

НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ДОРОЖНОЙ ОДЕЖДЫ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ АРМИРУЮЩЕЙ СЕТКИ

А.Д.Каюмов¹

¹ докт. техн. наук, проф, Ташкентский государственный технический университет (Ташкент, Республика Узбекистан)

Ш.Х.Бакиров¹

¹ Магистрант, Ташкентский государственный транспортный университет (Ташкент, Республика Узбекистан)

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

АННОТАЦИЯ:

ИСТОРИЯ СТАТЬИ:

Received: 16.02.2025

Revised: 17.02.2025

Accepted: 18.02.2025

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

донорные материалы, дорожные покрытия, армирующие сетки, слои покрытия, щебень, виброкаток, теория прочности, основание, дорожная конструкция, грунт, месдоза.

В данной статье исследуются механические свойства покрытия на неармированных дорожных покрытиях с использованием геосинтетических сеток для армирования, под воздействием динамических и статических нагрузок транспортных средств, моделируемых в лабораторных условиях. Рассматривается степень прочности покрытия на неармированных дорожных покрытиях, а также изменения механических свойств этих покрытий по сравнению с механическими свойствами покрытия, не армированного сетками. Проведенные испытания и лабораторные работы были выполнены в соответствии с нормами и стандартами, изложенными в соответствующих нормативных документах. Для армирования использовались геосинтетические материалы. В настоящее время использование геосинтетических материалов при строительстве и эксплуатации автомобильных дорог является актуальной задачей.

ВВЕДЕНИЕ. В настоящее время не достаточно изучена работа слабосвязных зернистых материалов в слоях дорожных одежд и поэтому пока это не позволяет разработать метод расчета, полно учитывающий особенности поведения этих материалов. Эти особенности связаны с дискретностью структуры зернистых материалов и проявляются в изменении прочностных характеристик этих материалов в зависимости от их размещения в слоистой конструкции и в характере передачи этими материалами приложенного к ним давления на нижележащий грунт.

Зернистый материал в контактной зоне с подстилающим грунтом можно отнести к распорным системам, так как любые два зерна, опираются друг на друга и на подстилающий грунт способны создать на его поверхности касательные напряжения от вертикального давления. Вследствие этого, касательные напряжения в плоскости контакта системы «зернистый материал-подстилающий грунт» должны быть выше, чем касательные напряжения в плоскости контакта системы «сплошной материал-подстилающий грунт».

Используя известные решения теории упругости и контактных задач теории упругости [1] покажем, что наличие касательных напряжений в плоскости контакта влияет на напряженное состояние нижележащего полупространства,

Анализ работ, связанных с исследованиями контактной прочности материала, показывает, что наличие наряду с вертикальной, дополнительной касательной нагрузки на поверхности контакта существенно влияет на напряженное состояние материала, снижая его прочность по сдвигу. Присутствие касательных нагрузок изменяет распределение напряжений в зоне контакта, увеличивая максимальные касательные напряжения и приближая их к поверхности [2]. В предельном случае сочетания внешних нормальных и касательных сил, максимальные касательные напряжения выходят на поверхность контакта, обуславливая поверхностный критерий разрушения.

Армирование зернистого материала в контактной зоне с подстилающим грунтом прослойками в виде сеток ограничивает передачу касательных напряжений $\tau(r)$ на грунт, так как при совместной работе сетки с дискретным материалом слоя, обеспечивается их зацепление, касательные напряжения частично воспринимаются сеткой.

Включение прослойки почти не влияет на величину и распределение этих напряжений, армирование мало влияет на упругий прогиб.

Влияние снижения $\tau_{a,\max}$ в результате армирования можно учесть в расчете дорожной одежды по сдвигу в подстилающем грунте, введя в выражение условия предельного равновесия при расчете армирования дорожной одежды коэффициент $K_{\text{эф}}^{\varphi}$ [1], понижающий расчетные сдвигающие напряжения:

$$\tau_{a,\max} / K_{\text{эф}}^{\varphi} + K_{\text{эф}}^{\varphi} K_{\text{эф}}^{\varphi} \tau_{\theta} \leq T_{\text{доп}} \quad (1)$$

где τ_{θ} и $T_{\text{доп}}$ - соответственно активное напряжение сдвига от веса или лежащих слоев и допустимого напряжению сдвига, МПа; $K_{\text{эф}}^{\varphi}$ - коэффициент эффективности армирования, определяемый как отношение $\tau_{a,\max}$ в конструкции без сетки $\tau_{a,\max}^*$ и конструкции с сеткой:

$$K_{\text{эф}}^{\varphi} = \frac{\tau_{a,\max}}{\tau_{a,\max}^*}$$

(2)

