

Министерство образования и науки Украины
ХАРЬКОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ
АВТОМОБИЛЬНО-ДОРОЖНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

В.А. ЗОЛОТАРЕВ

**ДОРОЖНЫЕ БИТУМНЫЕ ВЯЖУЩИЕ
И АСФАЛЬТОБЕТОНЫ**

Часть 2

ДОРОЖНЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОНЫ

Учебник

Харьков
ХНАДУ
2016

УДК 625.85.06
ББК 39.311
3 80

Рекомендовано к изданию Ученым Советом Харьковского национального автомобильно-дорожного университета (протокол № 8 от 24 апреля 2015 г.)

Рецензенты:

В.В. Мозговой, докт. техн. наук, профессор
(Национальный транспортный университет);

В.П. Сонов, докт. техн. наук, профессор
(Харьковский национальный университет строительства и архитектуры);

В.А. Псюрник, к.т.н., профессор
(Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет)

Автор:

Золотарев В.А., докт. техн. наук, профессор

Золотарев В.А.

3 80 Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны. Часть 2. Дорожные асфальтобетоны: учебник / В.А. Золотарев. – Харьков: ХНАДУ, 2016. – 204 с.: илл., табл.

ISBN

Изложены современные представления о составе, структуре, физико-механических, реологических и технологических свойствах и системах оценки качества дорожных асфальтобетонов различных типов, видов и назначения.

Учебник предназначен для студентов, обучающихся по специальности «Автомобильные дороги и аэродромы», аспирантов, обучающихся по специальности 05.23.05 – строительные материалы и изделия, для научных и производственных работников дорожной отрасли.

Викладено сучасні уявлення про структуру, склад, фізико-механічні, реологічні, технологічні властивості та системи оцінки якості дорожніх асфальтобетонів різних типів, видів і призначення.

Підручник призначено для студентів, які навчаються за спеціальністю «Автомобільні дороги та аеродроми», аспірантів, які навчаються за спеціальністю 05.23.05 – будівельні матеріали та вироби, для науковців та робітників-виробничників дорожньої галузі.

УДК 691.16:532.13 (082)
ББК 38.3

ISBN

© Золотарев В.А., 2016
© ХНАДУ, 2016

ВВЕДЕНИЕ

Интенсивное развитие автотранспортных перевозок вызывает необходимость в создании надёжных дорожных конструкций, в которых ведущую роль играют несущие слои дорожных одежд, представленные различными асфальтобетонами. Эффективность работы асфальтобетона в дорожной одежде зависит от соответствия его свойств транспортным и климатическим условиям эксплуатации. Установление такого соответствия осуществляется на стадии конструирования дорожной, а затем лабораторной оценкой качества асфальтобетона. В свою очередь система оценки качества асфальтобетонов предусматривает необходимость определения его физических, механических, реологических, технологических и эксплуатационных свойств. Номенклатура показателей качества назначается с учётом особенностей той или иной разновидности асфальтобетона.

В соответствии с этим в учебнике последовательно рассматривается сущность различных показателей качества асфальтобетонов, а затем технические и технологические свойства самих асфальтобетонов.

Он состоит из четырнадцати разделов.

Раздел 1 устанавливает общие представления об асфальтобетонах, асфальтобетонных смесях, их классификацию, требования к материалам.

Раздел 2 раскрывает особенности работы асфальтобетонов в дорожной конструкции, виды его разрушений, физико-механические свойства.

Разделы 3 и 4 посвящены структурообразованию и формированию технологических свойств асфальтобетонных смесей.

В разделе 5 и 6 рассматриваются физико-химические основы асфальтобетонов и технологии их производства.

Раздел 7 описывает реологические свойства, а также циклическую и статическую усталостность асфальтобетонов.

В разделе 8 освещаются факторы и механизмы старения асфальтобетонов.

Разделы 9, 10, 11, 12, 13 посвящены современным разновидностям смесей и асфальтобетонов.

Раздел 14 содержит сведения о санитарных и экологических особенностях асфальтовых технологий.

В основу учебника положены результаты исследований в области битумных вяжущих и асфальтобетонов, полученные в период с 1940 по 2016 годы научной школой профессора М.И. Волкова. В то же время в нём освещены достижения по этой теме многих отечественных научных коллективов и данные зарубежных исследователей.

Автор искренне благодарен к.т.н. Я.И. Пыригу, и к.т.н. А.В. Галкину за работу по подготовке учебника к изданию.

Автор также выражает признательность за ценные советы по подготовке учебника рецензентам – профессорам В.В. Мозговому, В.И. Сопову, В.А. Псюрнику.

1. АСФАЛЬТОБЕТОН – ОБЩИЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ, КЛАССИФИКАЦИЯ, ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ

1.1. Классификация асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов

Асфальтобетон – это монолитный материал, который образуется при достижении уплотненной асфальтобетонной смесью температуры окружающей среды.

Асфальтобетонная смесь – это рационально (специально) рассчитанная с целью обеспечения необходимой плотности асфальтобетона смесь каменных материалов – щебня, природного и/или искусственного песка, минерального порошка и битумного вяжущего, перемешанная при определенных температурах, для обеспечения максимально полного и равномерного покрытия битумным вяжущим поверхности каменных материалов.

Существует множество разновидностей асфальтобетона. Это обусловлено многообразием областей его применения по: климатическим условиям; интенсивности движения на дороге; напряженному состоянию; расположению в дорожной одежде.

В дорожном строительстве, как и в любой области знаний, науки и техники, существует устоявшаяся общепризнанная терминология, зная которую легче понять, изучать и направлено изменять свойства рассматриваемого объекта. Терминология развивается и совершенствуется по мере совершенствования науки и техники в данном случае в области дорог, дорожных конструкций, материалов и технологий.

Начиная с 1932 г, было создано несколько справочников по дорожной терминологии. Первый из них был создан коллективом авторов, в него входили выдающиеся ученые-дорожники А.К. Бируля и Н.И. Иванов, возглавлял – профессор Г.Д. Дубелир. Для облегчения восприятия излагаемого здесь материала целесообразно ознакомиться со следующими понятиями и терминами.

Дорожная одежда – многослойная конструкция в пределах проезжей части автомобильной дороги, воспринимающая нагрузку от автотранспортного средства и передающая ее на земляное полотно.

Дорожная одежда нежесткая – дорожная одежда, конструктивные слои которой представлены материалами на основе органических, главным образом, битумных вяжущих.

Дорожное покрытие – верхняя часть дорожной одежды, обеспечивающая эксплуатационно-транспортные свойства проезжей части и непосредственно воспринимающая воздействия транспортных средств и природно-климатических факторов. Оно состоит из верхнего слоя износа (качения), периодически возобновляемого в процессе эксплуатации, и, собственно, покрытия, к которому относится нижний слой покрытия и верхний слой основания.

Покрытие дорожное асфальтобетонное – покрытие капитального типа, построенное с применением плотных асфальтобетонных смесей.

Слой износа (качения) – верхний конструктивный слой покрытия, предназначенный для непосредственного восприятия воздействия колес автомобилей и природных факторов, усиливаемый или возобновляемый при среднем и капитальном ремонтах по мере его разрушения или износа.

Категория дороги – критерий, характеризующий народно-хозяйственное значение автомобильной дороги в общей транспортной сети страны и определяемый расчетной интенсивностью и скоростью движения по ней. В соответствии с категорией назначаются все технические параметры дороги.

Асфальтобетон является самым распространенным в мире дорожно-строительным материалом. Около 80 % всех верхних слоев дорожных одежд в мире устроено из асфальтобетона. Асфальтобетон применяют главным образом для создания верхних и нижних слоев покрытий, устройства верхних слоев оснований, слоев поверхностной обработки автомобильных дорог, городских дорог и тротуаров, взлетно-посадочных полос и магистральных рулёжных дорожек аэродромов, покрытий мостов (рис. 1.1).

Широкое распространение асфальтобетона обусловлено его долговечностью (стабильностью эксплуатационных свойств во времени) – продолжительность его службы в дорожной одежде может достигать 18–20 лет; технологичностью – приготовление смесей и устройство дорожных слоев отличается простотой; ремонтно-пригодностью – устранение дефектов покрытий осуществляется простыми способами с использованием доступных средств механизации; способностью к переработке и регенерации после длительного

срока службы; амортизирующей способностью, обеспечивающей комфортабельность движения автомобиля; устойчивостью к действию природных или техногенных агрессивных сред; гигиеничностью, обусловленной простотой содержания (очистки); экологичностью, обусловленной низкой энергоемкостью и, соответственно, низкими выбросами CO_2 на технологической стадии.

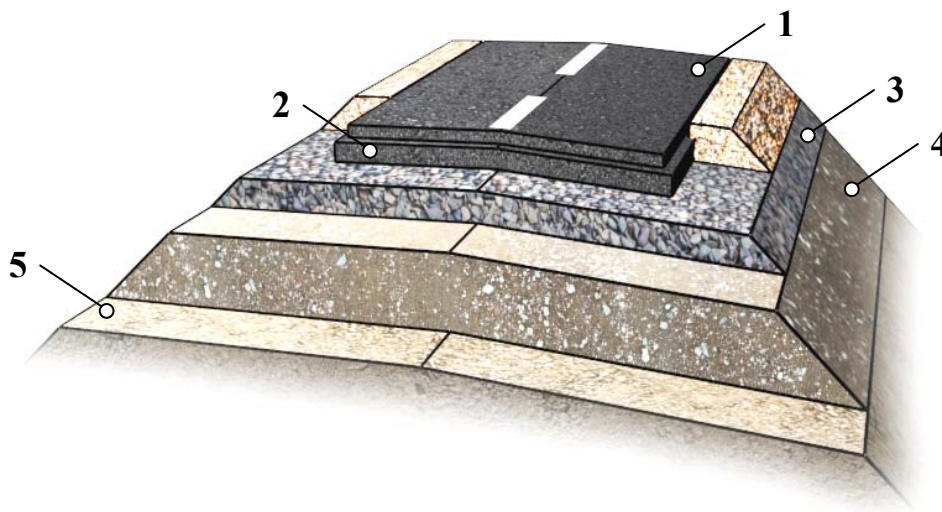


Рис. 1.1. Схема дорожной одежды нежесткого типа: 1 – верхний слой покрытия (слой качения)*, 2 – нижний слой покрытия (связующий слой), 3 – верхний слой основания (черный базовый слой), 4 – нижний слой основания, 5 – земляное полотно

В зависимости от области применения, условий эксплуатации дороги (климатических и транспортных), состава и свойств асфальтобетонны согласно ДСТУ Б В.2.7-119 делятся на классы, виды, группы, типы и марки.

