УДК 539.4

© В. Д. Харлаб, д-р техн. наук, профессор
(Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет)
E-mail: vdx33@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2019-16-5-113-118

© V. D. Kharlab, Dr. Sci. Tech., Professor
(Saint Petersburg State University of Architecture
and Civil Engineering)
E-mail: vdx33@mail.ru

О РАБОТЕ АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ПОКРЫТИЯ, УЛОЖЕННОГО ПО МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПЛИТЕ ПРОЛЕТНОГО СТРОЕНИЯ МОСТА

CONCERNING THE OPERATION OF THE BITUMEN CONCRETE LAYER COVERING PLACED ON THE METAL SLAB OF BRIDGE SUPERSTRUCTURE

Работа содержит результаты теоретических исследований автора, посвященных изучению особенностей работы асфальтобетонного слоя (покрытия), уложенного по металлической плите пролетного строения моста. Предлагаются два варианта объяснения механизма образования «гребенки». При этом используются простые модели. Проанализировано влияние толщины покрытия, температурных условий и шага между поперечными стопорами.

Ключевые слова: асфальтобетонное покрытие, металлическая основа, «гребенка».

The article presents the results of theoretical research carried out by the author which was devoted to studying the operation of bitumen concrete layer placed on the metal slab of the bridge superstructure. There are offered two variants explaining the mechanism of forming a comb like surface. Therewith, simple models are used. The following issues are analyzed: the effect of the covering thickness, temperature conditions and the distance between cross-section stoppers.

Keywords: bitumen concrete layer covering, metal slab, «comb».

Наблюдения выявили следующие важнейшие факты: эксплуатация покрытия приводит к нарушению его сцепления с металлической плитой основания и к образованию «гребенки» по всей длине моста, причем шаг «гребенки» равен шагу поперечных стопорных стержней, приваренных к металлической плите с целью предотвращения продольного смещения покрытия (рис. 1). Последнее обстоятельство указывает на то, что причиной возникновения «гребенки» служит именно наличие стопорных стержней.

В работе в предположении, что сцепление покрытия с основанием уже нарушено по тем или иным причинам, предпринята попытка выявления возможных механизмов образования «гребенки». Исследование проведено с привлечением простых наглядных моделей. Результаты призваны высветить роль стопорных стержней, оценить влияние шага стопоров, температурных условий.

1. Первая модель образования «гребенки» (продольный изгиб упругого покрытия)

Если сцепление покрытия с основанием уже нарушено, то в достаточно хорошем приближении можно считать металлическую плиту основания абсолютно гладкой (сдвигу покрытия относительно основания препятствуют только стопорные арматурные стержни). Образование «гребенки» естественно связать с действием горизонтальной тормозной нагрузки. В рассматриваемых условиях плотного потока транспорта все асфальтобетонное покрытие можно разбить на продольные полосы и трактовать отдельную такую полосу, приходящуюся по ширине моста на одно колесо автомобиля, как упругую балку на абсолютно гладком и абсолютно жестком основании.

Пусть $2T$ — тормозная сила, передающаяся со стороны колеса автомобиля на асфальтобетонное покрытие. Предполагается, что одна половина этой нагрузки воспринимается частью покрытия, расположенной впереди колеса, а вторая половина — задней частью покрытия. Под коле-

Рис. 1

сом имеет место защемление покрытия, стопоры следует считать шарнирными опорами.

Указанные соображения приводят к модели, изображенной на рис. 2. Главное свойство этой модели — способность к продольному изгибу, сопровождаемому малой подвижкой на величину Δ опоры балки, расположенной под колесом автомобиля (напрашивается аналогия с образованием складки на продольно сжимаемой ковровой дорожке). Возникший «горб» покрытия далее проталкивается вперед вертикальным давлением колеса. Одному такому событию отвечает надвигка на стопорную опору материала, количество которого характеризуется величиной параметра Δ .

Для того чтобы указанное событие могло осуществиться, необходимо одновременное соблюдение двух важнейших условий, а именно: тормозная сила T должна быть достаточно большой, а модуль упругости асфальтобетона E — достаточно малым (что предполагает достаточно высокую температуру). Совокупность большого количества Δ -подвижек материала, накопленная за длительный период времени на всей площади моста, должна проявляться в виде «гребенки». Если требуемые значения модуля E и силы T лежат в реальных пределах, то обсуждаемый меха-

Рис. 2

низм образования «гребенки» следует признать возможным. По величине параметра Δ можно судить о сравнительной длительности процесса образования «гребенки» в зависимости от температуры, расстояния между стопорами, толщины покрытия.