Максимальное активное сдвигающие напряжения в подстилающем грунте определяется через главные максимальные σ_1 и минимальные σ_3 напряжения по известной зависимости:

$$\tau_{a,\max} = \frac{1}{2 \cos \varphi} [(\sigma_1 - \sigma_3) - (\sigma_1 + \sigma_3) \sin \varphi] \quad (3)$$

Для армированной конструкции запишем:

$$\tau_{a,\max}^* = \frac{1}{2 \cos \varphi} [(\sigma_1^* - \sigma_3^*) - (\sigma_1^* + \sigma_3^*) \sin \varphi] \quad (4)$$

где φ - угол внутреннего трения грунта, град; *- индекс, соответствующий параметрам армированной дорожной одежды.

При $\varphi = 0$ выражения (3) и (4) преобразуется в выражение для определения максимальных сдвигающих напряжений $\tau_{\max}$ и $\tau_{\max}^*$, соответственно, в подстилающем грунте неармированной и армированной конструкций. В этом случае (2) можно записать:

$$K_{\text{эф}} = \frac{\tau_{\max}}{\tau_{\max}^*} \quad (5)$$

После некоторых преобразований с учетом соотношения $2 \tau_{\max} = \sigma_1 - \sigma_3$, получим:

$$K_{\varphi \text{ эф}} = \frac{\tau_{\max} - (\sigma_1 - \tau_{\max}) \sin \varphi}{\tau_{\max} - (\sigma_1^* - \tau_{\max}^*) \sin \varphi} \quad (6)$$

Разделив числитель и знаменатель на $\tau_{\max}$ и учитывая (6) и то, что $\sigma_1 \approx \sigma_1^*$ имеем:

$$K_{\varphi \text{ эф}} = \frac{K_{\text{эф}} - (\sigma_1^* / \tau_{\max}^* - K_{\text{эф}}) \sin \varphi}{1 - (\sigma_1^* / \tau_{\max}^* - 1) \sin \varphi} \quad (7)$$

При этом учтем, что $2 \tau_{\max}^* = \sigma_1^* - \sigma_3^*$, тогда выражение примет вид:

$$\sigma_1^* / \tau_{\max}^* = 2 + \sigma_3^* / \tau_{\max}^* \quad (8)$$

В подтверждение расчетного напряженного состояния в подстилающем грунте для двухслойных и трехслойных дорожных одежд с использованием решения А.Г. Буленко [2], для условий, рассматриваемых в работе, напряжение σ_3 данным расчетном сечении составляют не менее $0,15 \sigma_1$. Следовательно, отношение $\sigma_1^* / \tau_{\max}^*$ с точностью 5% достаточной для практических расчетов можно принять равным 2. При этом (7) будет иметь вид:

$$K_{\varphi \text{ эф}} = \frac{K_{\text{эф}} (1 + \sin \varphi) - 2 \sin \varphi}{1 - 2 \sin \varphi} \quad (9)$$

Как видно из (9) коэффициент эффективности армирования зависит от степени снижения $\tau_{\max}$ в подстилающем грунте конструкции при его армировании и угла внутреннего трения φ . Отсюда следует можно предположить, что степень снижения максимальных сдвигающих напряжений $\tau_{\max}$ в подстилающем грунте при прочих разных условиях прямо зависит от степени снижения касательных напряжений в плоскости контакта.

Исходная конструкция устраивалась на площадке с размерами в плане 350 x 250 см и включала два слоя: нижний слой толщиной 3 м из легкой супеси максимальной плотности $\rho_{\max} = 1,82 \text{ г/см}^3$ и оптимальной влажности $W_{\text{онм}} = 13 \%$, имеющий модуль упругости $E_{\text{сп}} = 57 \text{ МПа}$, и верхний слой – максимально уплотненный известковый щебень толщиной $h = 14 \text{ см}$, имеющий модуль упругости $E_{\text{с}} = 150 \text{ МПа}$.

Уплотнение грунта проводили послойно виброкаток массой 12 т и довели до плотности, соответствующей $K_{\gamma} = 0,98 - 1,0$. Модуль упругости грунта определяли штампом $D = 50 \text{ см}$ при удельном давлении $P = 0,1-0,15 \text{ МПа}$.

Слой щебня уплотняли виброкатком до максимальной плотности. Модуль упругости на поверхности щебеночного слоя определяли при загрузении штампом в процессе испытаний дорожной одежды. Толщину щебеночного слоя контролировали высокоточным нивелированием до и после устройства щебеночного слоя.

