

А.В. Гладкий, В.Н. Ряпухин

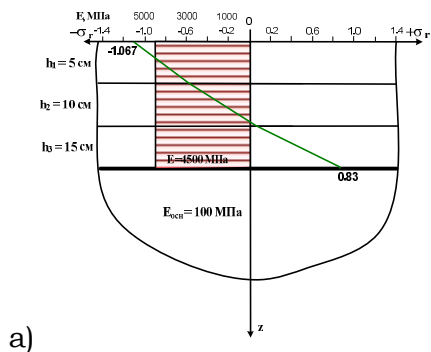
ОСОБЕННОСТИ РАСЧЁТА НА ПРОЧНОСТЬ МНОГОСЛОЙНЫХ ПОКРЫТИЙ И УСИЛЕНИЯ НЕЖЁСТКИХ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Основные положения расчёта нежёстких дорожных одежд на прочность были разработаны около 30 лет тому назад. Фундаментальные решения теории упругости двух и трёхслойных систем в соответствии с имеющимся на то время математическим аппаратом и возможностями расчётов были упрощены и аппроксимированы для решения практических задач.

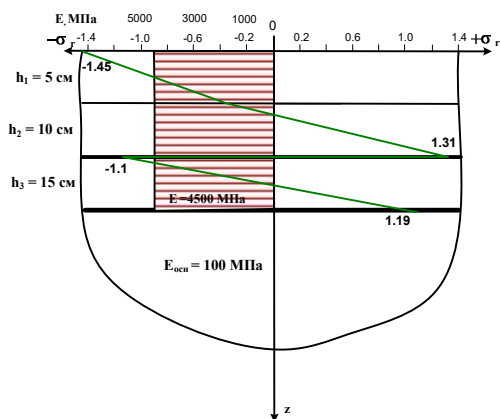
В практических расчётах покрытие, состоящее из нескольких слоёв, принимается как монолитная плита (слой) с усреднёнными параметрами упругости. Такой подход с одной стороны упрощает схему расчёта, а с другой дает возможность максимально использовать положительные свойства сплошных слоистых систем. В практике строительства, и особенно эксплуатации дорожных одежд, не всегда удаётся обеспечить надёжное омоноличивание слоёв покрытия и их совместную работу на контакте.

В этом случае покрытие может представлять собой многослойную систему со свободным смещением слоёв на контактах, расчётная схема для которой отличается от принятой нормативной.

Опасность расслоения покрытия заключается, прежде всего, в том, что каждый слой работает на сжатие-растяжение. При этом величины радиальных растягивающих напряжений возрастают по сравнению с расчётными, что приводит к появлению микротрещин и их дальнейшему развитию (рис.1).



a)



б)

Рисунок 1 - Эпюры радиальных напряжений по глубине конструкции (а - спаянные слои, б - свободный контакт)

Существует несколько объективных причин, по которым происходит расслоение покрытия.

Следует прежде всего учитывать, что покрытия дорожных одежд работают в сложных нестандартных температурных и напряжённо-деформативных состояниях.

На трещиностойкость монолитные покрытия проверяются при температурах 0°C , в общем, когда материал достаточно прочен, но хрупок. Все параметры

упругости асфальтобетона в этот период имеют практически наибольшие значения, в том числе и сцепление слоём между собой. Поэтому разрывы (расслоения) покрытия не будет.

В летний период при некотором повышении прочности основания, покрытия «разогреваются» при этом снижаются деформативные и прочностные характеристики асфальтобетонов. [1], [2]. В то же время напряжённое состояние покрытия уменьшается незначительно.

В этих условиях при снижении параметров прочности асфальтобетона, и прежде всего снижении сдвигоустойчивости, вполне реальным становится разрыв на контакте слоёв, что провоцирует дальнейшее развитие трещины.