Продольный изгиб балки, изображенной на рис. 2, описывается дифференциальным уравнением

$$EJy''(x) = Rx - T\frac{h}{2} - Ty(x) - q\frac{x^2}{2}, \quad (1.1)$$

или

$$y''(x) + \alpha^2 y(x) = -\alpha^2 \frac{h}{2} + \alpha^2 \frac{R}{T}x - \alpha^2 \frac{q}{T} \frac{x^2}{2}, \quad (1.2)$$

где J — момент инерции поперечного сечения балки; q — погонный собственный вес балки;

$$\alpha^2 = \frac{T}{EJ}. \quad (1.3)$$

Уравнение (1.2) имеет следующее общее решение:

$$y(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 \cos(\alpha x) - \frac{h}{2} - \frac{q}{\alpha^2 T} + \frac{R}{T}x + \frac{q}{T} \frac{x^2}{2}. \quad (1.4)$$

Подчинив общее решение (1.4) граничным условиям

$$y(0) = 0, \quad y(l) = 0, \quad y'(l) = 0, \quad (1.5)$$

получаем окончательно

$$y(x) = C_1 \sin(\alpha x) + C_2 [\cos(\alpha x) - 1] + \beta x + \gamma x^2, \quad (1.6)$$

где

$$\begin{aligned} C_2 &= \frac{h}{2} + \frac{q}{\alpha^2 T}, \quad \gamma = \frac{q}{2T}, \\ C_1 &= \frac{C_2 [\alpha l \sin(\alpha l) + \cos(\alpha l) - 1] - \gamma l^2}{\alpha l \cos(\alpha l) - \sin(\alpha l)}, \\ \beta &= \frac{R}{T} = \alpha [C_2 \sin(\alpha l) - C_1 \cos(\alpha l)] - 2\gamma l. \end{aligned} \quad (1.7)$$

Величина горизонтального смещения Δ определяется изгибом балки и выражается известной формулой

$$\Delta = \frac{1}{2} \int_0^l [y'(x)]^2 dx. \quad (1.8)$$

Теперь можно перейти к численному анализу предлагаемой модели. Толщина рассматриваемого однослойного асфальтобетонного покрытия составляет $h = 5$ см. Ширину полосы покрытия, приходящуюся на одно колесо, можно принять равной $b \cong 100$ см. Тогда момент инерции поперечного сечения балки-модели $J = bh^3/12 \cong 1042 \cong 1000$ см⁴. Вертикальная сила давления на покрытие от колеса тяжелого транспортного

средства имеет порядок $F = 50$ кН. Поскольку коэффициент трения покоя автомобильной шины относительно асфальта $\mu_0 \cong 0,55$, то возможно появление тормозной силы $2T = \mu_0 N = 27,5$ кН, откуда «активная» часть тормозной силы, вызывающая предполагаемый продольный изгиб покрытия, $T \cong 14$ кН. Один погонный сантиметр полосы асфальтобетонного покрытия метровой ширины при высоте 5 см имеет объем 500 см^3 и весит, следовательно, несколько больше одного килограмма. Таким образом, $q \cong -0,01$ кН/см (знак «минус» здесь обусловлен тем, что ось y на рис. 2 направлена вверх). Модуль упругости асфальтобетона меняется в широких пределах в зависимости от температуры. Если ориентироваться на неблагоприятную температуру $\Theta = 40^\circ \text{C}$, то можно принять $E \cong 500$ МПа. Наконец, максимальная длина балки равна расстоянию между стопорными стержнями, т. е. $l = 50$ см. Приведенным ориентировочным значениям параметров отвечает картина, показанная на рис. 3.

Согласно данной картине, максимальный выгиб покрытия составляет 0,6 мм, а горизонтальная подвижка $\Delta = 2,26 \cdot 10^{-4}$ см. Именно малость этих величин позволяет признать картину реальной.

