
Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Серия «Учебники ТГАСУ»

О.П. Афиногенов, С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко

КОНСТРУИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

Под редакцией С.В. Ефименко

*Рекомендовано Учебно-методическим советом ТГАСУ
в качестве учебного пособия для бакалавров,
обучающихся по направлению подготовки «Строительство»
(программа подготовки «Автомобильные дороги»),
и специалистов, подготовка которых осуществляется
по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий
и сооружений», специализация «Строительство автомагистралей,
аэродромов и специальных сооружений»*

Томск
Издательство ТГАСУ
2020

УДК 625.84/.85.001.2(075.8)

ББК 39.311

А94

Серия «Учебники ТГАСУ» основана в 2013 году

Афиногенов, О.П.

А94

Конструирование и расчет дорожных одежд : учебное пособие / О.П. Афиногенов, С.В. Ефименко, В.Н. Ефименко ; под ред. С.В. Ефименко. – 2-е изд., доп. и перераб. – Томск : Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2020. – 444 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-93057-930-7

Приведены общие сведения об особенностях функционирования дорожных одежд автомобильных дорог, обзор методов их расчета. Рассмотрен порядок конструирования и расчета дорожных одежд, регламентированный действующими нормативными и методическими документами. Изложены особенности расчета жестких дорожных одежд в частных случаях, а также необходимые сведения для учета при проектировании в природных условиях Западной Сибири. Даны необходимые комментарии и примеры расчета.

Предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров 08.03.01 «Строительство» (программа подготовки «Автомобильные дороги»), и специалистов, подготовка которых осуществляется по специальности 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», специация «Строительство автомагистралей, аэродромов и специальных сооружений. Может быть полезно слушателям факультетов повышения квалификации, а также специалистам проектных организаций.

УДК 625.84/.85.001.2(075.8)

ББК 39.311

Рецензенты:

В.В. Ушаков, докт. техн. наук, профессор, зав. кафедрой «Строительство и эксплуатация дорог», проректор по научной работе МАДИ (ТУ), заслуженный работник высшей школы РФ;

В.А. Шаламанов, докт. техн. наук, профессор Кузбасского государственного университета.

ISBN 978-5-93057-930-7

© Томский государственный архитектурно-строительный университет, 2020

© Афиногенов О.П., Ефименко С.В., Ефименко В.Н., 2020



ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог	6
1.1. Понятие о надежности, долговечности и сроках службы дорожных одежд	6
1.2. Воздействие на дорожную одежду нагрузки от транспортных средств	12
1.3. Природные и климатические воздействия на дорожную конструкцию	14
1.4. Характерные повреждения и дефекты эксплуатируемых дорожных одежд	21
1.5. Влияние состояния дорожной одежды на показатели работы автомобильного транспорта	31
2. Конструирование дорожных одежд	37
2.1. Назначение конструкций дорожных одежд и основные требования, предъявляемые к ним	37
2.2. Конструктивные слои, классификация дорожных одежд	39
2.3. Задачи и принципы конструирования дорожных одежд	44
2.4. Эффективность применения и особенности конструирования жестких дорожных одежд	47
2.5. Особенности конструирования нежестких дорожных одежд	70
2.6. Конструирование дополнительных слоев основания	76
2.7. Особенности конструирования дорожных одежд со слоями из малопрочных материалов и побочных продуктов промышленности	80
2.8. Повышение прочности и стабильности рабочего слоя земляного полотна	81
3. Обзор методов расчета дорожных одежд	85
3.1. Методы расчета жестких дорожных одежд	85
3.2. Методы расчета нежестких дорожных одежд	107
4. Расчетные параметры подвижной нагрузки	114
5. Расчетные характеристики материалов	124
6. Практическая методика расчета жестких дорожных одежд с монолитными цементобетонными покрытиями	127
6.1. Общие положения расчета жестких дорожных одежд	127
6.2. Расчет толщины монолитного покрытия	128
6.3. Расчет основания	134
6.4. Пример расчета	140
7. Особые случаи расчета жестких дорожных одежд	150

7.1. Расчет асфальтобетонных покрытий с цементобетонным основанием.....	150
7.2. Расчет сборных покрытий.....	151
7.3. Расчет сборно-монолитных покрытий.....	159
7.4. Определение толщины покрытий на стадии технико-экономических обоснований.....	166
8. Расчет нежестких дорожных одежд.....	170
8.1. Общие положения нормативного метода расчета.....	170
8.2. Расчет дорожной одежды по допускаемому упругому прогибу.....	176
8.3. Расчет по сдвигу в грунте земляного полотна и слабосвязанных материалах.....	180
8.4. Расчет монолитных материалов на растяжение при изгибе.....	184
8.5. Пример расчета.....	188
9. Обеспечение морозоустойчивости дорожных одежд.....	200
10. Проектирование осушения дорожной одежды и земляного полотна.....	223
11. Учет региональных особенностей проектирования дорожных одежд.....	237
11.1. Принципы регионального районирования и назначения расчетных характеристик грунтов.....	237
11.2. Значения характеристик грунтов для расчета дорожных одежд в условиях Алтайского края.....	246
11.3. Особенности проектирования дорожных одежд в условиях Кемеровской области.....	257
11.4. Значения характеристик грунтов для расчета дорожных одежд на территории Новосибирской области.....	304
11.5. Особенности проектирования дорожных одежд на территории Томской области.....	342
11.6. Расчетные значения характеристик грунтов для проектирования дорог в Тюменской области.....	361
Библиографический список.....	394
Приложение 1. Характеристики грунтов и материалов дорожных одежд.....	404
Приложение 2. Характеристики транспортных средств.....	432
Приложение 3. Расчетная амплитуда колебаний температуры на поверхности покрытия.....	441
Приложение 4. Условные обозначения материалов в слоях дорожной одежды.....	442
Приложение 5. Пример оформления поперечного профиля конструкции земляного полотна и дорожной одежды.....	443

ПРЕДИСЛОВИЕ

Дорожная одежда – один из наиболее ответственных и материалоёмких элементов автомобильной дороги. Состояние дорожного покрытия во многом определяет режимы и безопасность движения, эффективность функционирования автомобильного транспорта.

Пособие посвящено вопросам конструирования и расчета наиболее распространенных типов дорожных одежд с учетом действующих нормативных документов [1–3] и является переработанным и дополненным изданием учебных пособий [4, 5]. Цель пособия – обеспечить студентов высших учебных заведений, осуществляющих бакалаврскую и специальную подготовку по направлениям 08.03.01 «Строительство» и 08.05.01 «Строительство уникальных зданий и сооружений», слушателей факультетов повышения квалификации необходимым материалом для учебного проектирования дорожных одежд. При подготовке пособия учтены положения, сформулированные в работах [6, 7].

Значительное внимание уделено особенностям проектирования автомобильных дорог общего пользования в регионе основной добычи углеводородного сырья России – Западной Сибири. Приведены уточненные климатические параметры, расчетные характеристики грунтов для территорий Алтайского края, Кемеровской, Новосибирской, Томской и Тюменской областей, полученные в результате многолетних исследований сотрудников Томского государственного архитектурно-строительного университета (ТГАСУ) [8, 9]. В предлагаемой работе отражены положения актуализированных и вновь принятых в отрасли норм проектирования дорожных одежд, последних результатов научных исследований.

Учебное пособие подготовили кандидат технических наук, доцент О.П. Афиногенов (директор Кузбасского центра дорожных исследований), доктор технических наук, декан дорожно-строительного факультета С.В. Ефименко, доктор технических наук, профессор кафедры «Автомобильные дороги» В.Н. Ефименко (Томский государственный архитектурно-строительный университет).

1. РАБОТА ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

1.1. Понятие о надежности, долговечности и сроках службы дорожных одежд

Используемая в настоящее время система терминов и понятий, относящихся к службе дорожных одежд, предложена профессором А.К. Бирулей [10]. Большой вклад в её развитие внесли профессора И.А. Золотарь, В.К. Некрасов, С.В. Коновалов, Ю.М. Яковлев, М.С. Коганзон и др. [11]. Ниже рассмотрена терминология, применяемая специалистами дорожной отрасли при конструировании и расчёте дорожных одежд.

Долговечность – свойство дорожной одежды сохранять работоспособность до наступления определенного предельного состояния при нормальном эксплуатационном содержании и ремонтах. Этот термин с таким же содержанием может быть применен не только ко всей одежде, но и к каждому её слою отдельно. Предельное состояние дорожной одежды наступает, когда её дальнейшая эксплуатация становится неэффективной (нерациональной) из-за старения, разрушения, частых отказов или увеличения затрат на ремонт. Показателем долговечности может служить, например, срок службы до капитального ремонта без потери основных эксплуатационных качеств [12]. Предельное состояние может также определяться так называемым моральным устареванием покрытия.

Следует различать показатели, характеризующие долговечность по наработке (ресурс) и календарному времени службы (срок службы). Ресурс и срок службы могут отсчитываться от момента сдачи в эксплуатацию до первого капитального ремонта, между капитальными ремонтами и до реконструкции или утилизации (ликвидации). Таким образом, под долговечностью дорожной одежды подразумевают предельный срок её службы, в течение которого она сохраняет требуемые эксплуатационные качества.

В технике принято различать долговечность моральную и физическую. Моральная долговечность дорожной одежды характеризуется сроком службы до того момента, когда она перестает отвечать изменяющимся условиям эксплуатации или режимам технологических процессов.

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

Физическая долговечность дорожной одежды определяется продолжительностью износа и (или) других деструктивных процессов в основных несущих элементах (слоях) конструкции под воздействием транспортных нагрузок и физико-химических факторов.

Долговечность сокращается при неправильной эксплуатации дороги, перегрузках одежды, а также при резко выраженных разрушающих воздействиях окружающей среды (действие грунтовой и поверхностной воды, солнечной радиации, мороза и т. д.) В значительной степени долговечность дорожных одежд зависит от правильного выбора конструктивно-технологических решений (с учетом особенностей географического комплекса), специфики эксплуатации, обеспечения качества строительства.