По технологическим свойствам асфальтобетонные смеси могут быть уплотняемыми: *горячими* с использованием вязких дорожных битумов марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130 (приготавливаются при температурах 140–165 °С); *теплыми* на основе маловязких БНД 130/200 (БНД 200/300) дорожных битумов и вязких дорожных битумов с энергопонижающими добавками (приготавливаются при температурах 110–140 °С); *литыми*, содержащими большее количество высоковязких битумов с пенетрацией ниже $60 \times 0,1$ мм (приготавливаются при температуре близкой к 200 °С) или битумных эмульсий (приготавливаются при температуре окружающего воздуха); *холодными*, в качестве вяжущих в которых

* В скобках европейские названия слоев.

используют средне-, медленногустеющие жидкие битумы марок СГ или МГ 70/130, СГ или МГ 130/200 или битумные эмульсии (приготавливаются при температуре окружающего воздуха). Холодные смеси на основе битумов приготавливают при технологических температурах 85–120 °С, а хранят и укладывают при температуре окружающего воздуха.

По крупности минеральных зерен асфальтобетоны подразделяют на: крупнозернистые – с размером зерен до 40 мм; мелкозернистые – с размером зерен до 20 мм, песчаные – с размером зерен до 5 мм. Градация асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов по крупности существенно различается в разных странах. Важным, практически общепринятым, принципом, связанным с максимальной крупностью минеральных зерен, является нормирование соотношения между толщиной слоя дорожной одежды и размером зерна (d_3). Оно должно быть не менее $2,5 d_3$. Это связано с необходимостью плотной упаковки зерен в слое, которую нельзя обеспечить в случае меньшего соотношения.

Принципиальным критерием деления асфальтобетонов на группы является их *остаточная пористость*, характеризующаяся количеством в процентах по объему пор, оставшихся в асфальтобетоне после заполнения пор минеральной части смеси битумным вяжущим. По этому признаку асфальтобетоны делят на *плотные* с остаточной пористостью от 2 до 5 % по объему, *пористые* – 5–10 % и *высокопористые* – более 15 %. Границы такого деления могут меняться с изменением стандартов и технических условий на асфальтобетон, которые пересматриваются каждые 5 лет. Кроме того, остаточная пористость нормируется в зависимости от способа уплотнения смесей, принятого в той или другой стране.

По содержанию зерен щебня (крупнее 5 мм) на круглых ситах, начиная с 1967 г, выделяют четыре гранулометрических типа асфальтобетонов: *тип А* от 45 до 55 %; *тип Б* – от 35 % до 55 %; *тип В* – от 25 до 35 %; *тип Г* – песчаный асфальтобетон, не содержащий щебня и включающий не менее 75 % дробленых песчаных зерен; *тип Д* – *песчаный*, включающий не более 25 % дробленного искусственного дробленного песка. Кроме того, гранулометрический состав асфальтобетонов может быть *непрерывным* и *прерывистым*. При непрерывной гранулометрии зависимость содержания зерен от размера фракций изменяется плавно от максимального зерна до зерен размером 0,071 мм. В случае прерывистой грану-

лометрии на кривой, связывающей размер фракций и их содержание, есть участок постоянного значения проходов (или остатков), отвечающий размерам двух-трех фракций. Это означает, что этих фракций в смеси нет. Таким образом, преследуется цель получить большую плотность минерального остова асфальтобетона за счет того, что мелкие зерна полностью заполняют пространство между крупными зернами (рис. 1.2).

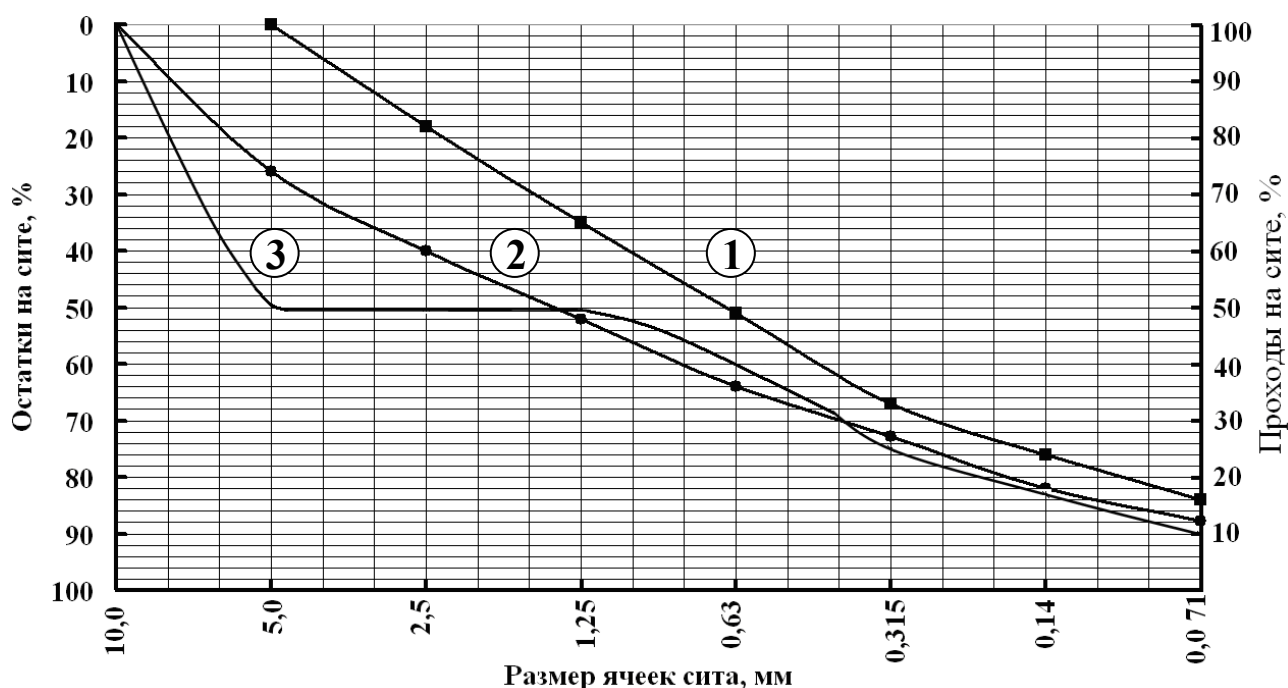


Рис. 1.2. Зерновые составы асфальтобетона: песчаного (1), мелкозернистого с непрерывной (2) и прерывистой (3) гранулометрией

В зависимости от качества используемых материалов асфальтобетоны могут делиться на две (Украина) или три (Россия) *марки*. При этом свойства асфальтобетона, установленные испытаниями, даже в случае их соответствия требованиям стандартов, не могут быть аргументом в пользу отнесения его к высокой марке, если качество материалов не отвечает требованиям, регламентированным для асфальтобетонов I марки. Это связано с тем, что низкое качество составляющих может негативно сказаться на свойствах асфальтобетона в покрытии. В то же время асфальтобетоны даже на качественных материалах, но обнаруживающие при испытаниях неудовлетворительные показатели свойств, должны быть отнесены к II марке. В разных странах существуют свои принципы распределения асфальтобетонов по маркам.

1.2. Требования к материалам для асфальтобетонных смесей

Гравий – осадочная горная порода, образовавшаяся естественным путем разрушения и накопления механических остатков скальных горных пород. Его зерна имеют размер от 5 до 80 мм, форма зерен окатанная, поверхность гладкая.

Щебень представляет собой смесь угловатых, с разной степенью шероховатости поверхности, обломков размером 5–70 мм, полученных в результате искусственного дробления скальных горных пород.

Щебень получают дроблением горных пород на фракции разной крупности. При этом если в Украине, России и Беларуси к щебню относят зерна размерами 40–20, 20–15, 15–10, 15–5, 10–5 (3) мм, отсеянные на ситах с *круглыми* отверстиями, то в странах ЕС зерна щебня рассеивают на ситах с *квадратными* ячейками. Набор размеров сит сыпучих минеральных материалов, применяемых в странах Европейского Союза и Восточно-европейских странах, представляет собой ряд: 0,063; 0,08; 0,10; 0,125; 0,160; 0,200; 0,25; 0,315; 0,400; 0,500; 0,630; 0,800; 1,00; 1,25; 1,60; 2,00; 2,50; 3,15; 4,00; 5,00; 6,30; 8,00; 10,00; 12,50; 16,00; 20,00; 25,00; 31,50; 40,00; 50,00; 63,00; 80,00 мм. Обычно размер фракций каменного материала назначается с учетом соотношения между ее большим и меньшим размером, близким к 1,58. Например: 1,6/1,0; 2,5/1,6; 4,0/2,5 или 1,25/0,8; 2,0/1,25; 3,15/2,0.

