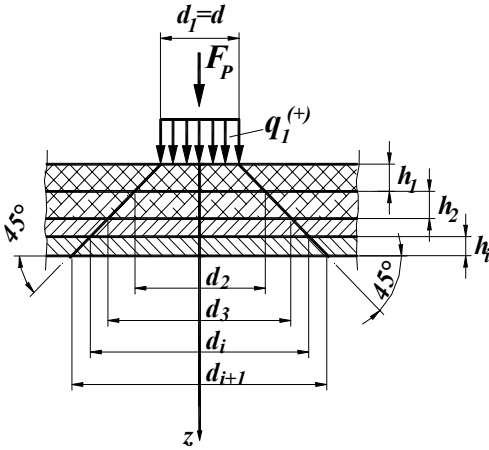


Рис.3

#### 6. Оцінка міцності матеріалу шарів дорожнього одягу

Для оцінки міцності матеріалу шарів використовується критерій міцності Кулона–Мора, який застосовується для матеріалів, що мають різний розрахунковий опір розтягу  $R_P$  та стиску  $R_{CT}$ .

Послідовність перевірки міцності: для кожного шару дорожнього одягу з уточнених поздовжніх нормальних напружень  $\bar{\sigma}_i^{(\pm)}$  та поперечних нормальних напружень  $\sigma_{z_i}^{(\pm)}$  формуються головні напруження:

$$\sigma_{\max_i}^{(\pm)} = \frac{1}{2} \left[ \left( \bar{\sigma}_i^{(\pm)} + \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right) + \sqrt{\left( \bar{\sigma}_i^{(\pm)} - \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right)^2} \right],$$

$$\sigma_{\min_i}^{(\pm)} = \frac{1}{2} \left[ \left( \bar{\sigma}_i^{(\pm)} + \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right) - \sqrt{\left( \bar{\sigma}_i^{(\pm)} - \sigma_{z_i}^{(\pm)} \right)^2} \right]. \quad (16)$$

пошарово визначаються еквівалентні напруження та виконується перевірка міцності:

$$\sigma_{ekv_i}^{(\pm)} = \sigma_{\max_i}^{(\pm)} - \frac{R_P}{R_{CT}} \sigma_{\min_i}^{(\pm)} \leq R_P; \quad (17)$$

робиться висновок щодо міцності шарів конструкції дорожнього одягу.

#### ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Пискунов В.Г., Вериженко В.Е. Линейные и нелинейные задачи расчета слоистых конструкций. – К.: Будівельник, 1986. – 176с.
2. Пискунов В.Г., Сипетов В.С. и др. Расчет неоднородных пологих оболочек и пластин методом конечных элементов. – Киев: Изд-во «Вища школа», 1987. – 200 с.
3. ДБН В.2.3–14: 2006. Споруди транспорту. Мости та труби. Правила проектування. – К.: Держбуд України, 2006. – 367 с.
4. Я.Д.Лившиц, М.М.Онищенко, А.А.Шкуратовский. Примеры расчёта железобетонных мостов.– К.: Вища школа. Головное издательство, 1986.–263 с.
5. Поливанов Н.И. Проектирование и расчет железобетонных и металлических автодорожных мостов. – М.: Изд-во “Транспорт”, 1970. – 516 с.

#### РЕФЕРАТ

Пискунов В.Г., Цибульський В.М. Розрахунок шаруватих конструкцій дорожнього одягу мостів армованого композитними матеріалами./ Вадим Георгійович Пискунов, Віталій Миколайович Цибульський // Вісник НТУ. – К.: НТУ – 2012. – Вип.26.

Подано методику розрахунку дорожнього одягу мостів з армобетонних конструктивних елементів, що базується на моделі шаруватих систем.

Об'єкт дослідження – конструкція дорожнього одягу та плита проїзної частини, армована із застосуванням арматури з композитних матеріалів.