Поскольку долговечность – один из показателей качества продукции, актуальность совершенствования методов проектирования дорожных одежд с продолжительным жизненным циклом достаточно высока. Для обеспечения долговечности дорожных одежд необходимо учитывать положения теории управления качеством (рис. 1.1) [13], предварительно внедрив их в учебный процесс подготовки проектировщиков и строителей автомобильных дорог.



Рис. 1.1. Влияние вида управления на качество продукции

Конструирование и расчет дорожных одежд

Физическая и моральная долговечность должны быть согласованы между собой: чем меньше моральная долговечность, тем ниже должны быть требования и к физической долговечности.

При решении проблемы долговечности дорожных одежд следует учитывать, что она – лишь одна из характеристик надежности конструкции. Надежность любого инженерного сооружения характеризуется способностью сохранять значения установленных параметров функционирования в определенных пределах, соответствующих заданным режимам и условиям использования и технического обслуживания [14]. Другими словами, *надежность* – это устойчивость качества системы (инженерного сооружения) по отношению ко всем возможным возмущениям, которые могут встретиться при изготовлении, возведении, полезном функционировании, транспортировании, хранении и т. п. В зависимости от назначения системы и условий ее эксплуатации надежность может включать такие свойства, как безотказность, долговечность, ремонтпригодность, сохраняемость (резервируемость), или любое сочетание этих свойств.

Профессор А.К. Бируля предложил следующее определение надежности дорожной одежды [15]: «Надежность – это свойство одежды, обусловленное безотказностью, долговечностью, ремонтпригодностью всего сооружения или его частей и обеспечивающее сохранение эксплуатационных показателей одежды в заданных пределах».

Основное понятие, используемое в теории надежности, – понятие отказа, т. е. утраты работоспособности, наступающее внезапно или постепенно. *Работоспособность* – такое состояние дорожной одежды, при котором она соответствует всем требованиям, предъявляемым к ее основным параметрам. К числу основных параметров дорожных одежд относят несущую способность (прочность), износостойкость, ровность, сцепление колеса с поверхностью покрытия, их принято называть транспортно-эксплуатационными показателями или показателями качества.

Показатели качества изменяются с течением времени. Их изменение, превышающее допустимые значения, способствует частичному или полному отказу дорожной одежды.

Мерой работоспособности обычно является срок службы одежды, определяемый массой грузов и транспортных средств (масса брутто),

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

пропущенных дорогой от её сдачи в эксплуатацию до потребности в капитальном ремонте или между капитальными ремонтами (полная работоспособность) либо за период от сдачи в эксплуатацию до ремонта или между ремонтами (частичная работоспособность) [12]. Такой подход нельзя признать правильным, поскольку при этом устанавливаются не срок службы, а ресурс дорожной одежды (см. выше). Кроме того, не учитывают и другие факторы, влияющие на работоспособность.

Факторы, действующие на дорожную одежду, можно объединить в следующие группы:

– транспортные нагрузки (состав движения, нагрузка на колесо, интенсивность, скорость, распределение по ширине проезжей части и др.);

– показатели водно-теплого режима (влажность и температура земляного полотна и слоев дорожной одежды и др.);

– методы, сроки и качество работ по содержанию, ремонту и капитальному ремонту дорожной одежды и других дорожных сооружений.

Применительно к условиям Сибири данный вопрос подробно рассмотрен в работах [9, 109, 110].

Многочисленность и сложность факторов, определяющих работоспособность дорожных одежд, в сочетании с практической важностью проблемы обеспечения их долговечности и надежности вызывают необходимость исследований в этой области. В настоящее время достаточно чётко прослеживаются два реализуемых научных направления.

Первое направление состоит в изучении физических основ работы и старения конструкций. При этом исследователи решают следующие задачи: оценка влияния внешних и технологических факторов на прочность, плотность и другие свойства материалов и конструкции в целом; изучение закономерностей износа, коррозии материалов под действием влаги, газов, агрессивных сред; измерение степени и оценка характера повреждений конструкции; разработка способов и средств восстановления транспортно-эксплуатационных качеств.

При всей важности отмеченного направления, к сожалению, оно не учитывает в достаточной мере динамику факторов, воздействующих, например, на дорожную одежду в процессе её эксплуатации. Здесь необходимо использовать элементы теории надежности. В её разработке и состоит второе направление исследований в области

обеспечения долговечности и надежности дорожных одежд. При этом решают такие задачи, как разработка методик сбора, учета и анализа статических данных о работе различных конструкций автомобильных дорог и их экономической эффективности; разработка математических основ количественной оценки надежности и прогнозирования отказов; изучение закономерностей возникновения отказов; оценка влияния внешних и внутренних факторов на происходящие в конструкции процессы; разработка методов восстановления работоспособности и повышения надежности, в частности, дорожных одежд.

Развитие этого научного направления требует обширной информации о повреждениях (отказах) конструкций с учетом технологии строительства, условий эксплуатации, методов содержания и ремонта. Для количественной оценки надежности и долговечности дорожных одежд необходимо знать закономерности снижения надежности основных параметров конструкций (прочность, трещиностойкость и др.), закономерности коррозии, износа и разрушения.

Анализ работ по теории упрочнения и разрушения строительных конструкций (первое направление исследований) показывает, что процесс изменения прочности дорожной одежды во времени может быть представлен графиком (рис. 1.2), на котором выделены три характерных этапа эксплуатации:

I. Период повышенной потери прочности, вызванной первоначальным интенсивным воздействием усадочных, температурных, влажностных напряжений и возникающих при этом деформаций. Этот период сравнительно короткий. Для него характерно проявление строительных дефектов.

II. Период длительной потери прочности и износа. В данный период частично затухают, перераспределяются, снимаются возникшие в первый период напряжения за счет образования трещин; снижаются усадочные явления, но развиваются необратимые процессы, приводящие к деструкции материалов и медленному их разрушению. Этот период является основным в работе конструкции и самым длительным во времени, он составляет 80–90 % от общего срока службы.

III. Период интенсивного разрушения, когда физический износ достигает критического значения. На этой стадии решается вопрос о целесообразности ремонта или реконструкции дорожной одежды.

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

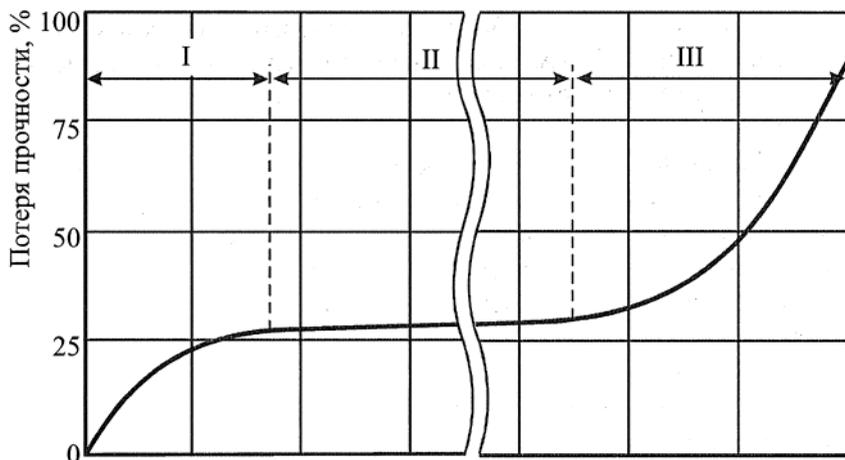


Рис. 1.2. Обобщенный график изменения прочности жесткой дорожной одежды во времени

Срок службы дорожной одежды – это период от начала ее эксплуатации до достижения предельного состояния. Он включает время, когда конструкция эксплуатируется (безотказно функционирует), и время простоев всех видов, обусловленных как эксплуатационным содержанием и ремонтами, так и организационными и другими причинами.

На фактический срок службы дорожной одежды влияют многие случайные факторы, часто не поддающиеся учету, например проявление особенностей структуры материалов, качество строительных и ремонтных работ, особенности содержания.

Следует различать срок службы дорожной одежды и срок службы покрытия, а также их проектные и эксплуатационные (фактические) сроки службы.

Для прогнозирования долговечности дорожной одежды в целом необходимо располагать данными об изменении прочности её материалов во времени с учетом воздействия окружающей среды и динамических нагрузок. При благоприятных условиях многие строительные материалы сохраняют свою прочность стабильной, некоторые, например цементобетон, со временем могут упрочняться.

1.2. Воздействие на дорожную одежду нагрузки от транспортных средств



В процессе эксплуатации дорожные одежды подвергаются динамическому воздействию транспортных средств, двигающихся с различными скоростями. Постоянное изменение дорожных условий, вызываемое параметрами дороги и природными факторами, является причиной соответствующего изменения режима движения автомобилей.

Современные представления теории прочности дорожных одежд автомобильных дорог требуют учитывать при оценке работоспособности конструкций не только максимальные нагрузки на колеса транспортных средств, но и скорости их движения, общее число воздействий колес на проезжую часть, распределение движения во времени и по ширине проезжей части.

Воздействие транспортных средств на дорожную одежду передается по площадке контакта пневматической шины с поверхностью покрытия. Площадь контакта зависит от нагрузки на колесо, давления в шинах и может изменяться от 300 до 10 000 см². Давление в шинах колеблется от 0,15 до 0,7 МПа.

Для определения площади контакта шины с покрытием профессор В.Ф. Бабков предложил следующую формулу [15]:

$$F = \frac{P_K}{K_{ж} \cdot P_0}, \quad (1.1)$$

где P_K – статическая нагрузка от колеса на покрытие, Н; P_0 – давление воздуха в шине, Па; $K_{ж}$ – коэффициент, учитывающий влияние жесткости боковых стенок шин, равный в среднем 1,1.

При движении автомобиля давление колеса на покрытие повышается в результате влияния ряда условий: нагревания шины и увеличения в ней внутреннего давления воздуха; увеличения жесткости шины от влияния растягивающей покрывку центробежной силы; продолжительности (кратковременности) контакта с покрытием каждого участка шины, в результате которой шина не успевает обжаться до размера, соответствующего статическому приложению фактически действующей нагрузки, т. е. как бы становится более жесткой. Из-за

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

неровностей и других дефектов покрытия при движении возникают колебания автомобиля.

При расчете дорожных одежд колебания колесной нагрузки, как правило, учитывают, умножая значения нормативной статической нагрузки от колеса на коэффициент динамичности K_D . Он представляет собой отношение наибольшего амплитудного значения колесной нагрузки, передаваемой колесом покрытию в состоянии покоя.