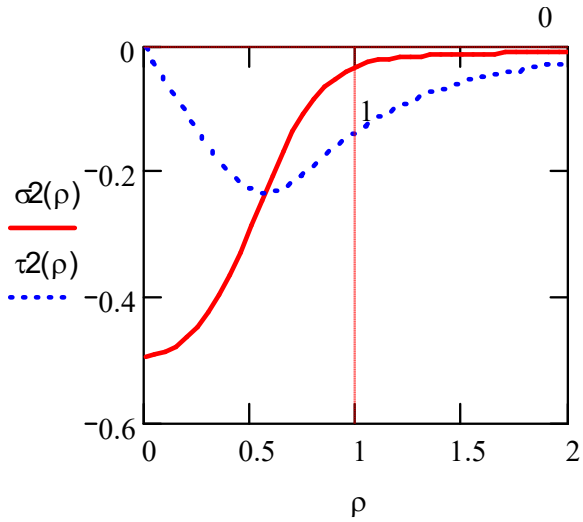
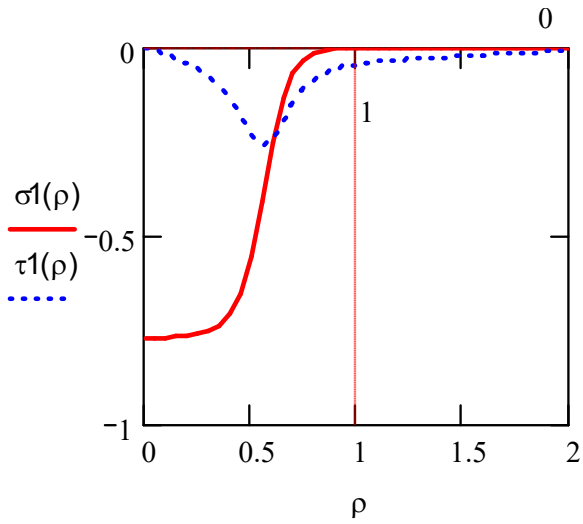
Толстослойные или многослойные покрытия устраиваются из отдельных слоёв, часто из асфальтобетонов разных типов и марок. Верхний слой должен, как бы, «привариться» к нижнему, для чего могут делать подгрунтовку по нижнему слою.

В обязательном порядке подгрунтовка делается при усилении существующих асфальтобетонных покрытиях.

В результате таких технологических операций на контакте слоёв образуется тонкий пограничный слой, содержание битума в котором больше чем в основном массиве асфальтобетона. Прочностные характеристики, в том числе сдвигоустойчивость асфальтобетона, в этом случае снизится. [1], [2], [3].

На кафедре проектирования дорог ХНАДУ авторами получены решения, позволяющие определить величину горизонтальных сдвигающих напряжений на контакте слоёв.

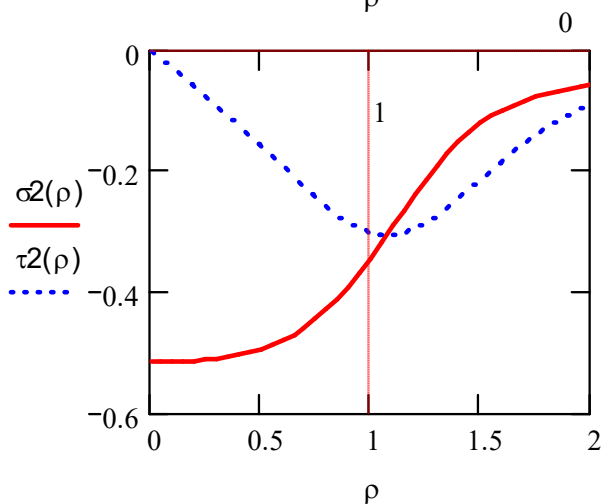
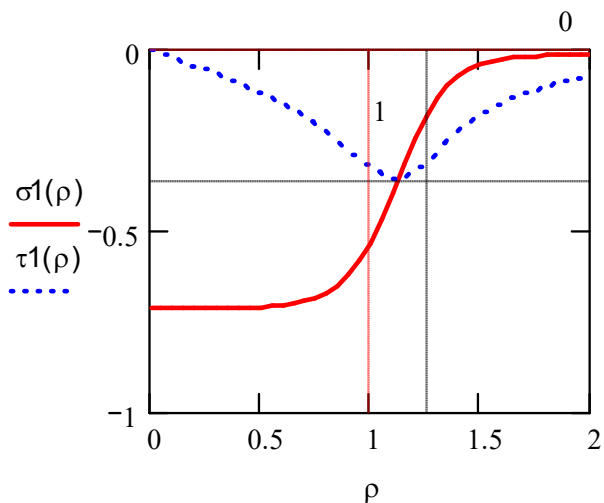
Рассматривается трёхслойная система на упругом полупространстве с омоноличенными тремя слоями. На контакте слоёв определяются вертикальные (давления) и сдвигающие напряжения (рис.2, рис.3)