Кроме рассмотренного изгиба покрытия, тормозная нагрузка вызывает в нем продольное сжатие (перед колесом) и растяжение (позади колеса) с напряжением

$$\sigma = \frac{T}{A} = \frac{T}{bh}, \quad (1.9)$$

Рис. 3

которому соответствуют относительная и абсолютная деформации

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E}, \quad \delta = \varepsilon l. \quad (1.10)$$

При вышеуказанных исходных данных

$$\sigma = 0,28 \text{ МПа}; \quad \varepsilon = 5,6 \cdot 10^{-4}; \quad \delta = 2,8 \cdot 10^{-2} \text{ см}.$$

Сопоставление величин $\Delta = 2,26 \cdot 10^{-4}$ см и $\delta = 2,8 \cdot 10^{-2}$ см ставит, на первый взгляд, под сомнение роль продольного изгиба покрытия в образовании «гребенки». Однако упругая (судя по напряжению σ) деформация δ исчезает с уходом колеса на следующий отрезок пути l , а следовательно, она не дает вклада в образование «гребенки». Иначе обстоит дело с волной выгиба покрытия. Как уже было отмечено, эта волна проталкивается вперед давлением колеса. Описание данного процесса (в пределах упругости) можно получить с помощью тех же формул (1.3)–(1.10): задавая новые значения пролета l , надо подбирать значение силы T так, чтобы смещение Δ оставалось неизменным. Получающаяся при этом сила T представляет собой возрастающую по мере проталкивания волны продольную силу в покрытии, равную силе давления на расположенный впереди стопор. Установленная таким образом картина показана на рис. 4 и дополняется табл. 1.

Как видим, с уменьшением расстояния a продольная сила в слое быстро возрастает, что должно в конечном итоге приводить к пластической надвижке порции материала на стопор. Каждая такая порция мала, но за достаточно большой отрезок времени может быть достигнут значительный суммарный эффект.

Следует обратить внимание на одно обстоятельство, которое, на первый взгляд, кажется противоречием: при описании продольного изгиба покрытия мы постулировали абсолютную гладкость плиты основания; затем, рассматривая процесс проталкивания волны изгиба, мы, напротив, предположили, что между покрытием и основанием, под колесом, имеет место достаточное для воспрепятствования распрямлению покрытия трение. В действительности здесь противоречия нет, так как продольному изгибу покрытия перед колесом сопутствует отрыв его от основания, т. е. значительное ослабление трения (если не полное его исчезновение).

Рис. 4

Таблица 1

Средние напряжения в асфальтовом слое и на контакте со стопором при постоянном горизонтальном смещении $\Delta = 2,26 \cdot 10^{-4}$ см

a , см	N , кН	σ , МПа	σ^* , МПа
50	14,00	0,28	1,17
40	18,70	0,37	1,54
30	28,15	0,56	2,33
20	51,40	1,03	4,29
10	145,40	2,91	12,12

Здесь a — расстояние от колеса до стопора; N — продольная сила в рассматриваемой полосе покрытия; σ — среднее по толщине напряжение в слое; $\sigma^* = \sigma h/d$ — местное (среднее) напряжение на контакте со стопором диаметром $d = 1,2$ см.

Заметим еще, в продолжение только что сказанного, что предлагаемая модель продольного изгиба покрытия помогает понять нарушение сцепления покрытия с плитой основания, снабженной поперечными стопорами. Действительно, тормозная нагрузка при наличии упомянутых стопоров порождает стремление покрытия к выгибу, чему соответствует появление растягивающих напряжений на контакте покрытия с основанием.

Вышеизложенная теория позволяет количественно проанализировать влияние некоторых факторов. Пусть при тех же прочих исходных данных расстояние между стопорами l теперь составляет не 50, а 25 см. Тогда $\Delta = 3,1 \cdot 10^{-5}$ см, что в восемь с лишним раз меньше прежней величины. Соответственно, если наша модель отражает действительность, теперь на образование «гребенки» потребуется гораздо больше времени.

О влиянии температуры Θ можно судить по данным, содержащимся на рис. 5 и в табл. 2.

Представляет интерес также влияние толщины покрытия h . Это влияние отражено на рис. 6. Как видно, увеличение толщины покрытия от 5 до 7 см весьма существенно снижает способность покрытия к образованию «гребенки» по механизму продольного изгиба.

Подытоживая содержание настоящего раздела работы, представляется возможным сделать следующие выводы:

1. Количественные результаты теории выглядят правдоподобными.