Качество щебня (табл. 1.1), оцениваемое по совокупности его свойств, взаимосвязано с маркой асфальтобетона и типами его гранулометрии. Для горячих асфальтобетонных *смесей I марки* используют щебень изверженных (гранит, сиенит, диорит, габбро, андезит, базальт, диабаз и др.) глубинных и излившихся, а также метаморфических горных (мраморы, кварциты и др.) пород марок по дробимости 1400, 1200 и 1000, а щебень из осадочных горных пород (известняки, доломиты, песчаники и др.) – марок 1200, 100, 800. Применяют также щебень из металлургических шлаков марок 1000 и 800 и из дробленого гравия. При этом количество дробленых зерен в щебне из гравия должно быть в зависимости от вида и марки асфальтобетона в пределах от 60 до 100 %.

Таблица 1.1

Показатели свойств щебня (извлечение из ДСТУ Б В.2.7-119)

Название показателей	Нормы для смеси и асфальтобетона марок, групп, классов, типов											
	Марка I для групп						Марка II для групп					
	Плотный для классов					Пористый и высокопористый; смесь горячая, тип	Плотный для классов					Пористый и высокопористый; смесь горячая, тип
	Горячая, тип			Холодная, тип			Горячая, тип			Холодная, тип		
	A ₁ , A	B ₁ , Б	В	Б	В	A-Б	A ₁ , A	B ₁ , Б	В	Б	В	A-Б
1. Марка щебня по дробимости при сжатии в цилиндре, не ниже: – из изверженных и метаморфических горных пород; – из осадочных горных пород; – из металлургических шлаков, не ниже	1200	1200	1000	1000	800	800	1000	1000	800	800	600	600
	1200	1000	800	800	800	600	1000	800	600	800	600	400
	1200	1000	800	1000	800	600	1000	800	600	800	600	600
2. Марка щебня по износу в полочном барабане, не ниже: – из изверженных и метаморфических горных пород; – из осадочных горных пород; – из металлургических шлаков	СТ-I	СТ-I	СТ-I	СТ-II	СТ-III	Не нормируют	СТ-II	СТ-II	СТ-III	СТ-III	СТ-IV	Не нормируют
	СТ-I	СТ-II	СТ-III	СТ-III	СТ-IV		СТ-II	СТ-III	СТ-IV	СТ-III	СТ-IV	
	СТ-I	СТ-I	СТ-II	СТ-II	СТ-II		СТ-I	СТ-II	СТ-III	СТ-III	СТ-IV	
3. Марка по морозостойкости для всех видов щебня, не ниже: а) в районах* А-1, А-2, А-3, А-6 и в Крымских горах (А-7); б) в районах А-4, А-5, А-7	F 50	F 50	F 50	F 50	F 50	F 25	F 50	F 50	F 25	F50	F 25	F 15
	F 25	F 25	F 25	F 25	F 25	F 25	F 25	F 25	F 15	F 15	F 15	F 15

Примечание: *районирование Украины по климатическим условиям работы асфальтобетона в покрытии (см. рис. 1.10).

Для *асфальтобетонов II марки* применяют щебень из изверженных горных пород марок по дробимости 1000 и 800; щебень из осадочных горных пород марок 1000, 800 и 600; щебень из металлургических шлаков марок 1000, 800 и 600; дробленый гравий марок 1000, 800 и 600.

Сравнение требований к маркам щебня по дробимости в цилиндре показывает, что марка щебня для асфальтобетонов I марки должна быть на 20 МПа выше, чем для асфальтобетонов II марки. Подобный подход принят и в отношении марки щебня по износу в полочном барабане.

Прочность щебня по дробимости означает соответствие его прочности горной породы, из которой он получен, поскольку марку по дробимости назначали путем сопоставления прочности горной породы, установленной при испытаниях на сжатие образцов горной породы цилиндрической или кубической формы с количеством подробившихся зерен фракций определенных размеров из этой породы. Повышенная прочность щебня обеспечивает сохранение зернового гранулометрического состава асфальтобетона при уплотнении смесей в покрытии и в процессе эксплуатации под интенсивным и тяжелым движением транспортных средств.

В странах ЕС марку щебня по дробимости определяют в барабане Лос-Анджелеса (рис. 1.3), а сопротивление износу – в барабане Деваля (рис. 1.4). Его отличие от полочного барабана заключается в том, что испытание проводят в водной среде.

Показатель износа щебня позволяет предсказать и предупредить износ асфальтобетонного покрытия по полосе наката с сопутствующим этому образованием колеи износа, что характерно для автомагистралей* (категории I, а) и грузонапряженных межгосударственных и государственных дорог, а также при использовании пневмошин с шипами. Износ щебня зависит от твердости слагающих пород и минералов, из которых он получен. Так, в граните преобладают минералы с твердостью по шкале Мооса: кварц – 7,0; полевые шпаты (ортоклазы и плагиоклазы) – 6,0–6,5. Породообразующим минералом известняков и мрамора является кальцит с твердостью 3, а доломитов – доломит с твердостью 3–4.

* Автомагистраль – дорога высокой пропускной способности для скоростного движения автомобилей с проезжими частями в противоположных направлениях движения, разделенными полосой, и не имеющая пересечений с другими путями одного уровня.

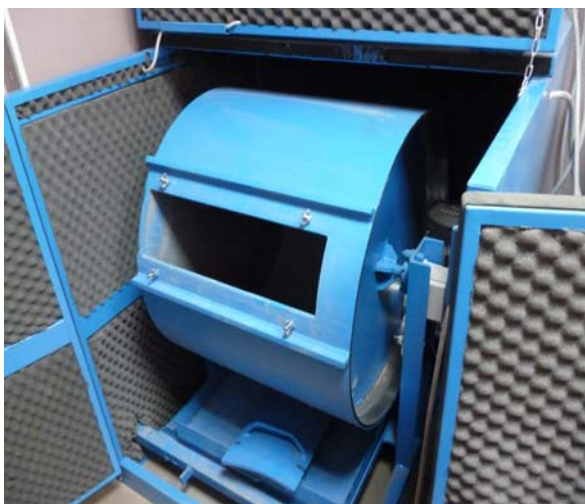


Рис. 1.3. Барабан Лос-Анджелес

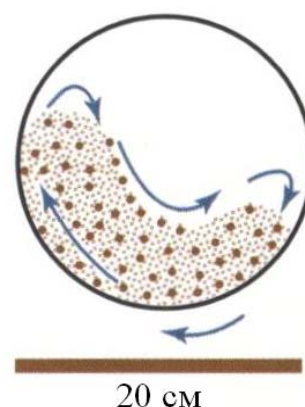


Рис. 1.4. Испытательная установка
Микро-Деваль

С целью предупреждения скользкости покрытия в странах ЕС, кроме этих показателей прочностных свойств щебня, определяют также полируемость его зерен (рис. 1.5). Высокая *полируемость* зерен щебня, выступающих на поверхность дорожного покрытия после непродолжительного времени службы под интенсивным движением, может привести к формированию скользкой поверхности дороги, что в свою очередь может стать причиной транспортных происшествий из-за удлинения тормозного пути автомобилей, особенно на высоких скоростях.

Стойкость к полируемости определяется прочностью минералов, входящих в горную породу, из которой изготовлен щебень. Наиболее распространенные породослагающие минералы характеризуются такой прочностью (МПа): наждачный корунд – 200, кварц – 128, полевой шпат – 75, амфибол – 75, пироксен – 75, кальцит – 11, слюда – 9.



Рис. 1.5. Установка для определения полируемости щебня

Сопротивление полируемости находится в прямопропорциональной зависимости от прочности минерала (рис. 1.6). Следовательно, щебень из карбонатных горных пород даже с высокой прочностью по дробимости не может быть использован для применения в асфальтобетоне для верхних слоев покрытия дорог высокой категории. В то же время щебень, полученный из кварцито-кальциевых пород, хотя и имеет меньшую прочность, обладает большим сопротивлением полируемости за счет разной скорости износа входящих в них минералов. К породам, удачно сочетающим прочность и устойчивость к полированию, относятся мелкокристаллические граниты, диориты, липариты и диобазы, вулканические туфы, сланцы, полевошпатные кварциты, мелкокристаллические гранодиориты. Щебень из легкополирующихся горных пород, но обладающий достаточной прочностью, может применяться в нижних слоях дорожных одежд.

Полируемость зерен щебня в странах ЕС определяют по изменению скользкости поверхности щебня после определенного количества циклов истирания его зерен пневмоколесом в присутствии абразива и воды. Скользкость до и после испытания определяют по отклонению маятника, падающего с заданной высоты, после контакта с зернами щебня, нанесенными на специальную пластину (рис. 1.7).