Зависимость коэффициента динамичности от скорости имеет следующий вид [16]:

$$K_D = 0,5(3 - e^{-0,1v}), \quad (1.2)$$

где v – скорость, м/с.

Если произвести расчеты по формуле (1.2), то получим:

V , км/ч	10	20	30	50	80
K_D	1,12	1,21	1,28	1,38	1,45

Для дорог общего пользования значения коэффициента динамичности принимают равным 1,3 [1–3].

Скорости движения транспортных средств меняются в широком диапазоне, зависят от технических возможностей автомобиля, степени его загрузки, дорожных условий. На дорогах общего пользования средняя скорость грузовых автомобилей составляет около 60–80 км/ч.

Одним из параметров режима движения является интервал времени между двумя последовательно перемещающимися автомобилями (Δt). На дорогах общего пользования его величина случайна. Например, на карьерных дорогах движение автосамосвалов может производиться примерно с равными интервалами (на забойных дорогах). Существует ряд математических моделей, описывающих распределение Δt для различных потоков и в зависимости от дорожных условий, интенсивности и состава движения [17].

Интенсивность движения транспортных средств на автомобильных дорогах колеблется от нескольких автомобилей в сутки до десятков (иногда сотен) тысяч. Принято считать, что на дорогах общего пользования рост интенсивности движения N_i происходит в геометрической прогрессии от срока сужбы t :

$$N_t = \frac{N_0}{1 - q}, \quad (1.3)$$

где N_0 – начальная интенсивность движения на первый год эксплуатации дороги; q – ежегодный прирост интенсивности движения.

Воздействие колес автомобилей неравномерно распределяется по ширине проезжей части дороги и по ширине полосы движения. Распределение следов автомобилей по ширине полосы движения, необходимое для оценки числа воздействий колес на угловые и краевые участки плит бетонных покрытий, принято характеризовать зазором между краем плиты и колесом автомобиля.

Неравномерное распределение воздействий по ширине проезжей части приводит к тому, что в зависимости от положения выбранного сечения число воздействий может существенно различаться, меняется и агрессивность (степень воздействия) различных положений нагрузки для данного сечения.

В процессе эксплуатации дорожные покрытия подвержены воздействию транспортных потоков, состоящих из различных автомобилей, отличающихся грузоподъемностью, габаритами, числом осей и их расположением, нагрузками на ось и давлением в шинах.

При оценке воздействия транспортных средств на покрытие большое значение имеет расположение колес в плане (от положения отпечатков колес в значительной мере зависит напряженное состояние плиты покрытия жесткой дорожной одежды).

1.3. Природные и климатические воздействия на дорожную конструкцию

В процессе эксплуатации любая дорожная конструкция находится под воздействием природно-климатических (внешних) факторов. Природные факторы весьма разнообразны (растительность, орорафия, грунтовые, гидрологические условия и др.). Они действуют на конструкцию раздельно и в различных сочетаниях. Правильный учет воздействия географического комплекса при проектировании дорожных одежд имеет большое значение в обеспечении их заданной долго-

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

вечности. Особенно велико влияние климатических параметров: температуры воздуха, режима промерзания грунтов, количества и распределения по сезонам года осадков [18].

Наибольшее влияние на сроки службы дорожных покрытий оказывают температура и влажность окружающей среды, поскольку от них зависят водно-тепловой режим грунтов земляного полотна и оснований дорожных одежд, температурные напряжения и деформации покрытий. Отрицательное воздействие природных факторов может проявляться в виде: переувлажнения оснований и, как следствие, снижение их несущей способности; пучения грунтов рабочего слоя земляного полотна, температурных деформаций и эрозии материалов покрытий; коррозионного разрушения слоев одежды минерализованными грунтовыми водами и др.

При расчете жестких дорожных одежд в первую очередь следует принять во внимание, что изгиб цементобетонных плит может быть вызван не только нагрузкой от автомобилей, но и неравномерным распределением температуры по толщине плиты при колебаниях температуры воздуха, а также пучением грунтов при их промерзании и неравномерными поднятием зимой и осадкой при весеннем оттаивании. Верх плиты нагревается днем и охлаждается ночью, температура низа плиты в связи с влиянием теплоемкости материала основания изменяется меньше. Разность температуры верха и низа плиты вызывает ее коробление, которому препятствуют отпор соседних плит и собственный вес плиты (рис. 1.3, а, б).

При изменении среднесуточной температуры воздуха соответственно меняется и общая температура плиты. С наступлением осени и зимы плиты сокращаются в размерах, с потеплением весной и летом – расширяются (рис. 1.3, в). Свободному температурному сжатию или расширению плит препятствуют силы трения и сцепления, развивающиеся между нижней поверхностью плиты и основанием. Силы трения и сцепления приложены эксцентрично по отношению к центру тяжести поперечного сечения плиты и вызывают дополнительные изгибающие напряжения, которые тем значительнее, чем больше размеры плиты и температурный перепад. Температурные напряжения вполне могут быть причиной разрушения цементобетонных покрытий, поэтому учет температурных воздействий обязателен при расчете и конструировании жестких дорожных одежд.

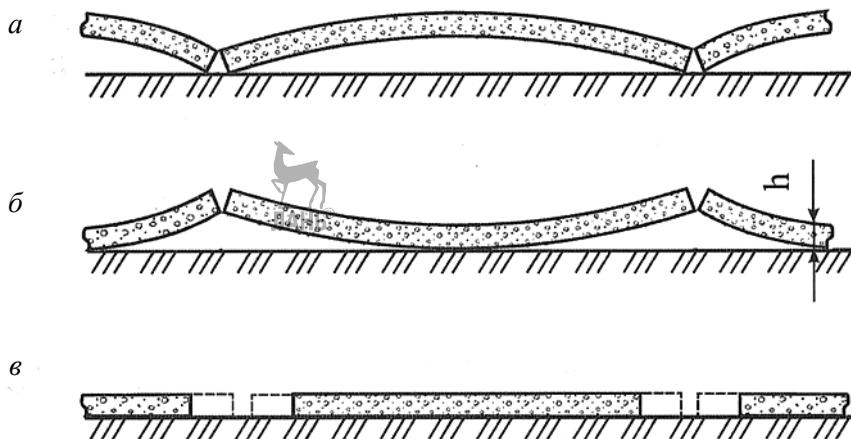


Рис. 1.3. Температурные деформации плит бетонных покрытий:
a – температура верхней поверхности больше, чем нижней; *б* – температура нижней поверхности больше, чем верхней; *в* – равномерное охлаждение плиты

При промерзании грунтов земляного полотна в результате зимней миграции влаги и накопления линз льда происходит вертикальное поднятие покрытия. Этот процесс может быть равномерным, тогда всё покрытие приподнимается на одинаковую высоту, но в связи с неоднородностью состава (минералогического, гранулометрического) грунтов или из-за неравномерного притока влаги в промерзающую толщу пучение чаще бывает неравномерным, образуются бугры пучения. Приподнимая монолитное покрытие, взбугривание вызывает в ней изгибающие напряжения [18].

При весеннем оттаивании грунта подымавшая зимой поверхность покрытия оседает. В связи с неравномерным оттаиванием осадка может происходить неравномерно даже при равномерном его поднятии за счет пучения промерзающих грунтов.

В результате неравномерного поднятия при промерзании или опускания при оттаивании дорожной конструкции плита опирается на подстилающие слои лишь в отдельных местах. Возникающие при этом напряжения могут стать причиной разрушения покрытия. Необходимая морозоустойчивость дорожных одежд обеспечивается без

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

специальных мероприятий: в районах с малой глубиной промерзания; при непучинистых грунтах основания (пески, крупные супеси, скальный грунт); если толщина покрытия, необходимая по условиям прочности, превышает $\frac{2}{3}$ глубины промерзания; в сухих местах без избыточного увлажнения с обеспеченным поверхностным стоком и низким уровнем грунтовых вод (за исключением случаев устройства покрытий на грунтовых основаниях из пылеватых супесчаных грунтов). Во всех остальных случаях необходима специальная проверка дорожной конструкции на морозоустойчивость.

При решении задач обеспечения долговечности одежд автомобильных дорог следует особое внимание обратить на физические процессы, протекающие в дорожной конструкции. В зимний период влага интенсивно мигрирует к фронту промерзания (из нижних теплых слоев в подстилающий дорожную одежду грунт и дополнительный слой основания дорожной одежды). Накапливающаяся вода образует ледяные линзы и прослойки. Весной основание под покрытием проезжей части, имеющим темный цвет, оттаивает быстрее, чем обочины, покрытые снегом. Поверхность мерзлого грунта приобретает вогнутое очертание, где скапливается большое количество воды от растаявших ледяных линз и прослоек (рис. 1.4).

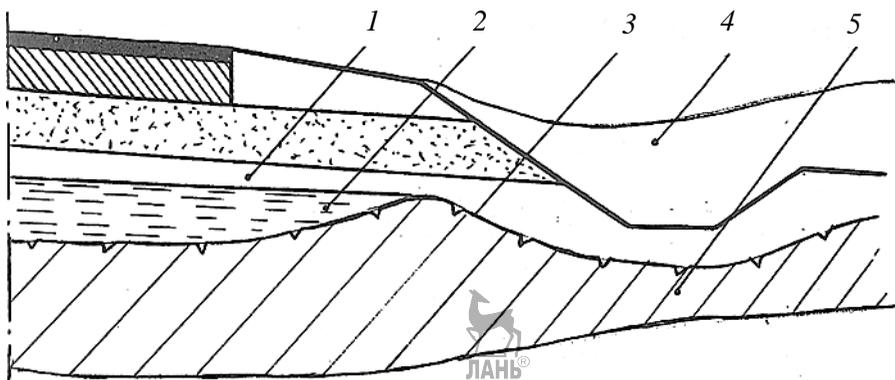


Рис. 1.4. Схема оттаивания земляного полотна:

1 – оттаивший грунт; 2 – переувлажненный оттаивший грунт; 3 – граница мерзлого грунта; 4 – снег; 5 – мерзлый грунт

Конструирование и расчет дорожных одежд

При проезде по дороге транспортных средств в переувлажненном подстилающем грунте возникают гидродинамические напоры, вода отжимается в слои основания дорожной одежды (не имея возможности уходить вниз и в стороны). Частицы грунта, каменных материалов расклиниваются, и их сопротивление сдвигу резко падает. В результате скорость повреждения дорожной одежды возрастает в тысячи раз (по сравнению со скоростью разрушения при отсутствии в ее слоях свободной воды) [19].