2. Предложенная модель продольного изгиба покрытия указывает на причины нарушения сцепления покрытия с плитой основания и описывает процесс образования «гребенки».

3. Теория позволяет оценить влияние на длительность процесса образования «гребенки» таких факторов, как температура, толщина покрытия, расстояние между стопорными арматурными стержнями.

2. Вторая модель образования «гребенки» (продольное вязкое течение материала)

Асфальтобетон обладает свойствами упругости, ползучести и пластичности. Два первых свойства проявляются при любом уровне напряженного состояния материала. Для проявления пластичности требуется, чтобы уровень напряженного состояния превышал некоторый предел. Если температура асфальтобетона тако-

Рис. 5

Таблица 2

**Величина смещения при разных
температурах асфальта**

Общие	Q, °C	E, МПа	$y_{\max}$, см	Δ , см
$h = 5$ см $l = 50$ см $T = 14$ кН	50	400	0,076	$3,60 \cdot 10^{-4}$
	40	500	0,061	$2,26 \cdot 10^{-4}$
	30	900	0,034	$6,78 \cdot 10^{-4}$
	20	1800	0,017	$1,66 \cdot 10^{-4}$
	10	3200	0,010	$5,23 \cdot 10^{-4}$

Рис. 6

ва, что его структура на молекулярном уровне остается ненарушенной, то его ползучесть носит ограниченный и в основном обратимый характер. С повышением температуры ползучесть асфальтобетона все в большей степени приобретает черты ньютоновского вязкого течения (скорость деформации прямо пропорциональна напряжению).

Асфальтобетонное покрытие, кроме вертикальной, испытывает также горизонтальную нагрузку со стороны потока транспорта (заметим, что речь идет об отрезке дороги, не имеющем существенного уклона). Упомянутая горизонтальная нагрузка складывается, прежде всего, из малых постоянных сил, направленных на преодоление трения качения:

$$T_1 = \mu_F F, \quad (2.1)$$

где F — сила нормального давления; μ_F — так называемый коэффициент сопротивления движению. Согласно справочной литературе, $\mu_F = 0,015$ для легкового автомобиля на асфальте и $\mu_F = 0,025$ для грузового автомобиля на асфальте. К постоянной нагрузке T_1 время от времени добавляется гораздо большая тормозная нагрузка T_2 , которая рассматривалась в предыдущем разделе работы.

Учитывая еще наличие поперечных стопоров, препятствующих продольным перемещениям покрытия, приходим к модели, показанной на рис. 7, где v — скорость движения силы T . Предполагается, что материал модели в условиях рассматриваемой температуры обладает свойством ньютоновского вязкого течения (другие свойства не принимаются во внимание).

Внешняя нагрузка T распределяется между участками 1 и 2 соответственно их жесткостям, т. е.

$$R_1 = \frac{l - \xi}{l} T, \quad R_2 = \frac{\xi}{l} T. \quad (2.2)$$

При этом первый участок (позади силы T) оказывается растянутым с напряжением σ_1 , а второй участок (перед силой T) — сжатым с напряжением σ_2 :

$$\sigma_1 = \frac{R_1}{A} = \frac{T}{bh} \left(1 - \frac{\xi}{l}\right), \quad \sigma_2 = -\frac{R_2}{A} = -\frac{T}{bh} \frac{\xi}{l}, \quad (2.3)$$

где A — площадь поперечного сечения стержня (полосы покрытия); b — ширина поперечного сечения.

Напряжения σ_1, σ_2 вызывают вязкое течение материала со скоростями, соответственно

$$\dot{\varepsilon}_1 = \frac{\sigma_1}{\lambda}, \quad \dot{\varepsilon}_2 = \frac{\sigma_2}{\lambda}, \quad (2.4)$$

где λ — коэффициент вязкости при растяжении-сжатии, связанный с коэффициентом вязкости при сдвиге η известным соотношением

$$\lambda = 3\eta. \quad (2.5)$$

Через скорости деформаций (2.4) нетрудно вычислить деформацию в произвольном сечении x , накопившуюся за время $t_l = l/v$ прохождения нагрузкой T расстояния l между стопорами. На отрезке времени от нуля (когда нагрузка появляется на участке l) до $t_x = x/v$ (когда сила T достигает сечения x) материал в сечении x находится в состоянии сжатия 2, а на отрезке времени от t_x до t_l — в состоянии растяжения 1. Таким образом,