Для армирования исходной конструкции использовали базальтовую сетку типа №1 из с размерами ячеек 10x10 мм и металлическую сетку ВР-1 по ГОСТ 23279-2012, используемую в промышленности, с размерами ячеек 25x25 мм. Их упругие характеристики определяли при одноосном растяжении. Эффективный модуль упругости базальтовой сетки $E_c = 460$ МПа при толщине 0,9 мм, а эффективный модуль упругости металлической $E_c = 2200$ МПа при толщине 0,6 мм. На рис.1 показаны экспериментальные конструкции щебеночных оснований и схема расположения месдоз в подстилающем грунте конструкции.

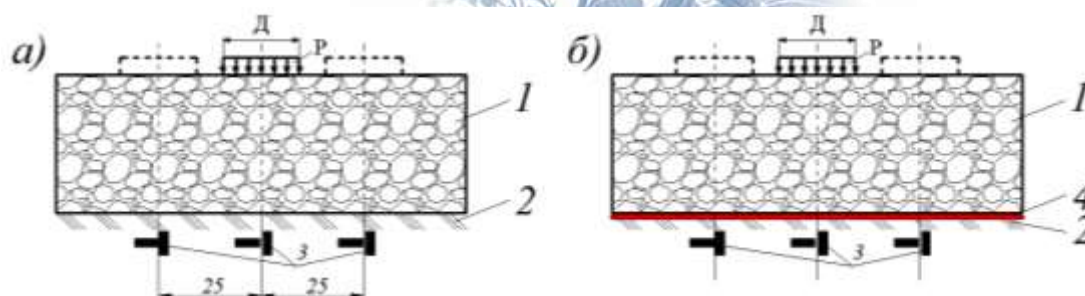


Рис.1. Экспериментальные конструкции щебеночных оснований и схема расположения месдоз:

а - без армирующей прослойки; б - с армирующей прослойкой; 1 - щебень толщиной 14 см; 2 - подстилающий грунт; 3 - месдозы; 4 - армирующая прослойка

Для испытания конструкций дорожных одежд с капитальным покрытием специально были построены опытные участки. Испытываемые конструкции устраивали на одном грунтовом массиве на двух смежных площадках с размерами в плане 350x250 см каждая.

Конструкция без армирующей сетки состояла из четырех слоев: нижнего слоя толщиной 3 м из легкой супеси, имеющего модуль упругости $E_{гр} = 100$ МПа, слоя гранитного щебня фракции 20-40 мм толщиной 16 см, нижнего и верхнего слоев покрытия из песчаного асфальтобетона толщиной соответственно 3 см и 5 см.

Для армирования конструкции использовали сетку из базальта №2 толщиной 1,4 мм с размерами ячеек 40х40 мм и модулем упругости на растяжение $E_c = 230$ МПа. Сетку укладывали между подстилающим грунтом и щебеночным основанием (рис. 2).

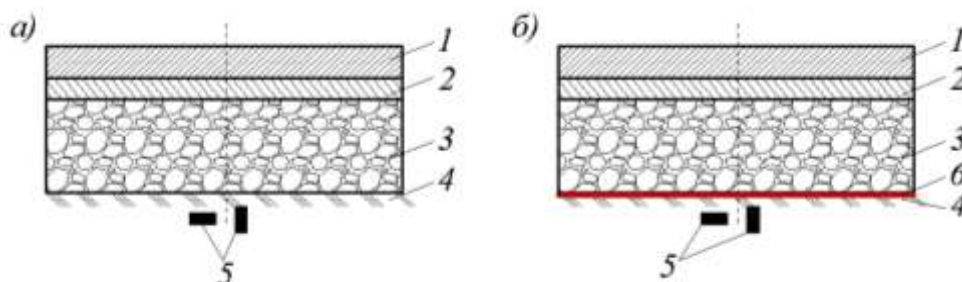


Рис.2. Экспериментальные конструкции с капитальным типом покрытия и схемы расположения мессдоз:

а - без армирующей прослойки; б - с армирующей прослойкой;

1 - асфальтобетон верхнего слоя $h_1=5$ см; 2 - асфальтобетон нижнего слоя $h_2=3$ см; 3 - гранитный щебень фракции 20 – 40 мм $h_3=16$ см; 4 - супесь лёгкая; 5 - мессдозы ; 6 - армирующая прослойка

Нижний слой из супеси и слой основания из гранитного щебня устраивали аналогично предыдущей конструкции с щебеночным основанием. Щебеночное основание расклинивали гранитными высевками фракции 5 - 10 мм с одновременным увлажнением водой из расхода 1 л/м^2 и уплотнением вибрационным катком массой 12 т. Слой покрытия устраивали в один день с перерывом в 3 часа из горячей песчаной асфальтобетонной смеси. Укладку и разравнивание асфальтобетонной смеси производили вручную. Контроль толщины устраиваемых слоев осуществляли в процессе строительства [4].