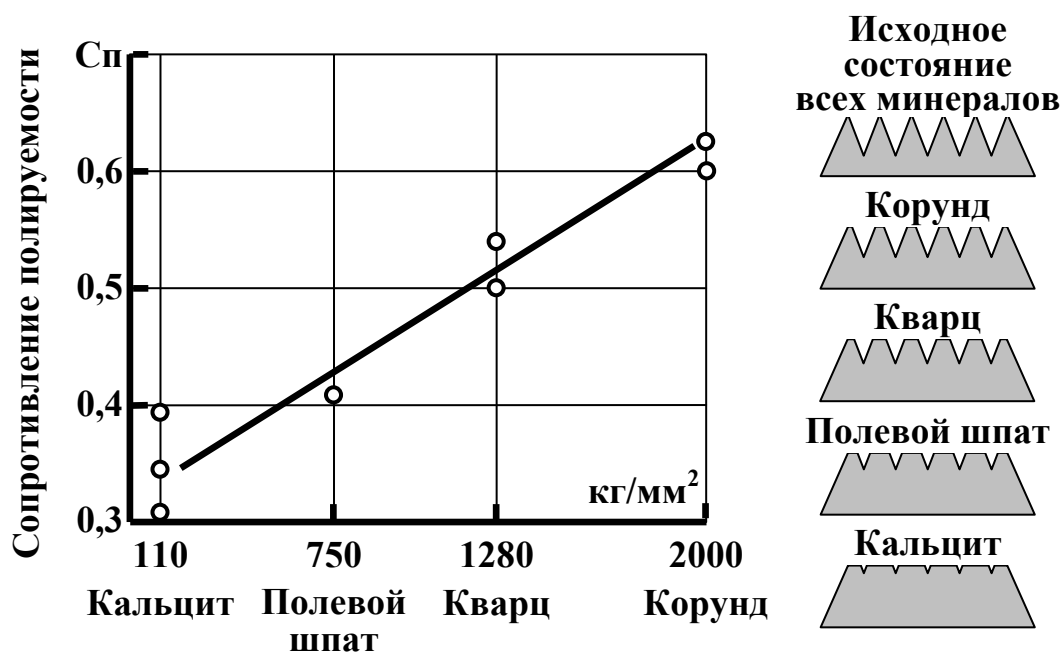


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента полируемости от прочности минерала (по данным французских исследователей)

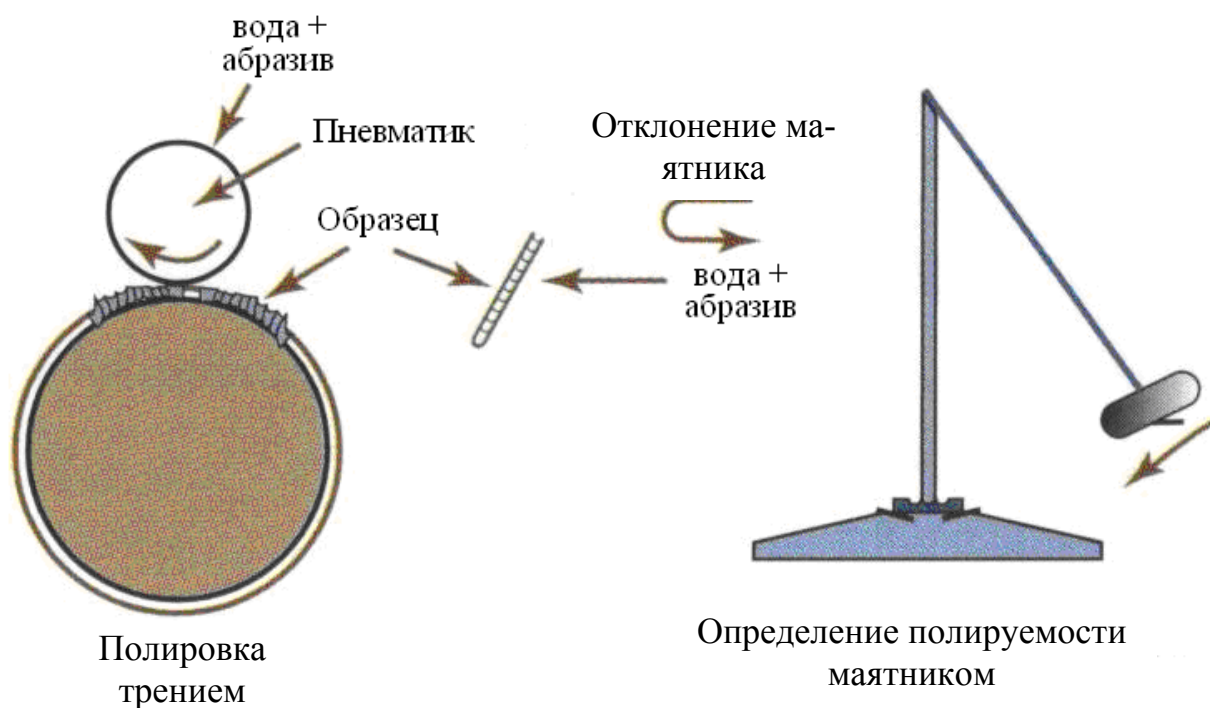


Рис. 1.7. Методы испытания и оценки полируемости (Франция)

Одним из наиболее распространенных является требование к форме зерен щебня. Они должны быть преимущественно кубовидными и тетраэдными. Ограничивается содержание зерен неправильной, вытянутой или плоской формы, которые называются «пластин-

чатыми», «лещадными» и «игольчатыми» (рис. 1.8). Показателем «некачественности» формы является соотношение максимального размера зерна к минимальному, оно не должно превышать 3. В странах Восточной Европы до последнего времени количество зерен такой формы определяли отбором их из навески, состоящей из 100 зерен, а затем рассчитывали их процентное содержание в общей массе. В настоящее время в Украине начинают применять европейский стандарт по определению содержания зерен неправильной формы рассеиванием их на щелевидных ситах. Суть метода заключается в определении таких зерен в каждой фракции с последующим расчетом зерен такой формы во всей щебенистой составляющей асфальтобетонной смеси.

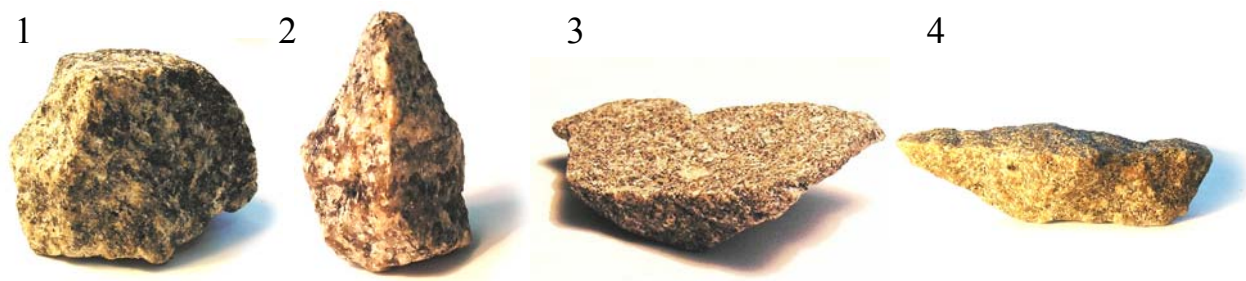
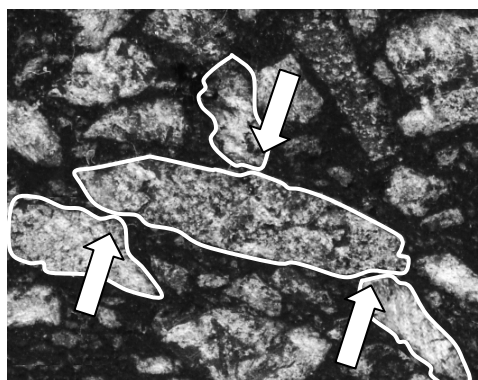


Рис. 1.8. Зерна щебня кубовидной (1), тетраэдной (2), пластинчатой (3) и игольчатой (4) формы

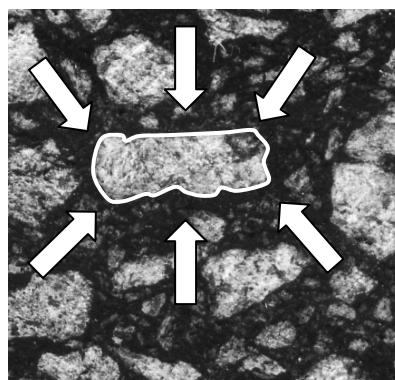
По форме зерен щебень (гравий) делят на три группы: кубовидную с содержанием по массе зерен пластинчатой (лещадной) и игольчатой формы не более 15 %, улучшенную – не более 25 % и обычную не более 35 %.

Требования к механическим свойствам щебня строго дифференцируются по гранулометрическим типам асфальтобетона. Это связано с изменением напряженно-деформированного состояния зерен щебня при переходе от асфальтобетона типа А к типу Б и затем к типу В (рис. 1.9). В первом случае (тип А) зерна щебня могут соприкасаться друг с другом и подвергаться сосредоточенным усилиям подобно тому, как это происходит при испытаниях зерен щебня на раскол конусом или на дробимость. В случае типа В зерен щебня мало. Они рассредоточены в объеме асфальтобетона и не контактируют друг с другом. Больше того, на них передается всестороннее давление от смеси мелкозернистых материалов (песка,

минерального порошка с битумным вяжущим). Очевидно, что создаваемое ими всестороннее давление не только не разрушает зерна щебня, но, наоборот, до некоторой степени их упрочняет.



1 – изгиб



2 – всесторонне сжатие

Рис. 1.9. Схема работы зерен щебня пластинчатой формы в асфальтобетоне: типа А (1) и типа В (2)

Дробление зерен неправильной формы сопровождается ухудшением физических и механических свойств асфальтобетонов. Проблема влияния зерен неправильной формы на свойства асфальтобетона остается недостаточно изученной. Из-за этого требования к значениям такого показателя меняются хронологически и по странам.

Наряду с механическими свойствами в нормативных документах на щебень нормируется его физическое свойство – морозостойкость. **Морозостойкость** – это способность строительного (в том числе и дорожно-строительного) материала выдерживать циклическое замораживание-оттаивание без потери массы (не более 5 %) или прочности (не более 25 %). Количество циклов, при котором достигается этот уровень разрушения, принят в качестве показателя морозостойкости. Его значения для Украины могут колебаться от 15 до 50 циклов в зависимости от дорожно-климатического района, в котором работает асфальтобетонное покрытие: чем южнее зона, тем ниже требования по морозостойкости. Эти требования одинаковы для горячих асфальтобетонных смесей типов А и Б и их марок (50 циклов), они на 25 циклов ниже для горячих асфальтобетонных смесей типа В и холодных смесей типов Б и В второй марки. Существующий стандарт ДСТУ Б В.2.7:119 «Смеси асфальтобетонные и асфальтобетон дорожный и аэродромный» предписывает также пониженные (на 10–35 циклов) требования к механическим и физи-

ческим свойствам щебня для пористых и высокопористых асфальтобетонов.