$z=5 \text{ см,}$

$\tau=0,25 \text{ МПа } z=15 \text{ см, } \tau=0,23 \text{ МПа}$

Рисунок 2 - Сдвигающие напряжения в слоистом покрытии.
 Спаянные слои. ($E_1=450 \text{ МПа } E_2=650 \text{ МПа } E_3=800 \text{ МПа}$
 $E_4=100 \text{ МПа } H_{\text{покр}}=30 \text{ см}$)



$z=$

5 см, $\tau=0,35$ МПа

$z=10$ см, $\tau=0,30$ МПа

Рисунок 3 - Сдвигающие напряжения в слоистом покрытии.
 Отрыв нижнего слоя $h=15$ см ($E_1=450$ МПа $E_2=650$ МПа
 $E_3=650$ МПа $E_4=125$ МПа $H_{\text{покр}}=15+15$ см)

Используя имеющиеся решения для суточных и суточно-годовых температурных циклов асфальтобетонных покрытий [4] было смоделировано

суточно-годовое поле температур и выбраны некоторые характерные условия:

- период ослабления основания и наибольшей хрупкости материала, период с расчётной температурой асфальтобетона на растяжение при изгибе (0°C);

- температура асфальтобетона, характерная для дорожно-климатической зоны УШ по сдвигоустойчивости;

- максимальная, расчётная по данным метеостанций, температура асфальтобетонного покрытия в летний период.

Для выбранных температурных условий были определены по нормативам и литературным данным [1], [2], [3] параметры упругости и прочностные характеристики асфальтобетонного покрытия: модуль упругости; коэффициент Пуассона; прочность на растяжение при изгибе и сдвигоустойчивость (таб.1).

Таблица 1 - Параметры упругости асфальтобетона при различных температурных режимах

h, см	9^{00}			13^{00}			23^{00}		
	t	E_s , МПа	ν	t	E_s , МПа	ν	t	E_s , МПа	ν
5	41	500	0.4	47	350	0.4	20	1800	0.33
	34	750	0.39	40	550	0.4	27	11500	0.37
10		750			550			11500	
	31	825	0.38	33	750	0.385	34	725	0.39
15		825			750			725	
	33	740	0.39	33	750	0.38	34	725	0.39

Допустимые напряжения:

$$\tau_{аб}30^0 R_{доп}=0,8\text{МПа} \quad \tau_{аб} 40^0 R_{доп}=0,7 \text{ МПа}$$

Эти параметры необходимы для того чтобы на основании полученных решений смоделировать напряжённое состояние слоистых систем при различных температурных режимах. (рис 3) Следует обратить внимание на весьма неблагоприятные для обеспечения надёжности дорожных одежд факт, что с ростом температуры покрытия существенно уменьшаются прочностные характеристики асфальтобетона. Но напряжения как вертикальные, так и сдвигающие горизонтальные на контактах слоёв если и уменьшаются, то очень незначительно (рис.1, рис.2, рис.3).

Вполне обосновано следует предполагать, что в определённый период прочность многослойных асфальтобетонных покрытий в зоне контактов слоёв будет недостаточно, произойдут микросдвиги с дальнейшим расслоением покрытия.

Анализ расчётных напряжений и сдвигоустойчивости на контактах многослойных покрытий свидетельствует о том, что при эксплуатационных температурах асфальтобетонов более 30-40 °С наступает критическое состояние на прочность. Уменьшающиеся параметры сдвигоустойчивости асфальтобетона в зоне контакта по сравнению с действующими напряжениями сдвига не обеспечивают необходимую прочность слоя. В отдельных случаях они даже меньше сдвигающих напряжений (таб.2).