Для устранения этой проблемы необходимо обеспечить быстрое дренирование дополнительных слоев дорожной одежды из дискретных материалов (менее нескольких дней). Но в природных условиях Западной Сибири (глубокое промерзание грунтов, преобладание грунтов с низким коэффициентом фильтрации) это практически невозможно, поэтому приходится ограничивать движение тяжелых транспортных средств.

Ограничение движения заложено и в методике проектирования дорожных одежд [18]. На рис. 1.5 показана схема назначения расчетной величины эквивалентного модуля упругости грунтового основания ($E_{гр}$). Видно, что она принимается выше, чем минимальное значение (E_{min}).

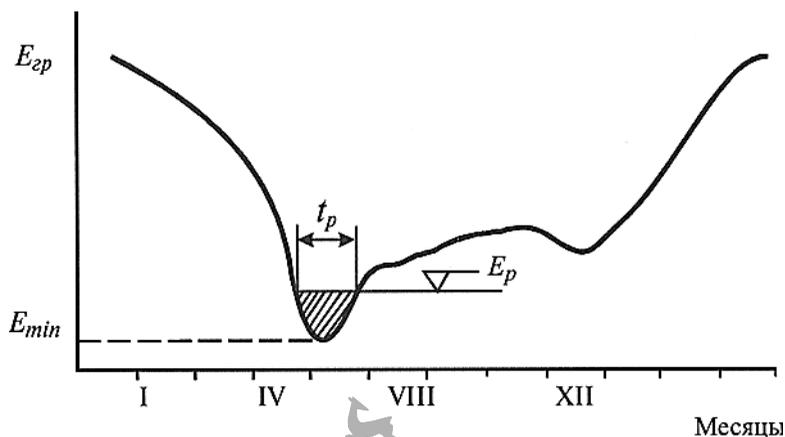


Рис. 1.5. Схема определения расчетного периода (t_p) и модуля упругости грунтового основания ($E_{гр}$)

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

Такой подход объясняется тем, что минимальное значение наблюдается весьма непродолжительное время. Если запроектировать дорожную одежду на E_{\min} , почти все время она будет работать с большим запасом прочности, что при разработке методики расчета было признано экономически нецелесообразным. Это объясняет необходимость ограничения движения для дорожных одежд, рассчитанных на перспективную нагрузку.

Надо сказать, что вода – опаснейший враг дорожной одежды. Это понимали еще в древние времена. Например, римляне, строившие дороги ещё до нашей эры, знали о разрушающем действии воды. Под плоскими плитами основания они часто использовали слой песка, располагая его поверх грунтового основания [19, 20, 81].

Обеспечение прочности и долговечности дорожной конструкции за счет увеличения толщины покрытия экономически нецелесообразно. Конструктивные слои покрытия только распределяют нагрузку от транспортных средств на большую площадь грунтового основания. Это понимал еще знаменитый Джон Макадам, который в 1820 г. заявил: «..если вода просачивается через дорожное покрытие и заполняет естественный грунт, дорога, независимо от толщины покрытия, теряет несущую способность и разламывается на куски». К сожалению, современные проектировщики дорог основное внимание уделяют плотности и прочности и очень мало заботятся об осушении дорожной одежды. В результате подавляющее большинство одежд с покрытиями капитального типа, построенных в последние 30-40 лет, представляют собой слабо дренирующие системы. И здесь без ограничения движения весной не обойтись. Следует иметь в виду, что это делают не только на дорогах России. В Швеции, например, в весенний период вводят ограничение движения транспортных средств грузоподъемностью более 4 т на срок от 1,5 до 2 месяцев (в зависимости от климатической зоны).

Из-за многообразия факторов, влияющих на механизм разрушения дорожных покрытий, процесс деформации является очень сложным. Чаще всего наибольший ущерб наносит вода, находящаяся в порах материалов, трещинах, промежутках между слоями. Некоторые из наиболее опасных воздействий транспорта и воды проявляются исключительно внутри конструктивных слоев и не зависят от прочности и поведения грунтового основания.

В случае заполнения водой всех пор материалов слоев дорожной одежды и пустот между ними транспортные нагрузки оказывают на воду динамическое воздействие типа гидравлического удара. Пульсирующее давление воды вызывает эрозию, выбрызгивание материала из-под покрытия, может привести к расслаиванию.

Свободная вода, находясь в деформированных асфальтобетонных покрытиях, способствует образованию трещин, окислению битума, увеличению жесткости покрытия, что может привести к растрескиванию и общему разрушению слоя. Вода является средой, в которой частицы глинистого грунта земляного полотна выталкиваются в образующиеся трещины в монолитных слоях дорожной одежды, препятствуя тем самым их смыканию и самозалечиванию.

Наиболее опасна вода в порах и трещинах материала покрытия весной, когда в ночное время происходит её замерзание. При этом давление, возникающее в скелетных материалах (главным образом в результате льдообразования), приводит к растрескиванию покрытия из-за чрезмерных напряжений. В весенний период происходит многократное замерзание и оттаивание, что ускоряет процесс разрушения материала покрытия. Поскольку нагрузки от транспортных средств при этом крайне опасны, ограничение движения разумно с точки зрения условий, возникающих внутри материалов конструктивных слоев дорожной одежды и земляного полотна.

Нельзя не замечать и другую сторону проблемы: часто весеннее ограничение движения является способом компенсации ошибок служб ремонта и содержания дорог. В качестве примера обратим внимание на работу дренажа дорожной одежды (рис. 1.6).

В процессе содержания дороги грязь, наносы сталкиваются на откос и препятствуют водоотводу из дренирующего слоя, в результате в материалах дорожной одежды скапливается свободная вода (последствия этого рассмотрены выше). Необходимы периодическая очистка и планировка обочин, откосов и восстановление дренажа.

Другим эффективным способом защиты дорожных покрытий в весенний период является своевременный ремонт дефектов в виде трещин.

Вследствие малой распределяющей способности нагрузки в асфальтобетонных покрытиях приходится увеличивать их ширину, превышая требуемую по условию движения автомобилей (чтобы не раз-

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

рушалась кромка слоя). Цементобетонные покрытия не требуют такой предосторожности, т. е. ширина слоя цементобетона может быть в пределах допустимой. Высокая распределяющая способность цементобетона исключает необходимость ограничения движения в периоды ослабления несущей способности земляного полотна.

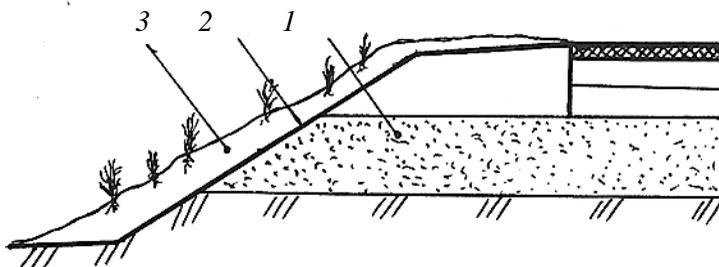


Рис. 1.6. Схема дорожной конструкции в процессе эксплуатации:

1 – дренарующий слой; 2 – проектное очертание откоса; 3 – наносы, грязь

Работоспособность нежестких дорожных одежд резко снижается и в результате уменьшения модуля упругости асфальтобетона при повышении его температуры (рис. 1.7). При 50 °С (достаточно типичная температура покрытия в летний период) величина модуля упругости асфальтобетона составляет 12 % от значения модуля при 10 °С. Для компенсации этого явления требуется увеличение толщины слоя, что, в свою очередь, приводит к соответствующему росту затрат. В жаркий период года на асфальтобетонных покрытиях появляются сдвиговые деформации (колея, волны). Вероятность их образования значительно повышается при низких скоростях движения и наличии сверхтяжелых нагрузок. Цементобетон практически не меняет своих прочностных свойств при изменении температуры.

1.4. Характерные повреждения и дефекты эксплуатируемых дорожных одежд

Соблюдение норм проектирования дорожных одежд, как правило, способствует заблаговременному выявлению наиболее уязвимых

Конструирование и расчет дорожных одежд

мест образования дефектов в слоях дорожных одежд. К сожалению, единая классификация дефектов по количественным признакам пока недостаточно проработана. Приведенные ниже сведения – результаты анализа опыта эксплуатации покрытий аэродромов и автомобильных дорог общего пользования [21, 28].

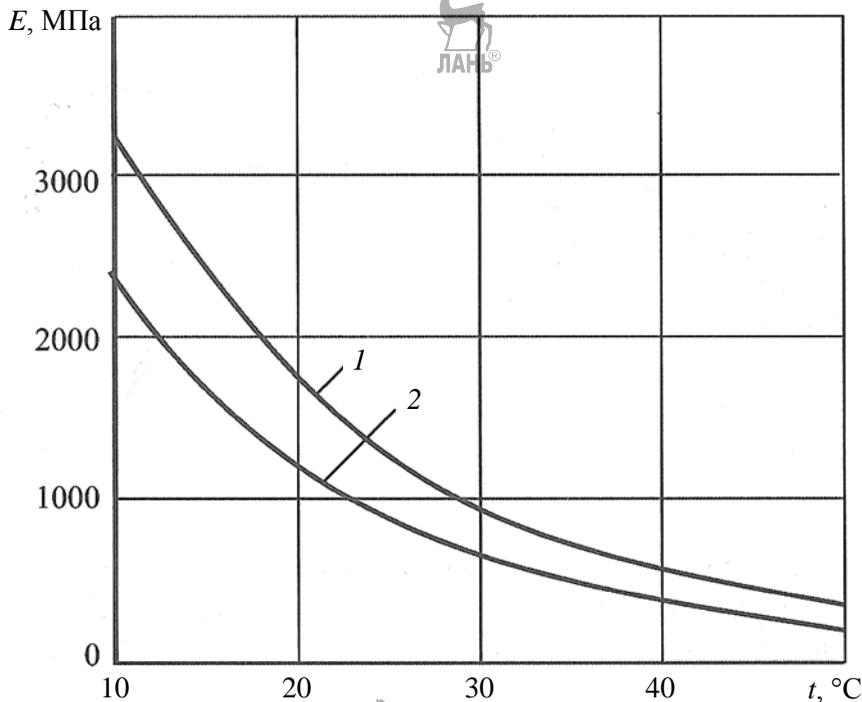


Рис. 1.7. Изменение модуля упругости горячего плотного асфальтобетона (E) в зависимости от температуры (t):
1 – на битуме марки БНД 60/90; 2 – БНД 90/130

Повреждения, встречающиеся на дорожных покрытиях, можно классифицировать по причинам, их вызывающим; характеру процессов разрушения; значимости последствий разрушения и трудоемкости восстановления транспортно-эксплуатационных свойств [22].