Мета роботи – удосконалити методику розрахунку шаруватих конструкцій, що дозволяє отримувати уточнені результати розрахунку із врахуванням поперечних нормальних напружень від обтиснення шарів та залежності теорії пружності для оцінки міцності матеріалів конструкції

Методи досліджень – розрахунково-теоретичні.

Для розрахунку дорожнього одягу, відшарованого від плити прогонової будови, а також, при необхідності, безпосередньо плити, відокремленої від одягу, виконується розподіл розрахункового згинаючого моменту на момент, що безпосередньо сприймає дорожній одяг та момент, що сприймається конструкцією плити пропорційно до їх відповідних жорсткостей. Відповідний розподіл навантаження за товщиною дорожнього одягу враховується пошарово при визначенні додаткових напружень від поперечного обтиснення – врахування впливу поперечних нормальних напружень для уточнення напруженого стану дорожнього одягу. Плита прогонової будови розглядається в загальному пакеті з шарами дорожнього одягу як єдина шарувата конструкція.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** ДОРОЖНІЙ ОДЯГ, ШАРУВАТІ СИСТЕМИ, НАПРУЖЕННЯ.

#### ABSTRACT

Piskunov V.G., Cybulski V.M. Calculation of layered structures pavement bridges reinforced composite materials. / Vadim G. Piskunov, Vitaliy M. Cybulski // Visnyk NTU. – K.: NTU. – 2012. – Vol. 26.

Filed methodology for calculating pavement bridges built with armobetonyh structural elements based on the model of layered systems.

Object of study - construction of pavement and roadway slab, reinforced with the use of reinforcement of composite materials.

Purpose - to improve the method of calculating the layered structures, which allows you to get updated results of the calculation taking into account the transverse normal stresses of compression layers depending on elasticity theory for assessing the strength of construction materials.

Research Methods - Payment theoretical.

To calculate the pavement, peeling of the plate spans and, if necessary, directly plate, separated from the clothes, running distribution calculated bending moment at the time, which directly perceives pavement and the time that is perceived design plate in proportion to their respective stiff nesses. The corresponding load distribution along the thickness of pavement layers is taken into account in determining the additional stresses of transverse compression - taking into account the influence of transverse normal stresses to clarify the stress state of pavement. Plate spans considered in the overall package with layers of pavement as a single sandwich.

**KEY WORDS:** PAVEMENT, LAYERED SYSTEM TENSION.

#### РЕФЕРАТ

Пискунов В.Г., Цыбульский В.М. Расчет слоистых конструкций дорожной одежды мостов армированного композитными материалами. / Вадим Георгиевич Пискунов, Виталий Николаевич Цыбульский // Вестник НТУ. - К.: НТУ - 2012. - Вып.26.

Представлена методика расчета дорожной одежды мостов из армобетонных конструктивных элементов, которая основана на модели слоистых систем.

Объект исследования - конструкция дорожной одежды и плита проезжей части, армированная с применением арматуры из композитных материалов.

Цель работы - усовершенствовать методику расчета слоистых конструкций, что позволяет получать уточненные результаты расчета с учетом поперечных нормальных напряжений от обжатия слоев и зависимости теории упругости для оценки прочности материалов конструкции.

Методы исследований - расчетно-теоретические.

Для расчета дорожной одежды, отслоенного от плиты пролетного строения, а также, при необходимости, непосредственно плиты, отделенной от одежды, выполняется распределение расчетного изгибающего момента на момент, непосредственно воспринимает дорожную одежду и момент, воспринимаемый конструкции плиты пропорционально их соответствующих жесткостей. Соответствующее распределение нагрузки по толщине дорожной одежды учитывается послойно при определении дополнительных напряжений от поперечного обжатия - учет влияния поперечных нормальных напряжений для уточнения напряженного состояния дорожной одежды. Плита пролетного строения рассматривается в общем пакете со слоями дорожной одежды как единственная слоистая конструкция.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** ДОРОЖНАЯ ОДЕЖДА, СЛОИСТЫЕ СИСТЕМЫ, НАПРЯЖЕНИЯ.