Таблица 2 - Горизонтальные сдвигающие напряжения на контактах слоёв

Z, см	слой	мод.1		мод.2		мод.3		мод.4 отрыв нижнего слоя			мод.5 расчетная		
		Еср	τ_z	Еср	τ_z	Еср	τ_z	Еср	τ_z	σ_{iz}	Еср	τ_z	σ_{iz}
5	0-5	625	0.25	450	0.25	1300	0.27	1300	0.35	0.193	4500	0.28	-0.6
15	5-15	775	0.22	650	0.23	800	0.21	800	0.3 (z=10)		4500	0.25	0.01
30	15-30	770	0	800	0	725	0	725	0	0.79	4500	0	0.82

Допустимые напряжения:

$$t=0^0 \quad R_{\text{доп}} = 1,8-2,4 \text{ МПа}$$

$$t=30^0 \quad R_{\text{доп}} = 0,8 \text{ МПа} \quad \tau_{50}=0,16-0,2 \text{ МПа} \quad \tau_{30}=0,21-0,25 (0,3) \text{ МПа}$$

Расчётная модель напряжённого состояния многослойного покрытия была разработана на действие только вертикальной нагрузки. Следует учитывать, что на покрытие действуют не только вертикальные, но и горизонтальные усилия.

В этих условиях, очевидно, критическое состояние на контакте слоев переходит в угрожающее по разрушению контакта. Предполагается следующий механизм разрушения контакта слоёв. При наступлении предела прочности асфальтобетона на сдвиг прежде всего в зоне контакта возникают микросдвиги и образуются макротрещины, которые как доказывает проф. В.Н. Золотарёв в дальнейшем «не зарастают» [5]. По краям трещины происходит концентрация напряжений, приводящая к её дальнейшему развитию. В результате происходит разрушение контакта и расслоение покрытия.

Для проверки выдвинутой гипотезы на кафедре Технологии дорожно-строительных материалов ХНАДУ А.В. Гладкий при участии доц. Псюрника В.А. провели испытание на сдвиг монолитных образцов асфальтобетона типов «Б», «В» и «Г» и составных омоноличенных образцов из асфальтобетонов различных типов.

Однородные монолитные образцы делали за один прием на всю высоту. Составные образцы делались в два приема. Сначала на $\frac{1}{2}$ высоты образца засыпалась смесь нижней части и уплотнялась стандартной нагрузкой на прессе. Выдержав образец 20-30 минут для некоторого охлаждения засыпался материал верхней части и производилось уплотнение. Таким образом имитировалась конструкция двухслойного покрытия. Испытания на сдвиг проводились по

стандартной методике сдвиг при кручении и для сравнения «Бразильским методом».

Результаты испытаний представлены в таблице 3 и на рисунках 4, 5, 6.

Таблица 3 - Испытание составных (слоистых) образцов на сдвиг

Испытание образцов $\varnothing 7,14$ см

Структур а	Бразильский метод			Сдвиг при кручении		
	R _p , МПа	R _p среднее, МПа	Примечан ие	τ	τ среднее	Примечание
Б	0,1524	0,1493		0,1356	0,1656	Разруш. у закл.
	0,1462			0,1956		Разруш. у закл.
В/Б	0,2149	0,2136		0,1590	0,1575	По «Б» между слоями
	0,2124			0,1561		По «Б» между слоями
В	0,2699	0,2761		0,1721	0,1857	Разруш. у закл.
	0,2824			0,1993		Разруш. у закл.
В/В	0,2611	0,2630	Между слоями пересып. пылью	0,1874	0,2018	По верхн. «В» меж.сл.
	0,2649			0,2162		По верхн. «В» класс.
Г	0,3661	0,3655		0,1725	0,1593	Полукласс. разр.
	0,3648			0,1462		Разруш. у закл.
Г/В	0,2699	0,2899		0,2135	0,2302	По «Г» между слоями
	0,3099			0,2468		По «Г» класс. разруш.
Г/В (повтор)				0,1621	0,1609	По «В» класс. разруш.
				0,1598		По «В» между слоями



Рисунок 4 - Классический срез при кручении



Рисунок 5 - Срез с разрушением закладных частей



Рисунок 6 - Срез по контакту слоёв

Как видно из приведённых данных разрушения монолитных образцов происходило либо у закладных частей, либо по наклонной плоскости.