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

Причины, вызывающие повреждения любых сооружений, можно свести к четырем видам: воздействие внешних природных и искусственных факторов; воздействие факторов, обусловленных технологическими процессами при строительстве сооружения; проявление дефектов, допущенных при проектировании; недостатки и нарушения правил эксплуатации.

По характеру процессов, приводящих к разрушению конструкций, оно может быть:

- механическим, вызванным приложением сил (сверхрасчетной нагрузки и т. д.);
- физико-механическим, вызванным воздействием попеременного замораживания-оттаивания, химических противогололедных материалов и т. д.

По степени разрушения или значимости их последствий выделяют три категории повреждений:

- 1) аварийного характера, требующие немедленного устранения;
- 2) несущих конструкций, не являющиеся аварийными, устранение которых допустимо при капитальном ремонте;
- 3) мелкие местные, устраняемые при текущем ремонте.

По аналогии со стандартизованной классификацией дефектов повреждения можно разделить на критические, значительные и незначительные (мелкие). Однако следует делать различие между понятиями «дефект» и «повреждение». *Дефект* – это каждое отдельное несоответствие конструкции установленным требованиям, а *повреждение* – результат проявления дефекта. Наличие дефекта не всегда приводит к потере или снижению работоспособности дорожной одежды.

Наиболее полная классификация основных видов разрушений (повреждений) дорожных одежд с асфальтобетонными покрытиями отражена в работе А.П. Васильева [22], а с цементобетонными покрытиями дана Н.В. Свиридовым [23].

Довольно типичный вид повреждения цементобетонных покрытий – *шелушение*. Шелушением называют отслоение раствора с поверхности покрытия на глубину до 5 мм. Оно может быть сплошным, очаговым и вдоль поперечных и продольных швов. Основная причина – низкая прочность бетона верхнего слоя плит.

Конструирование и расчет дорожных одежд

Сплошное шелушение поверхности плиты и отдельных ее участков вызывают также:

- применение излишне пластичной смеси, вследствие чего при уплотнении выделяется на поверхности избыток раствора, обогащенного цементом и водой;
- использование загрязненных заполнителей, в результате чего в верхней части плиты скапливаются загрязняющие примеси;
- способ ухода, не соответствующий температурным условиям твердения бетона;
- бетонирование покрытия в дождливую погоду;
- использование хлористых солей для борьбы с гололедом;
- замораживание бетона до набора прочности менее 50 % от проектной;
- несоответствие прочности и морозостойкости бетона верхнего слоя фактическим напряжениям от механической нагрузки и климатических воздействий.

Очаговое шелушение – шелушение отдельных мест – свидетельствует о применении некоторых замесов бетонной смеси низкого качества или об отсутствии должного ухода на локальных участках дороги.

Шелушение вдоль поперечных и продольных кромок цементобетонных плит, помимо указанных выше общих причин, может быть следствием скопления влаги у швов при наличии превышений в стыках смежных плит. Верхний слой насыщается водой, при ее замерзании участки вдоль кромок плит интенсивно разрушаются. Шелушение вдоль швов вызывается также повышенными динамическими нагрузками из-за уступов в стыках смежных плит.

Разрушение поверхности покрытия (на глубину 5–20 мм) возникает по тем же причинам, что и шелушение. Переход шелушения в стадию разрушения происходит из-за запаздывания с ремонтом. Разрушение покрытия на глубину более 20 мм с выкрашиванием крупного заполнителя, оголением арматуры называют послойным. При движении транспортных средств по неровному покрытию возникают дополнительные нагрузки. В сочетании с уменьшенным сечением плиты это приводит к её преждевременному разрушению. Отмечено, что участки покрытий с разрушенной поверхностью подвержены интенсивному обледенению в зимний период.

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

Выбоины на цементобетонном покрытии имеют глубину до 50–70 мм и произвольные очертания в плане. Их площадь составляет 0,25–2,0 м². **Раковины** отличаются от выбоин меньшей площадью разрушения (до 0,25 м²). Выбоины и раковины, как правило, – результат применения отдельных замесов бетонной смеси низкого качества или попадания загрязненного и неморозостойкого заполнителя, плохого уплотнения отдельных участков покрытия.

Трещины – самый распространенный вид разрушения. Они разнообразны по происхождению, характеру распространения, ширине раскрытия и глубине. Трещины образуются из-за появления в плитах напряжений, превышающих предел прочности бетона на растяжение. Такие напряжения могут возникнуть в результате интенсивной усадки бетона при твердении, проездов автомобилей с нагрузкой выше расчетной, снижения прочности основания, значительной неоднородности бетона по прочности и т. д.

Усадочные трещины – мелкая густоразвитая сетка трещин на отдельных участках плит со стороной ячейки 20–40 мм, шириной раскрытия до 0,1 мм и глубиной до 5 мм. Возможно их раскрытие до 1,5 мм (при глубине до 30 мм). Усадочные трещины появляются в начальный период твердения бетона (первая группа) или спустя несколько лет (вторая группа). В начальный период трещины образуются из-за расслоения бетонной смеси, применения загрязненных заполнителей, нарушения режима ухода за бетоном, укладки смеси в сухую жаркую погоду без специальных мер защиты. В процессе эксплуатации покрытия сетка трещин образуется вследствие капиллярной усадки, вызванной попеременным увлажнением и высушиванием верхнего слоя и карбонизации бетона [23].

Первая группа трещин может быть устранена технологическими приемами (применение нерасплаивающихся смесей, улучшение условий твердения бетона и т. д.). Для предупреждения трещин второй группы необходимо использование бетона повышенной плотности и прочности на всю толщину плиты или для верхнего слоя плит. Усадочные трещины ведут к появлению шелушения и разрушению верхнего слоя бетона.

Поперечные и продольные одиночные сквозные трещины со значительной шириной раскрытия (до 5 мм) по происхождению мож-

но разделить на технологические, силовые и трещины коробления. Технологические трещины появляются через 1–3 сут после бетонирования покрытия в результате температурных напряжений, превышающих прочность бетона на растяжение к этому сроку. Предотвратить такие трещины можно своевременной нарезкой пазов швов в сочетании с мерами по уменьшению температурного перепада по толщине плиты за счет укрытия твердеющего бетона термоизоляционным слоем. Расстояние между технологическими трещинами – 5–25 м (в зависимости от толщины плиты, свойств бетона, величины температурного перепада, процента армирования плиты).

К технологическим относят трещины, образующиеся вдоль швов расширения из-за смещения деревянной прокладки или нарезки паза в стороне от нее, нарезки пазов на недостаточную глубину.

Силовые сквозные трещины формируются при недостаточной прочности бетона, основания и подстилающих грунтов, а также при эксплуатации автомобилей, нагрузка от которых превосходит несущую способность дорожной одежды. Трещины могут появиться в результате многократного воздействия нагрузок, не превышающих допустимые.

Трещины коробления образуются на расстоянии 1–2 м от швов. Они характерны для районов со значительным колебанием суточных температур воздуха. Коробление плиты (см. рис. 1.3) может привести к отрыву ее концов от основания. При приложении в этот момент внешней нагрузки появляются трещины. Аналогичные трещины могут возникать при разуплотнении или частичном вымывании основания под швом, а также при значительном накоплении остаточных деформаций в основании. В этом случае нарушается контакт плиты с основанием и несущая способность покрытия резко снижается.

Трещины от просадки основания (сквозные поперечные и продольные) делят плиту на отдельные части. Эти трещины раскрываются на 5–6 мм, иногда наблюдается поднятие отдельных частей плит. Для устранения этого дефекта необходимо вскрывать покрытие и восстанавливать несущую способность основания.

При усилении покрытий в новом слое могут появиться дефекты нижнего слоя. Эти трещины называют отраженными. Трещины заземления являются продолжением поперечного шва на смежной пли-

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

те соседнего ряда, если не совпадают швы по ширине покрытия, или продолжением трещины с одного ряда плит на другой. Они возникают, если отсутствует свободное взаимное перемещение смежных плит в продольном направлении из-за неудовлетворительного состояния продольного шва (шов засорен, искривлен и т. д.).

Сквозные трещины существенно снижают несущую способность и долговечность покрытия, нарушают его ровность, способствуют переувлажнению основания и подстилающих грунтов (см. п. 1.3). Засорение трещин приводит к сколу их кромок.

Разрушение кромок плит происходит в результате засорения пазов швов и больших трещин твердыми посторонними частицами, кусочками бетона, щебня, песка. При повышении температуры пазы швов закрываются и находящиеся в них твердые частицы скалывают кромки бетона. Причиной разрушения кромок могут быть и механические нагрузки при недостаточной прочности плит вдоль швов, и наличие уступов между смежными плитами. Своевременная очистка [24] и заливка пазов, заделка трещин предотвращают разрушение кромок цементобетонных плит.

Отколы краев плит происходят вдоль поперечных швов расширения и сжатия, продольных швов при наличии шпунтового соединения. В зоне швов расширения отколы проявляются в первый сезон эксплуатации покрытий и, как правило, являются результатом нарушения технологии устройства швов: доски в швах установлены с отклонением от горизонтальной и вертикальной плоскостей, пазы не совпадают с фактическим положением досок; швы нарезаны в стороне от доски; доски установлены с перерывами по ширине плит и т. д.