В процессе испытаний щебеночных оснований нагрузку на их поверхность передавали через жесткие круглые штампы диаметром 20, 34 и 50 см с помощью гидравлического домкрата, упираемого в задний мост автомобиля КАМАЗ. Нагрузку измеряли манометром. Испытания проводили в соответствии с общепринятой методикой штамповых испытаний, изложенной в «Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа» МКН 46-07 [5] при интенсивности нагрузки 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 МПа.

Для выравнивания покрытия в месте контакта со штампом использовали мелкий песок. Перед испытаниями конструкции предварительно обжимали давлением 0,25 МПа в течение 2 минут.

Вертикальные перемещение штампа измеряли индикатором часового типа с ценой деления 0,01 мм, устанавливая его по центру штампа. В качестве репера для индикаторов использовали балку, опоры которой располагались за пределами экспериментальной конструкции.

Отсчеты по индикатору снимали при каждом нагружении после 30-секундной выдержки конструкции под этой нагрузкой, и при разгрузке после 30-секундного восстановления деформации. По разности отсчетов определяли упругую осадку конструкции под штампом. На рис. 2 представлены зависимости упругих прогибов поверхности от давления под штампом для армированной и неармированной конструкции. Анализ этих закономерностей свидетельствует о том, что обе конструкции в заданных пределах нагружения работали в упругой стадии, а взаимосвязь, «прогиб-нагрузка» была линейной.

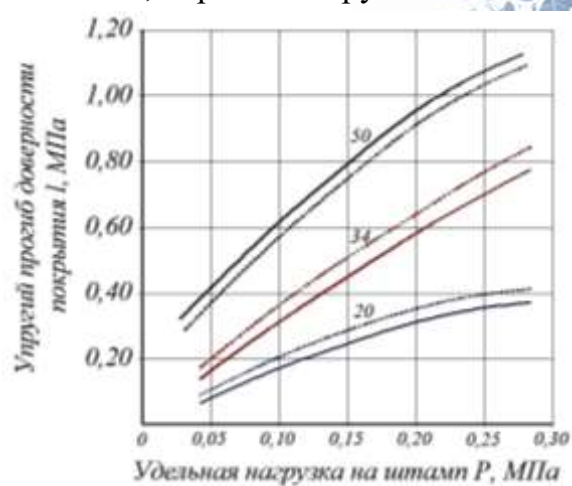


Рис.3. Зависимость между удельным давлением на штамп и его упругой осадкой (цифры на кривых - диаметр штампа):

..... - для неармированной конструкции

_____ - для армированной конструкции

Напряжения в подстилающем грунте измеряли месдозами конструкции ЦНИИСК [6], устанавливая их горизонтально для определения наибольших главных напряжений σ_1 , и вертикально для определения наименьших главных напряжений σ_3 . В качестве регистрируемого прибора использовали многоканальный самописец типа НЗ27-6 для записи показаний с ИДМ-0 и измеритель деформации цифровой (ИДЦ-1) для записи показаний с месдоз. Выходной сигнал с последних мер до записью предварительно усиливали с помощью восьмиканального усилителя 8АНЧ-7М.

Перед установкой в грунт месдозы градуировали в воздушной среде. Зависимость выходного сигнала от давления в интервале нагрузок 0,05-0,25 МПа для всех используемых месдоз была линейной. Для получения действительных напряжений в грунте использовали переходные коэффициенты, полученные при градуировке месдозы каждого вида в грунтовой массе.

Перед устройством испытываемых конструкций с грунтовой площадки отбирали 10 проб грунта с ненарушенной структурой для определения его прочностных характеристик: удельного сцепления C и угла внутреннего трения φ . Образцы испытывали на сдвиговом приборе, срезая их по двум плоскостям при величинах вертикальной нагрузки 0,05; 0,10 и 0,15 МПа. Нормативные значения C_n и φ_n определяли, обрабатывая результаты испытаний вычислением по методу наименьших квадратов прямолинейной зависимости [7]. Полученные при этом прочностные характеристики грунта имели значения $C_n=0,022$ МПа и $\varphi_n=37,5^\circ$.