Дифференциация требований к щебню по климатическим условиям является лишь частью системы районирования территории Украины по климатическим условиям работы асфальтобетонных покрытий (рис. 1.10). Это районирование основано на учете различных в разных районах страны летних температур покрытия, минимальных средних зимних температур, количества осадков и количества переходов температуры воздуха через 0 °С. В соответствии с этими условиями для каждого района рекомендуются предпочтительные типы, виды и марки асфальтобетонов, а также нормируются требования к составляющим их материалам.

Такое районирование Украины по условиям работы асфальтобетона в покрытии осуществлено впервые в 1977 году и, как минимум на 15 лет, опередило введение в США районирования по системе SHRP Superpave. Необходимо отметить, что американская система касается только двух параметров: минимальной температуры и максимальной температуры покрытия в каждой из 37 выделенных зон. Главным достоинством системы SHRP Superpave, как показано в первой части этого учебника, является то, что она ориентируется на принципиально новые реологические критерии предсказания трещино-, сдвигоустойчивости и устойчивости к старению битумных вяжущих.

Песок является мелкозернистой минеральной составляющей асфальтобетона с крупностью зерен в пределах 5 мм – 0 мм (в странах ЕС верхняя граница крупности песка соответствует 6,3 мм). *Природный песок* – это осадочная мелкообломочная горная порода, образовавшаяся в результате накопления продуктов выветривания различных горных пород. Кроме природного (речного, морского и горного) песок может быть искусственным, полученным целенаправленным дроблением различных горных пород. *Искусственный песок* может состоять из следующих фракций: 0 – 5 мм (нефракционированный); 2,5 (2) мм – 5 мм; 0,63 мм – 2,5 (2,0) мм; 0–2,5 (2,0) мм; 0–0,63 мм.

На практике в качестве песчаной составляющей в большом объеме используют побочные продукты дробления горных пород на щебень (высевки или отсев). Такая смесь мелких зерен часто не отвечает требованиям к песку по крупности и может быть загрязнена.



Рис. 1.10. Дорожно-климатическое районирование Украины по условиям работы асфальтобетонного покрытия (1977 г.)

Чтобы исключить такие недостатки, стандартом ДСТУ Б В.2.7-119 предусмотрены специальные требования к дробленным пескам (табл. 1.2). Они предусматривают зависимость марки горной породы, из которой получают песок, от типа, вида и марки асфальтобетона, в котором он должен быть использован.

Таблица 1.2

**Требования к свойствам дробленных песков
(извлечение из ДСТУ Б В.2.7-119)**

Наименование показателей	Нормы для смесей марок			
	I		II	
	Горячая и холодная смеси типов А1, А, Б1, Б, В, Г, А-Б	Смеси для пористого и высокопо- ристого асфальто- бетона	Горячая и холодная смеси типов А1, А, Б1, Б, В, Г, А-Б, Д	Смеси для пористого и высокопо- ристого асфальто- бетона
Марка исходной горной породы по дробимости, не ниже	1000	600	800	400
Марка исходного гравия по дробимости, не ниже	800	600	600	400
Содержание глинистых примесей, % по массе, не более	0,5	0,5	1,0	1,0

Примечания. 1. Для асфальтобетона типа Г марки I необходимо использовать дробленные пески и отсеvy продукты дробления из изверженных горных пород. 2. Содержание глинистых примесей необходимо определять методом набухания.

Для асфальтобетонных смесей I марки прочность горной породы по дробимости должна быть не ниже 1000, для пористых и высокопористых смесей – не ниже 600. Для смесей II марки эти требования предусматривают соответственно марки горной породы не меньше 800 и 400. В случае получения песка дроблением гравия его марка по дробимости для плотных асфальтобетонов первой марки должна быть не ниже 800, а для пористых и высокопористых асфальтобетонов – не ниже 600. Для плотных асфальтобетонов II марки, пористых и высокопористых асфальтобетонов эти

показатели должны быть соответственно 600 и 400. Как будет показано дальше, содержание в асфальтобетонах глинистых частиц (размером меньше 0,005 мм) из-за их набухания и плохого сцепления с битумом приводит к существенному ухудшению их качества, поэтому их содержание в искусственном песке для асфальтобетонной первой марки ограничивается 0,5 %, а для второй – 1 %. Для песчаных асфальтобетонных предусмотрено использование только песков, полученных из изверженных горных пород. При этом содержание зерен мельче 0,071 мм не должно превышать 3 % по массе.

Кроме требований к механическим свойствам песков, их гранулометрии и происхождению, пески классифицируют по крупности. Показателем крупности служит модуль крупности, представляющий собой соотношение

$$M_{кр} = \frac{\sum P_o}{100 \%},$$

где $\sum P_o$ – сумма полных остатков в % на ситах с размерами отверстий: 0,14; 0,315; 0,63; 1,25; 2,5 мм.

По значению модуля крупности пески делят на 5 групп: повышенной от 3,5–5, крупные от 3,0 до 3,5; средние от 2,0 до 2,5; мелкие от 1,5 до 2,0 и очень мелкие от 1,0 до 1,5.

Минеральный порошок. В основе понятия «асфальтобетон» лежит термин «асфальт» (твердый), применяющийся в отношении природных битумов. Асфальты состоят из смеси загустевшей нефти и тонкого минерального заполнителя. С тех пор качественный асфальтобетон невозможен без смеси битума и минерального порошка, которую создают искусственно при приготовлении асфальтобетонных смесей. Эта система называется *асфальтовязущим веществом*. Чтобы выполнять свое назначение, минеральный порошок должен обладать определенными свойствами. В настоящее время *минеральным порошком* называют продукт тонкого измельчения (помола) карбонатных горных пород, металлургического основного шлака или пылевидных побочных продуктов промышленности, содержание в которых зерен мельче 0,071 мм должно быть не меньше 70–80 %, а содержание глинистых частиц не должно превышать 5 %. По характеру поверхности частичек минеральный порошок может быть неактивированным с естественной поверхностью частичек, образующейся при помоле, и активированным, поверх-

ность частичек которого покрыта тонкой пленкой органического вещества (рис. 1.11). Минеральный порошок делится на две марки.



Рис. 1.11. Принцип определения степени гидрофобности активированного минерального порошка: слева – обычный, справа – активированный

В составе порошка не должно быть зерен крупнее 1,25 мм, содержание зерен фракции 1,25–0,315 мм ограничено 10 %, а зерен размером 0,315 мм – 0,071 мм – 10–20 %. Пористость минерального порошка, определяемая по соотношению его истинной плотности и плотности в уплотненном под давлением 40 МПа состоянии, должна быть не более 30–40 %. Более высокие требования относятся к минеральным порошкам первой марки. Этот показатель плотности по своей сути близок к показателю индекса пор по Ригдену, используемому в стандарте ЕС. В случае показателя Ригдена плотность порошка определяют трамбованием цилиндрического образца диаметром $(25 \pm 0,1)$ мм ста ударами груза массой 840–890 г с высоты 25 см. Значение этого показателя должно быть равным или меньшим 40 %.

Качество минерального порошка оценивают по комплексу показателей, количественное значение которых приведено в табл. 1.3.

Набухание – прирост объема образца из смеси битума с минеральным порошком в воде, имеющего остаточную пористость в пределах 5–6 %, не должно превышать 1,5–3,0 %.

**Технические требования к свойствам минерального порошка
(извлечение из ДСТУ Б В.2.7-119)**

Наименование показателей	Значения по видам и маркам минерального порошка			
	активированный		неактивированный	
	МП AI	МП AII	МП I	МП II
1	2	3	4	5
1. Зерновой состав – содержание частиц, % по массе, не мельче: –мельче 0,071 мм; – мельче 0,315 мм; – мельче 1,25 мм	80 90 100	80 90 100	от 70 до 80 включ. 90 100	70 80 100
2. Пористость после уплотнения давлением 40 МПа, % по массе, не более	30	30	35	40
3. Набухание образцов из смеси порошка с битумом, в % по объему, не более	1,5	1,5	2,5	3,0
4. Показатель битумоемкости, в г, не более	50	50	65	75
5. Степень гидрофобности, с, не ниже	1300	1000		
6. Усиливающая способность, ΔT , °C	от 10 °C до 20 °C	от 10 °C до 20 °C (от 8 °C до 25 °C)	от 10 °C до 20 °C	от 10 °C до 20 °C (от 8 °C до 25 °C)
7. Число пластичности*, не более	1	4	1	4
8. Влажность, % по объему, не более	0,5	0,5	1,0	2,5
9. Содержание глинистых примесей **, % по массе, не более – в том числе, сумма оксидов Al_2O_3 и Fe_2O_3 , % по массе не более	15 5		5 1,7	

Примечания. *Кроме порошков из битуминозных пород. **Рекомендованное определение

Показатель битумоемкости минерального порошка определяют по количеству индустриального масла, при котором смесь обладает заданной консистенцией, контролируемой глубиной погружения в смесь цилиндра прибора Вика. Чем больше расход минерального

масла, тем больше структурирующая способность минерального порошка и тем большим будет расход битума в асфальтобетоне на таком порошке. Нормируемое значение показателя не должно превышать 50–75 г. Недостатком метода является подмена битума индустриальным маслом, от которого оно отличается составом и свойствами.