Отколы краев плит вдоль швов расширения и сжатия возникают также вследствие установки штырей со смещением в вертикальной и горизонтальной плоскостях. При температурных деформациях плит и приложении внешней нагрузки штыри, расположенные с перекосом, создают дополнительные скалывающие напряжения, которые приводят к образованию трещин вдоль штырей и отколам бетона.

Отколы углов плит достигают 40–120 см по гипотенузе и формируются в результате снижения несущей способности основания или отрыва углов плит от основания при значительном суточном перепаде температур. Предупреждение отколов достигается оптимизацией раз-

меров плит (в соответствии с климатическими условиями), устройством швов коробления, исключением размывания основания.

Вертикальные смещения плит в стыках достигают 15–20 мм и более. Основными причинами являются: неравномерная осадка основания при недостаточном уплотнении слоёв грунта земляного полотна и дорожной одежды или неодинаковой их толщине на небольших по протяжению участках; разуплотнение основания вследствие попадания воды через открытые швы; пучение грунтов земляного полотна; накопление необратимых деформаций в основании.

Вертикальные смещения смежных плит снижают долговечность покрытия из-за дополнительных напряжений, возникающих в бетоне покрытия и в основании дорожной конструкции от динамических нагрузок, сокращают срок службы автомобильных шин.

Местные неровности покрытия – поперечные волны, располагающиеся на расстоянии около 2 м друг от друга по длине плиты, замкнутые «блюдца» глубиной до 15 мм и выпуклости высотой до 10–20 мм.

Образование волн является следствием применения деформированных рельс-форм при строительстве покрытия, перемещения гладкого колеса бетоноотделочной машины по плохо очищенному готовому покрытию; использования излишне жесткой бетонной смеси. Впадины и выпуклости появляются при неравномерном распределении бетонной смеси перед бетоноотделочной машиной.

В 1972–1974 гг. обширные исследования состояния цементобетонных дорожных покрытий на дорогах Сибири были предприняты Омским филиалом СоюздорНИИ [25]. Было выявлено, что прочность бетона в основном соответствует проектной. Длина плит монолитных покрытий изменяется от 4 до 9 м, наиболее часто применяют плиты длиной 6 м. На покрытиях с дискретным основанием возникает значительно больше деформаций, чем на покрытиях с укрепленным основанием. Количество деформаций возрастает с увеличением длины плит. Наиболее характерны поперечные и продольные трещины. Поперечные трещины и околы углов, как правило, расположены на расстоянии 20–40 см от швов. Этот тип разрушения наиболее типичен для покрытий, построенных на дискретных основаниях.

Количество поперечных трещин в средней части плиты, независимо от типа основания, возрастает с увеличением ее длины. Величина

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

максимального раскрытия трещин в весенне-летний период – 2–3 мм. Величина уступов между смежными плитами на покрытиях с песчаным основанием составляет 3–12 мм, а при цементогрунтовом основании не превышает 5 мм.

Шелушение поверхности не является характерным видом деформации покрытий из монолитного бетона. Ровность монолитных покрытий удовлетворительная.

Практика эксплуатации дорог выявила ряд существенных недостатков цементобетонных покрытий: быстрое разрушение защитного слоя бетона и обнажение арматуры (в результате выходят из строя шины автомобилей); выколы бетона практически не поддаются лечению из-за плохого сцепления между старым и новым слоями бетона. Следует отметить низкую ремонтпригодность жестких дорожных одежд в целом.

Цементобетонные покрытия, построенные в условиях Сибири по типовым проектам без учета особенностей воздействий природно-климатических факторов (в первую очередь температурных воздействий), привели к их чрезмерным деформациям и разрушениям. Так, срок службы монолитных армированных покрытий на карьерах Якутии не превышал 3 лет. Причинами разрушения были низкое качество цементобетона, неравномерные осадки грунтов основания, значительные температурные деформации плит [26].

Сквозные трещины служат очагом разрушения всей дорожной одежды, этот дефект наиболее характерен для покрытий на территории Сибири.

Анализ опыта применения цементобетонных покрытий на автомобильных дорогах показывает, что их повреждения и дефекты во многом зависят от недостаточного учета особенностей эксплуатации. В свете этого необходимым условием обеспечения долговечности жестких дорожных одежд является тщательное проектирование, поскольку допущенные на данной стадии ошибки практически невозможно исправить в дальнейшем.

Для нежестких дорожных одежд наиболее характерны износ поверхности, волны, выбоины, колеи, сквозные проломы, просадки. В табл. 1.1 приведена классификация дефектов нежестких дорожных одежд по ОДН 218.1.052–2002 [27]. Каталог дефектов, возникающих

Конструирование и расчет дорожных одежд

при содержании конструктивных элементов автомобильных дорог, приведён в работе [28].

Таблица 1.1

Дефекты, характерные для нежестких дорожных одежд

Вид дефекта	Характерные особенности дефекта
А. Дефекты прочностного характера	
Трещины: одиночные	Поперечные и косые трещины, расположенные на расстоянии более 15–20 м друг от друга
отдельные	Поперечные и косые трещины, расположенные примерно на одинаковом расстоянии друг от друга. Расстояние между соседними трещинами – 10–15 м
редкие	Поперечные и косые трещины (нередко с ответвлениями), не связанные между собой. Среднее расстояние между соседними трещинами – 4–10 м
частые	Поперечные и косые трещины с ответвлениями, иногда связанные между собой, но, как правило, не образующие замкнутых фигур. Среднее расстояние между соседними трещинами – 1–4 м
Сетка трещин	Поперечные и продольные трещины, развитые в зоне полос наката и образующие замкнутые, преимущественно четырехугольные фигуры с расстоянием между сторонами менее 1 м. Нередко сопровождаются просадками, колеиностью и волнообразованием
Колеиность	Плавное искажение поперечного профиля дорожного покрытия, локализованное вдоль полос наката. На покрытиях, устроенных с применением вяжущих, обычно сопровождается продольными трещинами и сеткой трещин
Просадки	Резкое искажение профиля покрытия, имеющее вид впадины с округлыми краями. На покрытиях, устроенных с применением вяжущих, просадки сопровождаются сеткой трещин, нередко охватывающей также и зоны покрытия, непосредственно к ним прилегающие
Волны	Закономерное чередование (через 0,5–2,0 м) на покрытии впадин и гребней в поперечном направлении по отношению к продольной оси дороги. Как правило, имеют место на дорогах с переходными типами покрытий

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

Окончание табл. 1.1

Вид дефекта	Характерные особенности дефекта
Б. Дефекты, обусловленные влиянием нарушений в технологии производства работ	
Проломы	Полное разрушение дорожной одежды на всю ее толщину с резким искажением профиля покрытия
Выкрашивание и шелушение	Поверхностные разрушения покрытия за счет потери отдельных зерен минерального материала и отслаивания вяжущего
Выбоины	Местные разрушения дорожного покрытия, имеющие вид углублений с резко выраженными краями
Сдвиги	Смещение покрытия, наблюдающееся обычно на крутых спусках, в местах остановок и торможения автомобилей. Иногда в местах сдвига наблюдаются разрывы покрытия

1.5. Влияние состояния дорожной одежды на показатели работы автомобильного транспорта

Скорость движения автомобилей, их пробег до капитального ремонта, расход топлива, износ шин, а в конечном итоге и себестоимость перевозок находятся в прямой зависимости от прочности и ровности дорожной одежды, коэффициента сцепления колеса с покрытием.

В процессе эксплуатации дороги под влиянием движения автомобилей и природно-климатических условий происходит постепенное снижение ровности покрытия, которое обычно связано с появлением различных необратимых деформаций дорожной одежды. Такие деформации большей частью возникают вследствие недостаточной прочности одежды в тех или иных местах.

Многолетние исследования, проведенные в Харьковском автомобильно-дорожном институте (ХАДИ) под руководством профессора А.К. Бирули и других, позволили выявить взаимосвязь между прочностью дорожной одежды, ровностью покрытия и скоростью движения потока автомобилей (табл. 1.2) [10, 11].

Взаимосвязь прочности дорожной одежды с ровностью покрытия и скоростью движения автомобильного потока

Показатель	Общее состояние дороги				
	Хорошее и удовлетворительное	Частые трещины и сетка трещин	Сетка трещин и отдельные разрушения	Частые разрушения	Практически сплошное разрушение
Степень разрушения, % по площади	0–15	15–35	35–50	50–70	> 70
Коэффициент прочности, $K_{пр}$	1	1–0,85	0,85–0,8	< 0,48	–
Ровность покрытия по показателям толчкомера на легковом автомобиле, см/км	< 300	300–1000	> 1000	–	–
Ровность покрытия по показателям толчкомера на грузовом автомобиле, см/км	< 100	100–700	700–1200	> 1200	–
Средняя скорость потока, км/ч	80–55	55–35	35–25	25–20	< 20
Надежность дорожной одежды по прочности	1–0,85	0,85–0,65	0,65–0,5	0,5–0,3	0,3

В табл. 1.2 коэффициент прочности вычислен как отношение среднего фактического модуля упругости дорожной одежды в период ее наибольшего ослабления к требуемому модулю упругости.

Наличие достаточно устойчивой связи между скоростью потока, ровностью и прочностью дорожной одежды позволяет принимать в качестве одного из основных критериев расчета модуль упругости дорожной одежды. С другой стороны, обеспечение требуемой прочности дорожной одежды гарантирует достаточную ровность и заданную скорость движения.

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

На эффективность работы автомобильного транспорта значительное влияние оказывает также тип дорожной одежды. В табл. 1.3 приведены обобщенные данные А.К. Бирули и С.И. Миховича [10], иллюстрирующие эту зависимость.