Эффективность армирования дорожных одежд прослойками в виде сеток оценивали в экспериментах по пяти показателям: упругому прогибу на поверхности конструкций, главным напряжениями σ_1 и σ_3 в подстилающем грунте и вычисленным по ним максимальным сдвигающим τ_{max} и максимальным активным сдвигающим $\tau_{a,max}$ напряжениям. Учитывая, что измеренные значения σ_1 и σ_3 и тем более вычисленные по ним τ_{max} и $\tau_{a,max}$ могли иметь погрешность, при анализе эффекта армирования. Оценку на достоверность производили при 95-процентной доверительной вероятности.

Результаты экспериментальных исследований обобщены и сопоставлены. Сопоставление напряженного состояния выявило для армированных конструкций некоторое уменьшение σ_1 (на 5-15%), увеличение σ_3 и снижению τ_{max} и $\tau_{a,max}$ (табл.1).

Таблица 1

Степень влияния армирующей сетки на напряженное состояние в подстилающем грунте конструкции

Экспериментальная конструкция	Увеличение σ_3 и снижение τ в % при отношении H/R				
	0,50	0,80	1,30	1,40	2,40
Щебеночное основание, армированное сеткой ВР-1	15/42	26/46	39/37	-	-

Щебеночное армированное сеткой тип №1	основание, базальтовой	13/13(60)	37/34(61)	33/17(33)	-	-
Нежесткая одежда с основанием, сеткой тип №2	дорожная щебеночным базальтовой	-	-	-	55/19(42)	30/10(22)

Примечания. 1. В табл. 1 Н и R соответственно толщина слоя над сеткой и радиус штампа.

2. В числителе дано увеличение σ_3 в знаменателе снижение $\tau_{\max}$ и $\tau_{a,\max}$ (в скобках) в % по сравнению с неармированной конструкцией.

Анализ таблицы показывает следующие:

1. Эффект армирования существенно зависит от деформативных свойств применяемых сеток. С увеличением модуля упругости сеток при растяжении эффект армирования возрастает (см. данные в знаменателе табл. 1).

2. Эффект армирования зависит от структуры применяемых сеток. При увеличении ячеек сетку до размеров, превышающих минимальную крупность зерен материала основания, эффективность работы сетки снижается, поскольку в этом случае плохо обеспечивается совместность их работы. Из табл. 1 видно, что для металлической сетки размеры ячеек 25x25 мм эффект от σ_3 меньше, чем при базальтовой типа №1 размерах ячеек 10 x 10 мм несмотря на то, что модуль упругости первой значительно выше.

Результаты экспериментальных исследований подтвердили теоретические положения в отношении механизма влияния армирующей сетки в контактной зоне зернистого материала с подстилающим грунтом на напряженное состояние грунта. Влияние армирующей сетки главным образом проявляется в увеличении главных горизонтальных напряжений σ_3 и снижении максимальных сдвигающих $\tau_{\max}$ и максимальных активных сдвигающих напряжений $\tau_{a,\max}$ в подстилающем грунте конструкции (табл. 1). Результаты экспериментов говорят о том, что эффективность армирования нежестких дорожных конструкций с зернистыми основаниями следует оценивать прежде всего с точки зрения сдвигоустойчивости грунтов под армирующими сетками. Для количественной оценки эффекта армирования определяли коэффициенты эффективности армирования по формуле (5) и (8). Анализ

полученных коэффициентов показывает, что величина $K_{эф}^{\varphi}$ в зависимости от параметров дорожной одежды, параметров сетки и параметров нагрузки принимает значения от 1.4 до 2.6 в исследованном диапазоне этих параметров.

Литература:

1. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. Теория Упругости / Перевод с английского М.И.Рейтмана: Под редакцией Г.С. Шапиро. –М.: Наука. 1975. -576 с.
2. Седов В.И. Метод испытания материалов при трехмерном нестационарном напряженном состоянии применительно к условиям контактного нагружения. -В кн. Контактные задачи и их приложения (доклады конференции). -М.: НИИРМАШ. 1969. с.327-339.
3. Пинягин С.В. Контактная прочность в массивах. -М.: Машиностроение. 1965. - 328 с.
4. ИКН 68-11 Инструкция по применению георешеточных материалов при строительстве автомобильных дорог. ГАК «Узавтойул»Ташкент, 2012, -55 с.
5. МКН 46-2008 Инструкция по проектированию дорожных одежд нежёсткого типа. ГАК «Узавтойул»Ташкент, 2007, -132 с.
6. Руководство по применению прямого метода измерения давлений в сыпучих средах и грунтах /ЦНИИСК им. Кучеренко. - М.: 1965. -93 с.
7. ГОСТ 20523-96. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний. - М.: Издательство стандартов. 1997. -20 с.