У составных образцов 70% разрушенные на контакте слоёв, как наиболее слабое сечение. Практически во всех случаях разрушение на стыку (контакте) слоёв происходит при меньшем напряжениях (на 5-15 %).

В дальнейшем вполне обосновано можно считать, что и теоретически и экспериментально доказана вполне реальная опасность расслоения покрытий при их эксплуатации при повышенных температурах.

Какие опасности таит процесс расслоения покрытия в дальнейшем? Для анализа поведения (напряжённо-деформированного состояния) многослойных покрытий, имеющих один или два разрушающихся контакта слоёв, используем доведение до численных значений

решения проф. В.П.Плевако для трёхслойных систем промежуточной жёсткой прослойки [6].

Сравнительный анализ сделаем для конструкции дорожной одежды (рис. 1) толщиной покрытия 30 см, расчётный, на прочность при изгибе модуль упругости асфальтобетона 4500 мПа ($t_p=0^\circ\text{C}$). Эта же конструкция рассматривается при других температурных условиях: температура покрытия 41°C , по низу асфальтобетонного покрытия температура 33°C (таб. 1). Соответственно этому определены фактические послойные модули и предел прочности на растяжение при температуре 30- 40°C . (0,7-0,8 мПа). При расчётной нулевой температуре и принятой температуре покрытия рассмотрим три возможных варианта:

1- Покрытие сохраняется монолитным на весь период эксплуатации (рис. 7а).

2 - Произошёл отрыв нижнего слоя на глубине 15 см. (Рис 7б).

3 - Произошёл отрыв верхнего слоя на глубине 5 см. (Рис 7в).

Для всех трёх возможных вариантов состояния многослойной системы были определены радиальные (растягивающие) напряжения в каждом слое. Результаты расчётов представлены в табл. 3 и рис. 7а,б,в.

Сопоставляя приведенные в табл.4 данные следует обратить внимание на следующие факты:

- При расчётных температурах асфальтового бетона $t=0^\circ\text{C}$ во всех случаях обеспечена прочность слоёв на растяжение при изгибе. Коэффициент прочности от 1,5 до 4,7 что гарантирует надёжность конструкции.

- При повышенных температурах асфальтобетонного покрытия в летнее время даже в монолитном покрытии коэффициент запаса прочности снижается почти до 1. Такая ситуация никак не гарантирует надлежащую надёжность дорожных одежд.

Таблица 4 - Радиальные напряжения при различных температурно-расчётных схемах и показатели прочности.

Слой / z см	Модуль упругости а.б. при температурном режиме		Радиальное (растягивающее) напряжение МПа № модели								Показатель прочности по моделям							
			монолитное покрытие №1				отрыв верхнего слоя №2		отрыв нижнего слоя №3		допустимые R _{из} асфальтобетона		монолитное покрытие		отрыв верхнего слоя		отрыв нижнего слоя	
			расч. t=0°C	при t=41°C	расч. модель t=0°C	темпер. модель t=0°C	расч. модель t=0°C	темпер. модель t=0°C	расч. модель t=0°C	темпер. модель t=0°C	темпер. модель t=0°C	темпер. модель t=0°C	1а	1б	2а	2б	3а	3б
0	4500	500	-1,1	-1,09	-0,5	-0,41	-1,45	-1,1	1,8	0,7-	4,7	3,7						
5	4500	750	-0,6	-0,55	+0,38	+0,186	-0,35	-0,6	2,4	0,8								
5	4500	750	-0,6	-0,55	-1,28	-1,17	-0,36	-0,6	1,8	0,7-								
15	4500	825	0,01	0,03	-0,15	-0,2	+1,31	+0,98	2,4	0,8								
15	4500	825	0,83		-0,15	-0,2	-1,1	-1,05	1,8	0,7-								
30	4500	740	0,83		+1,064	+0,83	+1,19	+0,87	2,4	0,8	2,17	1,9	1,69	0,96	1,5	0,92		