$$\begin{aligned} \varepsilon(x, t_l) &= \int_0^{t_x} \dot{\varepsilon}_2(t) dt + \int_{t_x}^{t_l} \dot{\varepsilon}_1(t) dt = \\ &= \int_0^{t_x} \frac{\sigma_2(t)}{\lambda} dt + \int_{t_x}^{t_l} \frac{\sigma_1(t)}{\lambda} dt = \\ &= \frac{T}{bh\lambda} \left[\int_0^{t_x} -\frac{vt}{l} dt + \int_{t_x}^{t_l} \left(1 - \frac{vt}{l}\right) dt \right] = \\ &= \int_{t_x}^{t_l} dt - \int_0^{t_l} \frac{vt}{l} dt = \frac{T}{bh\lambda} \frac{l}{v} \left(\frac{1}{2} - \frac{x}{l} \right). \end{aligned} \quad (2.6)$$

Рис. 7

Наибольшей по модулю величины деформация (2.6) достигает возле стопоров (на концах отрезка l):

$$\varepsilon_0 = \frac{T}{2bh\lambda} \frac{l}{v}, \quad \varepsilon_l = -\frac{T}{2bh\lambda} \frac{l}{v}. \quad (2.7)$$

В вопросе о «гребенке» покрытия нас интересует, однако, не относительная продольная, а абсолютная поперечная деформация, т. е. изменение толщины покрытия h . Согласно (2.7), за один проход нагрузки между стопорами толщина h на концах отрезка l изменяется на величину

$$\Delta h_0 = \pm \mu h \varepsilon = \pm \mu \frac{T}{2b\lambda} \frac{l}{v}, \quad (2.8)$$

где μ — коэффициент Пуассона асфальтобетона, отвечающий вязкому течению. Обратим внимание на то обстоятельство, что величина (2.8) не зависит от толщины покрытия.

Пусть L — среднее расстояние между колесами автомобилей по длине потока. Тогда период времени, разделяющий два последовательных прохождения колеса одного и того же участка l , будет

$$t_L = \frac{L}{v}. \quad (2.9)$$

За произвольный отрезок времени t количество рассматриваемых циклов составит

$$N(t) = \frac{t}{t_L} = \frac{tv}{L}, \quad (2.10)$$

следовательно, изменение толщины покрытия возле стопоров

$$\Delta h(t) = \pm N \Delta h_0 = \pm \mu \frac{T}{2b\lambda} \frac{l}{L} t. \quad (2.11)$$

Толщина переднего конца рассматриваемого участка увеличивается, а заднего конца — уменьшается на такую же величину.

Обратимся к количественному анализу полученного результата. Учитывая только постоянно действующее сопротивление движению, связанное с трением качения, и принимая вертикальную нагрузку на колесо в среднем для большого количества автомобилей равной 5 кН, получаем горизонтальную силу $T = 0,02 \cdot 5 = 0,1$ кН. Коэффициент Пуассона, соответствующий процессу вязкого течения асфальта, должен приближаться к 0,5. В оценочных расчетах можно принять эту цифру. Как и в предыдущем разделе, положим $b = 100$ см, $l = 50$ см. Не будет, очевидно, существенной ошибкой положить $L = 5$ м. Осталось задаться величиной коэффициента вязкости асфальтобетона. Согласно литературным данным, при температуре 50 °С сдвиговая вязкость песчаного асфальтобетона характеризуется числом $\eta = 6 \cdot 10^8$ Па·с, а следовательно, $\lambda = 3\eta = 18 \cdot 10^8$ Па·с. При таких исходных данных

$$\begin{aligned} \Delta h(t) &= \pm \mu \frac{T}{2b\lambda} \frac{l}{L} t = \\ &= \pm 0,5 \frac{100 \text{ Н}}{2 \cdot 1 \text{ м} \cdot 18 \cdot 10^8 \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} \cdot \text{с}} \frac{0,5 \text{ м}}{5 \text{ м}} t = \\ &= \pm 3 \cdot 10^{-3} \frac{\text{см}}{\text{сут}} t, \end{aligned} \quad (2.12)$$

где принято, что указанные условия сохраняются в течение четверти суток.

Вклад в образование «гребенки», описываемый формулой (2.12), представляется весьма весомым. Главное при этом то, что становится более понятной форма поверхности покрытия, показанная на рис. 1.