Таблица 1.3

Зависимость эффективности работы автомобильного транспорта от типа дорожной одежды [10]

Тип покрытия	Показатель ровности при удовлетворительном состоянии одежды, см/км	Коэффициент сопротивления движению	Относительные значения				
			Техническая скорость	Расход топлива	Износ шин	Межремонтный пробег	Суммарные эксплуатационные расходы
Асфальтобетонное	50–150	0,015	1	1	1	1	1
Цементобетонное	75–150	0,02	1	1,02	1,3	1	0,9
Битумощебеночная смесь с поверхностной обработкой	100–200	0,03	0,95	1,05	1,25	0,95	1,3
Необработанное гравийное	300–400	0,03–0,05	0,75	1,1–1,2	1,4	0,8	1,6
Сухая грунтовая профилированная дорога	100–300	0,03–0,06	0,7–0,8	1,2	1,0	0,7–0,8	1,8–2,0
Булыжная мостовая	300–500	0,05–0,07	0,6	1,3	1,4	0,6	1,8

Несмотря на наличие устойчивой связи между ровностью покрытия и прочностью нежесткой дорожной одежды (см. табл. 1.2), не следует считать, что ровность не может быть самостоятельным

критерием качества дорожного покрытия. Иногда по тем или иным причинам на вновь построенной дороге ровность покрытия оказывается недостаточной даже при прочной одежде. Одна из основных причин этого – несовершенство технологий устройства дорожных одежд. Большое значение имеют также несовершенство используемых машин и нарушение технологии работ. Действующие нормативные методики проектирования дорожных одежд [1–3], к сожалению, не предусматривают расчет по критерию ровности, хотя соответствующие исследования ведутся [29, 30].

Важнейшая характеристика транспортно-эксплуатационного состояния дороги – скользкость дорожного покрытия, критерием которой является коэффициент сцепления. Недостаточное сцепление шины колеса с покрытием нередко становится причиной дорожно-транспортных происшествий с тяжелыми последствиями [17, 31].

Величина коэффициента сцепления определяется, прежде всего, шероховатостью покрытия [32, 33], однако при неблагоприятных дорожных условиях (обледенение, сильное загрязнение) она может резко уменьшаться независимо от качества поверхности проезжей части.

Коэффициент сцепления нормируют в зависимости от условий движения и особенностей отдельных участков дорог [34]. Многочисленные исследования показывают, что основная часть дорожно-транспортных происшествий, обусловленных недостаточным сцеплением колеса с покрытием, происходит при величине коэффициента сцепления на влажном покрытии менее 0,45, поэтому это значение принято в качестве минимально допустимого [Там же]. Покрытия с величиной коэффициента сцепления более 0,6 по этому условию практически безопасны.

Высокие сцепные качества покрытия обеспечивают подбором устойчивых против шлифования материалов заполнителя для покрытий, а также созданием повышенной шероховатости и др. [32, 33]. Обеспечивая безопасность движения, эти мероприятия увеличивают сопротивление качению, что с точки зрения экономичности работы автомобиля является нежелательным. С другой стороны, чем меньше деформируемость дорожной одежды (больше эквивалентный модуль упругости), тем меньше сопротивление качению. Таким образом, переход к более совершенным типам покрытия, даже с повышенной ше-

1. Работа дорожных одежд автомобильных дорог

роховатостью, в любом случае будет способствовать снижению сопротивления качению.

Отметим, что на безопасность движения значительное влияние также оказывают ровность и поврежденность покрытия [31]. Подробно влияние состояния дорог на показатели работы автотранспорта рассмотрено в работе [35].

Серьезной проблемой дорожных одежд переходного и низшего типов является их повышенная пылимость. Загрязнение воздуха дорожной пылью наносит вред здоровью человека, оказывает пагубное воздействие на растительный и животный мир.

При наличии пыли резко ухудшаются условия видимости, что часто становится причиной дорожно-транспортных происшествий с тяжелыми последствиями. Пыль обуславливает существенное ухудшение транспортно-эксплуатационных показателей, главным образом пропускной способности дорог, скорости движения автомобилей. Усиливается износ двигателей, возрастают затраты на обеспечение должного технического состояния транспортных средств. Особенно сложны условия движения при запыленности ночью.

При большой запыленности воздуха не только усложняется организация движения, но и создаются тяжелые условия для эксплуатации автомобилей. Так, одной из причин перегрева двигателей и заклинивания поршней в цилиндрах является наружное загрязнение радиаторов пылью. Из-за пыли возникают отказы систем питания, электрооборудования и смазки [36].

Контрольные вопросы по разделу 1

1. Что понимают под терминами «долговечность» и «надёжность» автомобильной дороги и её элементов: дорожной одежды, земляного полотна, искусственных сооружений?
2. Назовите показатели, характеризующие долговечность дорожной одежды.
3. Назовите критерии, характеризующие надёжность дорожной одежды автомобильной дороги.
4. Охарактеризуйте понятие «отказ» дорожной одежды.
5. Приведите сведения, характеризующие понятие «работоспособность дорожной одежды».

Конструирование и расчет дорожных одежд

6. Назовите факторы, влияющие на работоспособность дорожной одежды.
7. Приведите три характерных этапа эксплуатации дорожных конструкций автомобильных дорог.
8. Назовите элементы динамического воздействия транспортных средств на дорожную конструкцию.
9. Приведите результаты воздействия природных и климатических факторов на работу эксплуатируемых дорожных одежд.
10. Перечислите природные и климатические факторы, воздействующие на эксплуатируемые дорожные конструкции.
11. Какие деформации происходят в слоях дорожных конструкций при сезонных изменениях погоды (промерзание и оттаивание грунтов земляного полотна)?
12. Что понимают под расчётным периодом эксплуатации автомобильных дорог в годовом цикле водно-тепловых процессов?
13. Какова роль воды в надёжной эксплуатации автомобильных дорог?
14. Перечислите виды деформаций покрытий дорожных одежд, возникающих под воздействием природно-климатических условий.
15. Как классифицируют повреждения покрытий дорожных одежд?
16. Назовите основные причины повреждений, наблюдаемых на эксплуатируемых автомобильных дорогах.
17. В чём отличие понятий «дефект» и «повреждение»?
18. Перечислите показатели, характеризующие эффективность работы транспортных средств, пользователей автомобильных дорог.
19. Назовите показатели, характеризующие состояние покрытий дорожных одежд.
20. Продемонстрируйте на примерах связь состояния покрытия дорожной одежды и эффективной работы средств автомобильного транспорта.

2. КОНСТРУИРОВАНИЕ ДОРОЖНЫХ ОДЕЖД

2.1. Назначение конструкций дорожных одежд и основные требования, предъявляемые к ним

Дорожная одежда – многослойная конструкция в пределах проезжей части автомобильной дороги, воспринимающая нагрузку от автотранспортного средства и передающая её на грунт. Дорожные одежды классифицируют по типам исходя из их капитальности [12, 37]. По мнению проф. Ю.М. Ситникова [35], дорожная одежда и земляное полотно с дренажными, удерживающими и укрепительными конструктивными элементами составляют дорожную конструкцию.

Конструкция дорожной одежды, как и любое инженерное сооружение, должна быть достаточно надежной, экономичной, технологичной и соответствовать определенным эксплуатационным требованиям.

Под надежностью дорожной одежды понимают ее способность обеспечивать безопасное расчетное движение со средней скоростью, близкой к оптимальной, в течение нормативного или заданного срока службы (см. п. 1.1). *Надежность* – комплексный показатель, зависящий от прочностных показателей материалов слоев, их морозоустойчивости, истираемости, свойств грунта земляного полотна и т. д.

Поскольку дорожные одежды являются одним из наиболее дорогих элементов автомобильных дорог, их экономичность в значительной степени определяет строительную стоимость объекта в целом и эффективность капиталовложений в него.

Технологичность – свойство, позволяющее в процессе строительства использовать наиболее экономичные технологические приемы и процессы без снижения качества продукции.

Основные эксплуатационные требования к дорожной одежде:

- достаточная прочность независимо от сезонного изменения режима увлажнения земляного полотна;
- ровность покрытия, обеспечивающая безопасное и комфортное для пассажиров движение автомобилей с расчетными скоростями;
- повышенная шероховатость покрытия, обеспечивающая эффективное торможение автомобилей в случае экстренной необходи-

Конструирование и расчет дорожных одежд

мости, а также безопасное движение (без заносов) с расчетными скоростями;

- беспыльность, т. к. пыль ухудшает видимость, создает дискомфорт для водителей и пассажиров, снижает срок службы двигателей и т. д.;

- отсутствие продуктов износа покрытия, вредных для здоровья людей, животных и растений;

- радиационная безопасность используемых строительных материалов.

Необходимо обратить внимание на следующее обстоятельство. С 2003 г. вступил в силу Федеральный закон «О техническом регулировании», в котором зафиксировано, что обязательные для применения и использования требования к объектам технического регулирования (в том числе к инженерным сооружениям) устанавливаются техническими регламентами.

Технические регламенты принимают в целях:

- защиты жизни или здоровья граждан, имущества физических или юридических лиц, государственного или муниципального имущества;

- охраны окружающей среды, жизни или здоровья животных и растений;

- предупреждения действий, вводящих в заблуждение приобретателей.

Со дня вступления в силу Федерального закона «О техническом регулировании» впредь, до вступления в силу соответствующих технических регламентов, требования к продукции (в том числе к дорожным одеждам), установленные нормативными правовыми актами Российской Федерации и нормативными документами федеральных органов исполнительной власти (например, Госстроя России, Минтранса России), подлежат обязательному исполнению только в части, соответствующей указанным выше целям. Для дорожных одежд это требования к величине удельной эффективной активности естественных радионуклидов строительных материалов, коэффициенту сцепления шин автомобилей с поверхностью покрытия.

Для правильного понимания и выполнения требований регламентов предусмотрены стандарты (предварительные национальные, национальные, организаций, международные), которые устанавлива-

2. Конструирование дорожных одежд

ют характеристики продукции, правила осуществления процессов и т. д. Стандарты разрабатывают для добровольного многократного использования. Госстандарт России (выполнял функции национально-го органа Российской Федерации по стандартизации) постановил признать национальными стандартами действующие государственные и межгосударственные стандарты, введенные в действие до 1 июля 2003 г. При этом решено сохранить условные обозначения «ГОСТ» и «ГОСТ Р». Впредь до вступления в силу соответствующих технических регламентов применение действующих государственных и межгосударственных стандартов будет осуществляться в добровольном порядке (за исключением обязательных требований, обеспечивающих достижение целей законодательства Российской Федерации о техническом регулировании).