E_{экв. осн} = 100

- Если произошел сдвиг по контакту слоёв и дальнейшее его расслоение, то при эксплуатации покрытий в «разогретом» состоянии прочности слоёв на трещиноустойчивость не обеспечена (коэффициент запаса прочности меньше 1).

Неизбежно должны появиться вертикальные микротрещины, которые полностью не «залечиваются» т.к. нарушаются структурные связи, а температура 30-40° С для вязких битумов недостаточна для их восстановления. Поэтому уменьшается эффективная толщина монолитного слоя, напряжение возрастает, трещины растут. Процесс этот, очевидно, очень медленный, но тем не менее интенсифицирует разрушение покрытия.

Выводы

Существующий подход к расчётам на прочность многослойных покрытий и усиления нежёстких дорожных одежд не учитывает целый ряд факторов, возникающих в процессе эксплуатации, которые могут привести к непредсказуемому разрушению покрытия.

Из всего комплекса проблем следует выделить две наиболее существенные: эксплуатация нежёстких дорожных одежд при повышенных температурах в летнее время и опасность расслоения покрытия.

Первая проблема может быть решена материаловедами созданием температуроустойчивых вяжущих.

Вторая проблема расчётно-технологическая. Которая должна быть решена разными подходами.

В зависимости от конструкции покрытия, применяемых материалов и технологии устройства дорожной одежды возможны две расчётные схемы покрытия (монолитной части) дорожной одежды: монолитное слоистое покрытие или двухслойное (две слоистых плиты) неомонолитное покрытие.

При усилении дорожных одежд дополнительными слоями асфальтобетона предпочтение следует отдавать неомонолитенному покрытию.

Каждая из расчётных схем требует соответствующего материаловедческого и технологического сопровождения.

Существующая технология устройства многослойных покрытий из чёрных материалов не гарантируют необходимую надёжность монолитности покрытия.

Прежде всего необходимо отработать технологию устройства толстослойных покрытий в том числе составных слоёв из асфальтовых бетонов разных типов.

Повышение прочности контакта слоёв успешно достигается армированием геосетками или георешётками.

Обеспыливание и подгрунтовка по существующему или предыдущему слою может привести к расслоению покрытия, поэтому необходимы специальные «грунтовочные» составы, скорее всего синтетические, повышенной прочности на сдвиг и отрыв.

Так как наиболее опасно (по напряжениям) отрыв нижнего слоя в многослойных покрытиях необходима технология устройства нижнего и следующего за ним слоя монолитной части за «один раз» т.е. омоноличивания неуплотнённых слоёв.

Это только часть технологических и конструктивных решений, которые вытекают из проведённых исследований.

Литература

1. ВБН В.2.3-218-186-2004. «Дорожній одяг нежорсткого типу». - Київ: Укравтодор, 2004.

2. Чугуенко С.А. «Сдвигоустойчивость асфальтобетонов на битумах, модифицированных полимерами. Автореферат диссертации на соискание

учёной степени кандидата технических наук.
Харьков, 2006.

3. Ладыгин Б.И. Яцевич И.К. Вдовиченко С.А. «Прочность и долговечность асфальтобетона». - Минск: «Наука и техника», 1972.

4. Антипов В.Н. «Влияние годовых колебаний температуры на деформационные характеристики асфальтобетонных покрытий». Труды ГипродорНИИ. Вып. 13, 1975.

5. Пырий Я.И., Золотарёв В.А. Показатели механических свойств асфальтобетонов при технологических температурах. // Вісник Донбасу, 2002. (22).

6. ВБН В.2.3-218-008-2005 «Проектування і будівництво жорстких та з жорсткими прошарками дорожніх одягів». - Київ: Укравтодор, 2005 (проект).