В европейской практике *адсорбционную способность* порошка определяют по количеству порошка, необходимого для адсорбции (поглощения) 15 г битума с пенетрацией $60-70 \times 0,1$ мм. Показателем такой способности, близкой к сущности битумоемкости, является то количество порошка, при котором вязкое тесто преобразуется в густую рыхлую «замазку», отслаивающуюся от стенок фарфоровой чашки и разделяющуюся на отдельные кусочки. Качественным считают порошок, 40 г (или больше) которого поглощается 15 г битума. При этом отношение порошка к битуму в асфальтовяжущем равно или больше 2,7.

Этот показатель достаточно близок по своему смыслу к показателю *структурирующей (усиливающей) способности* минерального порошка, регламентируемой в стандарте ЕС. Усиливающую способность определяют как приращение температуры размягчения асфальтовяжущего, состоящего из 40 % битума с пенетрацией $(60-70) \times 0,1$ мм и 60 % минерального порошка. Это приращение для качественного порошка должно быть в пределах $10 - 20$ °С. Меньшая разница свидетельствует о малой удельной поверхности порошка и плохом взаимодействии с битумом. Приращение больше 20 °С может быть следствием большой внешней удельной и внутренней поверхности минерального порошка, значительного поглощения масел порами порошка, что может привести к изменению состава битума, его перерасходу и повышению хрупкости асфальтовяжущего вещества и, следовательно, асфальтобетона.

Кроме перечисленных, технические требования на минеральный порошок предусматривают определение *водостойкости* асфальтовяжущего вещества, в котором соотношение порошка и битума принято таким, чтобы обеспечить водонасыщение заформованных под давлением 10 МПа образцов в пределах 4–5 %. Коэффициент водоустойчивости определяют как отношение прочности образцов после 1,5 часов вакуумирования и выдерживания в воде при (60 ± 2) °С в течение 4 часов и охлаждения при температуре (20 ± 1) °С в течение

часа к прочности сухого образца, выдержанного при температуре $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$. Показатель водоустойчивости объективно характеризует качество взаимодействия битума с поверхностью минерального порошка и позволяет предсказывать водостойкость асфальтобетона с принятым порошком. Его значение должно быть равно или больше 0,7.

Особенностью минерального порошка как дисперсной (мелкозернистой) системы является его высокая удельная поверхность. **Удельная поверхность** – это суммарная поверхность частичек минерального порошка, отнесенная к единице его объема или массы. Обычно используют размерность $\text{см}^2/\text{г}$, поскольку в этом случае получаемый результат более объективен из-за исключения необходимости определять истинную плотность порошка. Удельная поверхность минерального порошка находится в пределах 2500–4000 $\text{см}^2/\text{г}$.

При относительно незначительном содержании минерального порошка (около 8 %) его поверхность составляет около 80 % всей поверхности минеральных материалов асфальтобетонной смеси. Именно огромной поверхностью взаимодействия минерального порошка с вяжущим объясняется его вклад в формирование качества асфальтобетона.

Благодаря исследованиям, выполненным около 50 лет назад в СоюздорНИИ (г. Москва) под руководством Л.Б. Гезенцева и в ХНАДУ (г. Харьков) под руководством М.И. Волкова, были разработаны основы активации и гидрофобизации минеральных порошков. Такие порошки применяли в асфальтовых технологиях сначала в СССР, а затем в России, Украине и Беларуси. Особенностью этих порошков является наличие на поверхности частиц тонких пленок (около 0,2 мкм) органического вещества, содержащего анионактивные поверхностно-активные вещества. Благодаря этому активированные (с формированием пленки в процессе помола) и гидрофобизированные (с нанесением органических пленок после помола) порошки обладают гидрофобностью (способностью отталкивать воду), они хорошо хранятся, не образуя комков и агрегатов, улучшают качество перемешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей, сокращают расход битума, позволяют использовать в качестве сырья для помола осадочные горные породы, содержащие до 15 % глинистых частиц. Степень гидрофобности активированного минерального порошка определяют по его способности не тонуть после 24 часов нахождения в воде при комнатной температуре (рис. 1.11) или временем нахождения их на поверхности кипящей воды (метод А.В. Космина).

2. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

2.1. Особенности работы асфальтобетона в покрытии и виды разрушений

Для оценки качества асфальтобетонных и предсказания их долговечности используют множество показателей, одни из которых можно отнести к техническим, регламентируемым стандартами отдельных стран и сообществами стран, другие – к реологическим, используемым при разработке новых видов асфальтобетонных, при проектировании составов собственно асфальтобетонных и конструировании дорожных одежд, третьи можно рассматривать как прогностические, позволяющие количественно предсказать жизненный цикл асфальтобетона под действием различных факторов и нагрузок.

К техническим свойствам отнесены те, что дают представление о природе асфальтобетона, т.е. физических свойствах: плотности, пористости минерального остова и асфальтобетона, водонасыщении, водоустойчивости, а также о механических свойствах асфальтобетона: прочности при разных схемах напряженного состояния, температурах и скоростях деформирования. Эти свойства устанавливают при назначении составов асфальтобетона, при операционном контроле качества смесей, изготавливаемых на асфальтобетонных заводах (АБЗ), при контроле качества асфальтобетона, уложенного и уплотненного на строительном объекте – дороге.

Определение таких показателей должно быть простым, поскольку испытания выполняют в заводских и полевых лабораториях, и надежным, поскольку контролируется пригодность смеси и надежность асфальтобетона, уложенного в слой дорожной одежды. При назначении комплекса показателей контроля качества любой продукции, и асфальтобетона в том числе, основываются на принципе: система показателей качества должна быть надежной, соответствовать существующему в стране уровню развития технологий, техники и измерительных средств, не забегая безосновательно вперед.

Стандарты, действующие в Украине, России, Беларуси и других странах бывшего СССР, в отношении асфальтобетона реализуют именно такой принцип. При назначении критериев и методов

испытания учитывают, какие факторы действуют на асфальтобетон в покрытии и какие разрушения могут возникнуть под их воздействием. Асфальтобетон в дорожном покрытии подвергается действию:

- механических статических и динамических нагрузок, вызывающих возникновение в асфальтобетоне нормальных сжимающих, растягивающих и касательных (сдвигающих) напряжений;

- высоких летних и низких зимних отрицательных температур;

- воды и жидких агрессивных сред;

- переменному увлажнению – высыханию и замораживанию – оттаиванию;

- солнечному облучению и солнечной радиации, световому, тепловому воздействию и воздействию кислорода воздуха.

Обстоятельством, ужесточающим условия работы дорожных одежд вообще и асфальтобетона в частности, является то, что многие из этих факторов действуют одновременно. Неблагоприятное их сочетание приводит к множеству видов разрушения асфальтобетона. Сочетание многократных нагрузок и высоких летних температур, приводящих к нагреву покрытия до 55 °С и выше (в странах с жарким климатом), переводит битумное вяжущее в составе асфальтобетона из твердого в вязкопластичное состояние. В результате этого на покрытии формируются необратимые пластические деформации в виде (рис. 2.1) продольных колеи по полосе наката; поперечных волн на участках торможения, перекрестках; наплывов на уклонах; гребенки на горизонтальных участках дороги в виде частых поперечных волн (на расстоянии около 70–100 см друг от друга).

В жаркое время года на слое асфальтобетона с избыточным содержанием битума и низкой остаточной пористостью могут образовываться жирные пятна, поскольку битум с повышением температуры увеличивается в объеме и выдавливается на поверхность, что приводит к развитию на таком участке пластических деформаций и опасности возникновения автотранспортных происшествий ввиду большой скользкости поверхности в местах «выпотевания» битума.

При низких температурах, достигающих в наиболее холодные зимы минус 30 °С и ниже (в странах с холодным климатом), на покрытии возникают регулярные *поперечные трещины*, причиной которых являются растягивающие напряжения, вызванные температурным сжатием полосы асфальтобетона.



а – колея



б – наплыв



в – поперечная трещина



г – сетка трещин старения



д – шелушение



е – выпотевание битума



ж – отслаивание верхнего слоя

Рис. 2.1. Дефекты асфальтобетонных покрытий

Под действием многократных изгибающих нагрузок от транспортных средств в покрытия образуются сетки *усталостных трещин*, разделяющие его на пластинчатые многогранные отдельныености. Они формируются более активно в случае низкой несущей способности лежащих ниже покрытия слоев дорожных одежд.

Под воздействием воды и нагрузок, особенно в осенне-зимний и зимне-весенний периоды, из-за низкого сцепления вяжущего с поверх-

ностью минеральных материалов покрытие *шелушится и выкрашивается*, а впоследствии на нем образуются *выбоины*. При шелушении от асфальтобетонного покрытия из пространства между крупными зернами щебня отделяются зерна песка и мелкого щебня, оставляя на покрытии резковыступающие над его поверхностью разрозненные крупные зерна щебня. При выкрашивании, наоборот, от поверхности покрытия отделяются крупные зерна, оставляя на поверхности «оспины». Этим видам разрушения способствует и переменное *замораживание-оттаивание*, которое разрушает асфальтобетон за счет высокого давления в его порах, возникающего при льдообразовании.

При очень низких температурах из-за существенной разницы между значениями коэффициента температурного линейного расширения битумного вяжущего ($\sim 1 \times 10^{-4}$) и минеральных зерен ($\sim 1 \times 10^{-5}$) в межзерновом пространстве возникают большие напряжения, приводящие к образованию микротрещин.

Под влиянием кислорода воздуха битум в асфальтобетоне *стареет*, нарастает его плотность и твердость, асфальтобетон становится хрупким, и, сокращаясь в объеме, распадается на множество плит и плиток, подобно тому, как растрескивается грунтовая дорога в засуху.