2.2. Конструктивные слои, классификация дорожных одежд

Воздействие нагрузки, приложенной к поверхности покрытия, уменьшается по толщине конструкции вследствие распределяющей способности материалов слоев. Это позволяет проектировать дорожную одежду многослойной, используя в отдельных слоях материалы различной прочности в соответствии с действующими усилиями и интенсивностью влияния природных факторов [15].

Теоретические и экспериментальные исследования функционирования дорожных одежд дают возможность выделить в них три конструктивные зоны [38, 39]:

1. Слой износа, к которому предъявляют требования шероховатости, износостойкости, ровности, сдвигустойчивости. Этот слой по мере его истирания периодически восстанавливают. В расчетах на прочность он не учитывается.

2. Покрытие, толщина которого в зависимости от величины транспортной нагрузки составляет 8–15 см. В данной зоне действуют значительные вертикальные и горизонтальные напряжения.

3. Основание дорожной одежды, которое предназначено для распределения давления на грунт. Величина напряжений от транспортной нагрузки в этой зоне относительно быстро уменьшается. При

неблагоприятных водных, грунтовых и климатических условиях устраивают дополнительный слой основания. Он выполняет функции морозозащитного, дренажного и т. д. слоев.

В технической литературе можно встретить несколько иное определение для конструктивных слоёв дорожной одежды (например, [7]):

Покрытие – верхняя часть дорожной одежды, состоящая из одного или нескольких единообразных по материалу слоёв, непосредственно воспринимающая усилия от колёс транспортных средств и подвергающаяся прямому воздействию атмосферных агентов. По поверхности покрытия могут быть устроены слои поверхностных обработок различного назначения.

Основание – часть конструкции дорожной одежды, расположенная под покрытием и обеспечивающая совместно с покрытием перераспределение напряжений в конструкции и снижение их величины в грунте рабочего слоя земляного полотна.

Дополнительные слои основания (морозозащитные, теплоизоляционные, дренажные и др.) – слои между основанием и верхом рабочего слоя земляного полотна, обеспечивающие морозоустойчивость и дренажирование дорожной конструкции, позволяющие снижать толщину вышележащих слоёв из дорогостоящих материалов.

Между основанием и покрытием при необходимости укладывают выравнивающий слой из обработанных вяжущими зернистых материалов, который в качестве конструктивного слоя одежды не рассматривается и в расчетах не учитывается.

Дорожные одежды сооружают на земляном полотне, верхняя часть которого носит название рабочего слоя [34].

Дорожная конструкция, кроме конструктивных слоев дорожной одежды, включает в себя обочины, разделительную полосу (на дорогах I категории), откосы (рис. 2.1). Для проектирования обочин рекомендовано использовать отраслевые дорожные нормы [40].

На обочинах и разделительной полосе с целью повышения безопасности движения и предотвращения разрушения кромок проезжей части устраивают укрепленные полосы (полосы с твердым покрытием, ограничивающие проезжую часть и отличающиеся от нее цветом или отделенные разметкой). Укрепленную полосу обочины называют также краевой полосой [15], краевой укрепительной полосой.

2. Конструирование дорожных одежд

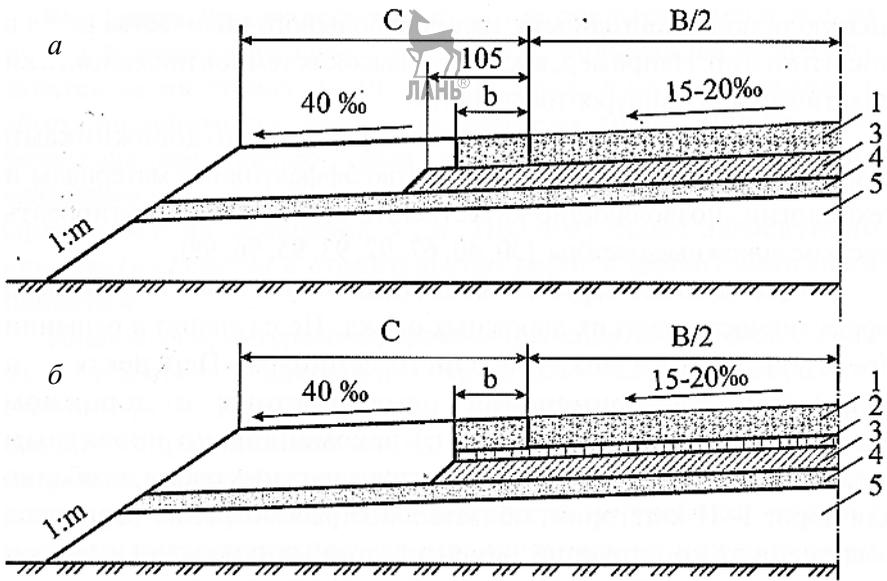


Рис. 2.1. Поперечный разрез типовых дорожных одежд с цементобетонным покрытием, устраиваемых комплектами машин:

а – со скользящими формами; б – с применением рель-форм; 1 – покрытие; 2 – выравнивающий слой; 3 – основание; 4 – дополнительный слой основания; 5 – земляное полотно; b – укрепленная полоса; C – обочина

По сопротивлению нагрузкам от автотранспортных средств и по реакции на климатические воздействия дорожные одежды принято подразделять на одежды с жёсткими покрытиями и слоями (*жёсткие дорожные одежды*) и на одежды с нежёсткими покрытиями и слоями основания (*нежёсткие дорожные одежды*). Их деление выполнено по механическим свойствам материала покрытия и основания.

Жёсткими считают одежды, у которых материал одного или нескольких слоев обладает сопротивлением изгибу и модулем упругости, практически не зависящим от температуры и влажности (см. п. 2.4). К ним относят одежды с цемнто- и железобетонными покрытиями и основаниями [41].

Нежёсткими называют одежды, прочность материалов слоев которых при изгибе и модуль упругости существенно зависят от тем-

Конструирование и расчет дорожных одежд

пературы и влажности (асфальтобетон и др.), или же одежды с несущими слоями, неспособными сопротивляться изгибу (щебень, гравийно-песчаные смеси и т. д.) [39].

Методы расчета жестких и нежестких дорожных одежд существенно различаются.

Типы дорожных одежд, основные виды покрытий и область их применения по [34] приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Тип дорожной одежды, вид покрытия и область их применения по СП 94.1330.2012

Типы дорожных одежд	Основные виды покрытий	Применяются в соответствии с пунктом СП
Капитальные	Цементобетонные монолитные	8.20; 8.27; 8.41
	Железобетонные или армобетонные сборные	8.22; 8.24
	Асфальтобетонные	8.42
Облегченные	Асфальтобетонные	8.42
	Из щебня, гравия и песка, обработанных вяжущими	8.43; 8.44
Переходные	Щебеночные и гравийные; из грунтов и местных малопрочных каменных материалов, обработанных вяжущими или армированных геосинтетикой	8.43–8.46
Низшие	Из грунтов, укрепленных или улучшенных добавками	8.43; 8.44

В графе три табл. 2.1 приведены следующие пункты, нашедшие отражение в СП 34.13330.2012:

8.20 – толщину бетонных покрытий назначают по расчёту с учётом вида оснований (для дорог I категории не менее 22 см, а для дорог II–III категорий – 20 см, при щебёночных и гравийных основаниях – 22 см);

2. Конструирование дорожных одежд

8.22 – покрытия из сборных железобетонных плит на автомобильных дорогах предусматривают для сложных природных условий или при высоких насыпях, когда трудно обеспечивать стабильность земляного полотна;

8.24 – конструкции дорожных одежд со сборным покрытием из железобетонных и армобетонных плит допускается принимать на основе технико-экономических обоснований в районах со сложными инженерно-геологическими, гидрогеологическими и климатическими условиями с учётом ГОСТ Р 54257;

8.41 – для цементобетонных покрытий и оснований следует принимать бетоны тяжёлый и мелкозернистый по ГОСТ 25192 и ГОСТ 26633;

8.43 – каменные материалы и грунты, обработанные неорганическими вяжущими, для покрытий и оснований должны соответствовать требованиям ГОСТ 23558;

8.44 – при устройстве оснований дорожных одежд по способу заклинки применяют щебень, отвечающий требованиям ГОСТ 8267, ГОСТ 3344 и ГОСТ 25607. При устройстве щебёночных слоёв допускают в качестве расклинивающего материала применять асфальтобетонные смеси, а также мелкозернистые щебёночно-песчаные смеси, обработанные цементом.

Классификация дорожных одежд и покрытий (например, по [2]) приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Тип дорожной одежды, вид покрытия по ОДН 218.046-01

Тип дорожной одежды	Вид покрытия	Материал и способ укладки
Капитальный	Усовершенствованное	Горячая асфальтобетонная смесь
Облегченный	То же	Горячая и холодная асфальтобетонные смеси. Органоминеральные смеси с жидкими органическими вяжущими, то же совместно с минеральными вяжущими; с вязкими, в том числе эмульгированными, органическими вяжущими совместно с минеральными

Тип дорожной одежды	Вид покрытия	Материал и способ укладки
Облегченный	То же	Каменные материалы и грунты, обработанные битумом смешением на дороге или методом пропитки; то же, обработанные органическими вяжущими методом пропитки. Черный щебень, приготовленный в установке и уложенный способом заклинки. Пористая и высокопористая асфальтобетонная смесь с поверхностной обработкой. Прочный щебень с двойной поверхностной обработкой
Переходный	Переходное	Щебень прочных пород по способу заклинки; грунты и малопрочные каменные материалы, укрепленные вяжущими; булыжный и колотый камень (мостовые)
Низший	То же	Щебеночно-гравийно-песчаная смесь; малопрочные каменные материалы и шлаки; грунты, укрепленные или улучшенные местными материалами; древесные материалы и др.

2.3. Задачи и принципы конструирования дорожных одежд

Основными документами при конструировании нежестких дорожных одежд на дорогах общего пользования являются СП 34.13330.2012, ПНСТ 265-2018 и рекомендации [1, 3, 34].

Проектирование дорожной одежды представляет собой единый процесс конструирования и расчета дорожной конструкции (системы «дорожная одежда – рабочий слой земляного полотна») на прочность, морозостойчивость и осушение с целью выбрать наиболее экономичный в данных условиях вариант на основе технико-экономического обоснования, обеспечивающий надёжную работу дорожной конструкции в межремонтный период [42].