Существует еще множество дефектов асфальтобетонных покрытий, формирующихся по причине нарушения технологических режимов приготовления асфальтобетонных смесей, их транспортирования, укладки и уплотнения. Их изучение является предметом курса «Эксплуатация автомобильных дорог».

Для того чтобы на покрытии дороги не образовывались дефекты и разрушения, асфальтобетон должен быть прочным при высоких положительных температурах; деформативноспособным при низких отрицательных температурах; устойчивым к старению в процессе эксплуатации; водо- и морозостойким. Нормативные документы, в особенности государственные стандарты, предусматривают соответствующие критерии и требования к уровню показателей свойств, выполнение которых предупреждает разрушение.

2.2. Физические свойства асфальтобетона

Для анализа свойств асфальтобетона и оценки влияния на него особенностей состава и качества входящих материалов необходимо знать его физические свойства, которые характеризуют способность материала реагировать на внешнее воздействие.

Истинная плотность асфальтобетона (ρ^a) – отношение его массы без пор и дефектов к единице объема, выраженное в г/см³ или кг/м³.

Средняя плотность асфальтобетона (ρ_m^a) – отношение массы образца к единице реального объема, с порами и дефектами, выражаемое в тех же единицах, что и истинная плотность.

Истинная плотность минерального остова (минеральной части ρ^m) – средневзвешенная плотность суммы всех разных по минералогическому составу минеральных составляющих.

Средняя плотность минерального остова (ρ_m^m) – отношение массы к реальному объему в асфальтобетоне.

Пористость минерального остова асфальтобетона – количество пор и пустот между зернами его минеральной части. Она определяется по формуле

$$V_{\text{пор}}^m = \left(1 - \frac{\rho_m^m}{\rho^m} \right) \cdot 100 \%. \quad (2.1)$$

Ее значение для плотных асфальтобетонов находится в пределах 15–22 %.

Остаточная пористость асфальтобетона характеризуется количеством пор, оставшихся в асфальтобетоне после заполнения пор и пустот минерального остова битумом. Эту пористость определяют по формуле

$$V_{\text{пор}}^o = \left(1 - \frac{\rho_m}{\rho^a} \right) \cdot 100 \%. \quad (2.2)$$

Ее значение для плотных асфальтобетонов находится в пределах 2–5 %.

Эти показатели нужны, чтобы определить пористость минерального остова, по которой можно судить о правильности принятого соотношения минеральных составляющих, и остаточную пористость асфальтобетона, по которой можно оценить удовлетворительность принятого соотношения между минеральными составляющими и битумным вяжущим.

К физическим свойствам асфальтобетона относится также его *водонасыщение*. Это определяемый экспериментально показатель, позволяющий судить о количестве воды, которое способен поглотить

асфальтобетон под вакуумом (15 мм рт. ст.) в течение нормируемого времени. Этот показатель тесно связан с остаточной пористостью асфальтобетона. Его значение, выраженное в объемных процентах, всегда ниже, чем остаточная пористость, поскольку в асфальтобетоне имеются микропоры, недоступные для проникания в них воды. Кроме этого, поверхность пор покрыта гидрофобными (водоотталкивающими) пленками битума, что препятствует капиллярному подсосу в них воды. Рекомендуемые стандартом значения рассмотренных физических свойств приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

**Требования к физико-механическим свойствам горячего плотного асфальтобетона для климатических районов А-3 и А-4
(извлечение из ДСТУ Б В.2.7-119)**

Наименование показателей	Норма для асфальтобетонов марок в районах			
	А-1, А-2		А-3, А-4	
	І	ІІ	І	ІІ
1	2	3	4	5
1. Пористость минерального остова, % по объему, для асфальтобетонов типов: А1, А, Б1, Б В и Г Д	15–19 18–22 –	15–19 18–22 18–22	15–18 17–20 –	15–18 17–20 17–20
2. Остаточная пористость, % по объему	2-5	2-5	2-4	2-4
3. Водонасыщение, % по объему, для асфальтобетонов типов, не больше: А1, А Б1, Б, В, Г Д	3,5 3,0 –	3,5 3,0 3,0	3,5 3,0 –	3,5 3,0 3,0
4. Предел прочности на сжатие для асфальтобетонов всех типов, МПа, при температуре: 0 °С*, не больше; 20 °С, не меньше; 50 °С для асфальтобетонов типов, не меньше: А1, А Б1, Б, В Г Д	12,0 2,7 1,2 1,3 1,4 –	13,0 2,5 1,1 1,2 1,3 1,2	12,0 2,7 1,2 1,3 1,4 –	13,0 2,5 1,1 1,2 1,3 1,2

1	2	3	4	5
5. Коэффициент длительной водостойкости **	0,9/0,87	0,89/0,85	0,90/0,86	0,87/0,84

Примечания. *Показатель прочности при 0 °С не определяют для асфальтобетонов на битумах, модифицированных полимерами. **В числителе требования к асфальтобетону для верхнего слоя, в знаменателе для нижнего слоя и слоев основания.

2.3. Механические свойства асфальтобетона

Способность асфальтобетона противостоять разрушающему действию на него механических нагрузок от транспортных средств оценивают по его прочности. Базовым показателем прочности асфальтобетона во многих странах мира долгое время служила и продолжает служить до настоящего времени *прочность на сжатие* при температуре близкой к температуре окружающего воздуха. Это самое простое испытание асфальтобетона на прочность.

Зная прочность, можно предсказать поведение асфальтобетонных конструкций, используемых в разных регионах. Для получения сопоставимых результатов в разных лабораториях испытания необходимо проводить при строго фиксируемых, с погрешностью не более ± 1 °С, температуре и скорости деформирования образцов. В отношении абсолютных значений температуры и скорости деформирования требования в разных странах могут различаться. Отличия в нормировании температур невелики, они колеблются в пределах 18–22 °С. Скорость деформирования может колебаться в больших пределах. В Украине и других странах бывшего Советского Союза она равняется 3 мм/мин, а в странах ЕС, где практикуется французский метод испытаний по Дюрье, она равняется 60 мм/мин.

Украинский стандарт нормирует прочность при 20 °С в зависимости от дорожно-климатического района (рис. 1.10). Она больше для юга Украины (2,6–2,8 МПа) и меньше для северных регионов (2,5 МПа).

К несовпадению результатов, получаемых в разных странах, приводят разные технологии изготовления испытываемых образцов.

Украинский стандарт предусматривает уплотнение смесей типов В с содержанием щебня менее 35 %, давлением 40 МПа в течение 3 мин, а смесей с содержанием щебня более 35 %, давлением 30 МПа в течение того же времени. В России – 40 МПа или комбинированным методом с предварительной вибрацией с амплитудой $(0,4 \pm 0,05)$ мм в течение трех минут под давлением 0,03 МПа и последующим доуплотнением давлением 20 МПа в течение 3 минут. В странах ЕС по методу Дюрьеца образцы уплотняют под давлением 12 МПа на протяжении 5 мин. Высокое уплотняющее давление может привести к дроблению зерен щебня и, соответственно, изменять зерновой состав смеси по сравнению с расчетным. В таком случае результаты испытаний образцов, уплотненных в лаборатории, и асфальтобетона в покрытии окажутся несопоставимыми. Проблема уплотнения лабораторных образцов методами, предупреждающими дробление и приближающимися к производственным, является актуальной в мировом масштабе.

Эта проблема решается двумя путями. Первый, широко применяемый в Европе, – это уплотнение образцов вращательным прессом, создающим малое вертикальное давление (1 МПа) во вращающейся под определенным $(7-12)^\circ$ углом форме (рис. 2.2). При этом минеральные зерна перемещаются друг относительно друга, зерна меньших размеров размещаются в пустотах между более крупными зернами, обеспечивая тем самым высокую плотность упаковки. Остаточная пористость уменьшается по мере увеличения числа вращений, для первых 10 вращений она близка к 15 %, а для последующих 80 вращений – 6 %. Этот уровень плотности при укатке на дороге достигается за 14–18 проходов пневмокатка. Применение этого метода лабораторного уплотнения полностью исключает дробление минеральных зерен, позволяет оценить уплотняемость испытуемой при проектировании состава смеси по количеству вращений, необходимых для достижения предельной плотности, дает возможность предсказать количество проходов катка, при котором будет достигнута требуемая плотность (остаточная пористость и водонасыщение) асфальтобетона.

Сравнение влияния разных методов уплотнения на дробимость минеральных зерен в смеси с 45 % щебня показало, что при уплотнении давлением 30 МПа дробится 18 % зерен, при давлении 12,0 МПа – 8 % зерен, при ударном уплотнении по Маршаллу 2 %, а

при уплотнении вращательным прессом дробления нет. Независимые испытания одного состава смеси, проведенные 19 лабораториями Франции, показали высокую воспроизводимость уплотняемости. Отклонение остаточной пористости от средней не превышало 4–9 %. Недостатком вращательного пресса является то, что его можно использовать лишь для получения цилиндрических образцов индивидуального приготовления диаметром 80 мм и высотой 80–105 мм.

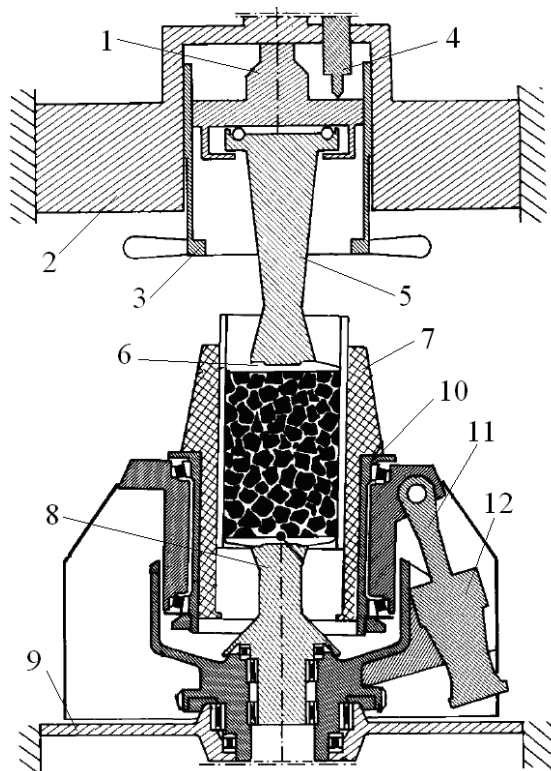
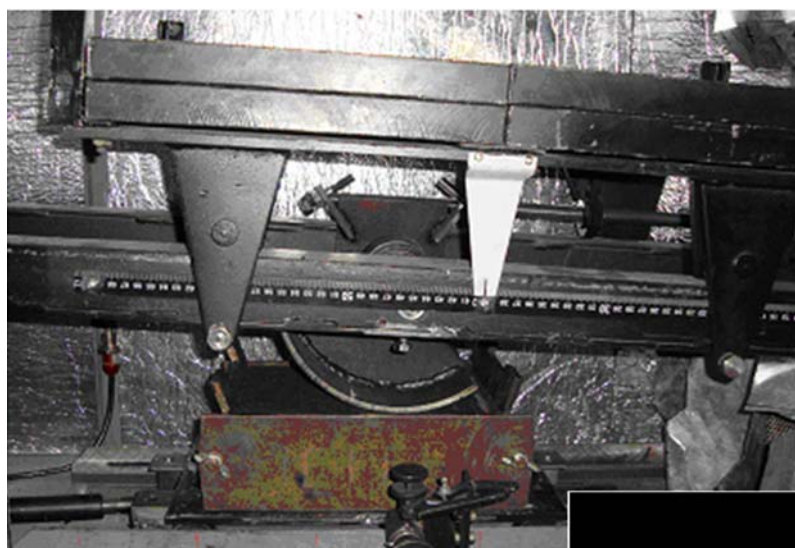


Рис. 2.2. Вращательный пресс (Франция): 1 – домкрат; 2 – станина; 3 – упорный подшипник; 4 – счетчик; 5 – верхний вкладыш; 6 – форма; 7 – корпус нагревателя; 8 – пуансон; 9 – станина; 10 – центрирующая обойма; 11 – система наклона; 12 – наклоняющий домкрат

Для приготовления больших партий образцов, необходимых для оценки качества асфальтобетона по многим показателям, в последние годы используются укатывающие прессы (рис. 2.3). Рабочим органом таких прессов является металлический сектор, который перекатывается по смеси, уложенной в специальную форму. Линейное давление на смесь может меняться от 1 кг/см до 30 кг/см. Это давление определяется как отношение массы сектора к его ширине. Скорости проходов сектора, как и давления, могут быть приближены к давлениям и скоростям движения производственных катков.



а



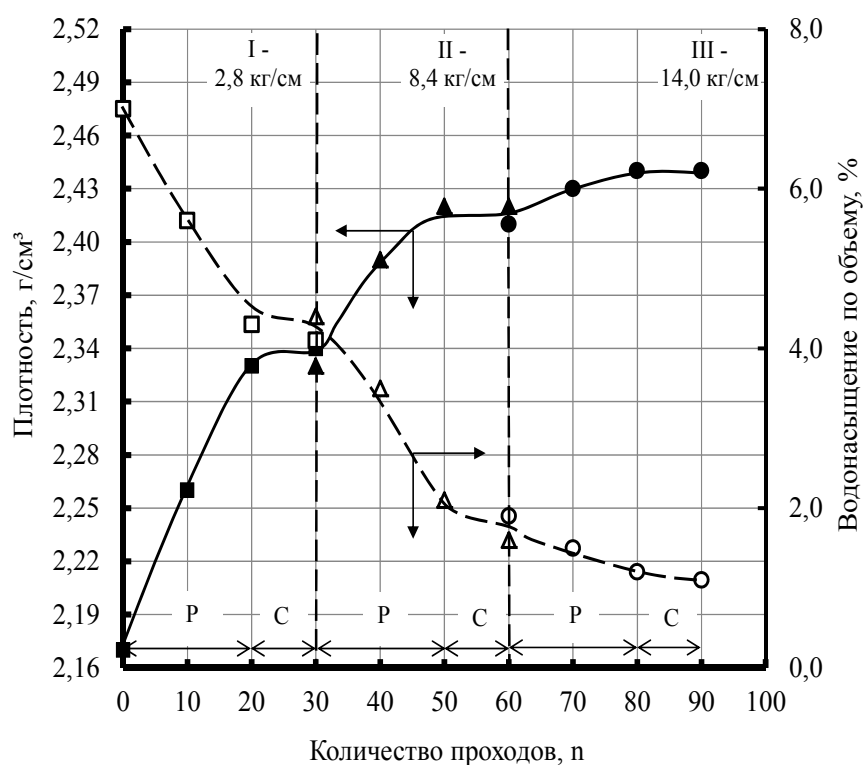
б

Рис. 2.3. Разновидности конструкций секторного пресса:
а – Германия; б – НТУ-КАДИ (Украина)

Количество проходов назначается пробной укаткой смеси. Экспериментами, выполненными в ХНАДУ, показана целесообразность многостадийного уплотнения: на первой стадии – 30 проходами с давлением 2,8 кг/см; на второй – 20–30 проходами с давлением 8,4 кг/см, на третьей – 20–30 проходами с давлением 14,0 кг/см. Приведенные на рис. 2.4 зависимости средней плотности и водонасыщения от количества проходов показывают, что каждая из трех стадий завершается достижением предельного уплотнения. Достигаемая этим методом плотность выше, чем получаемая давлением 30 МПа. При этом дробление зерен в многощебенистой смеси не превышает 5 %. Изготовленную таким способом плиту разрезают на образцы-кубики, размеры которых определяются толщиной плиты. Уплотнение укаткой секторным прессом предусмотрено европейскими нормами EN 12697-32 и широко применяется в странах ЕС.

Для прогнозирования *сдвигоустойчивости* асфальтобетона (способности к развитию в нем пластических деформаций) в жаркое время года определяют прочность при 50 °С. Ее минимальное значение, согласно ДСТУ Б В.2.7-119, слабо зависит от дорожно-климатического района и существенно зависит от типа асфальтобетона. Наиболее высокий требуемый предел прочности рекомендован для смеси типа Г (1,4–1,6 МПа), а самый низкий – для асфальтобетона типа А (1,1–1,2 МПа). Нижний предел прочности относится к асфальто-

бетонам марки II. Показатели прочности при 50 °С, нормируемые российским стандартом, существенно выше (на 0,2–0,4 МПа) и более дифференцированы, различаются в зависимости от региона, для которого предназначен асфальтобетон. Для аналогичных условий работы они такие же, как и в Украине. Пределы прочности при 50 °С, предусмотренные стандартом Беларуси, на 0,1–0,2 МПа ниже, чем регламентируемые стандартом Украины.



Количество проходов, n

Рис. 2.4. Влияние количества проходов и линейного давления (■ – 2,8 кг/см; ▲ – 8,4 кг/см; ● – 14 кг/см) на показатели средней плотности и водонасыщения асфальтобетона типа А (Р – рост; С – стабилизация)

Рекомендуемый стандартом в качестве критерия оценки сдвигоустойчивости показатель прочности на сжатие является одним из наиболее уязвимых в принятой системе прогнозирования работоспособности асфальтобетона. Это связано с несколькими обстоятельствами: схема напряженного состояния (сжатие) не отвечает реальной

схеме накопления остаточных деформаций за счет сдвига и перемещения друг относительно друга минеральных зерен асфальтобетона по слоям с размягченным при высоких летних температурах битумом; показатель прочности не дает представления о пластических деформациях, накапливаемых в слое асфальтобетона; сжатие образца асфальтобетона с постоянной скоростью нагружения или деформирования не отвечает циклическому (с разной скоростью и интенсивностью) нагружению асфальтобетона при работе его в покрытии.

В связи с этими обстоятельствами в Европе, начиная с 60-х годов, велись поиски метода испытаний наиболее соответствующих дорожным условиям. В результате этого были разработаны и внедрены в практику испытаний асфальтобетонов колеемеры. Показателем устойчивости асфальтобетонов при высоких летних температурах является *глубина колеи*, развивающаяся под влиянием многократных проходов по плите-образцу пневмоколеса (большой колеемер) или металлического колеса (малый колеемер). Температура испытаний принимается равной 50 °С или 60 °С. Количество проходов и глубина колеи нормируются в зависимости от категории дороги. Для дорог высших категорий количество проходов может достигать 30 тыс., а для дорог с низкой интенсивностью движения – 10 тыс. При этом допускаемая глубина колеи нормируется или в миллиметрах или в % от общей толщины испытываемого слоя (не более 10 % для асфальтобетона, подобного типу Б). Глубина колеи является чувствительной к особенностям состава асфальтобетона и качества материалов, входящих в его состав, особенно битума.

Приведенные на рис. 2.5 зависимости показывают, что переход от битума 40/50 к битуму 180/220 приводит к увеличению колеи после 10^5 проходов от 4,2 до 8,2 мм, т.е. в 2 раза, рост остаточной пористости от 8,2 % до 15,8 % после 10^5 проходов увеличивает колею почти в 3 раза. Это же относится и к температуре уплотнения, поскольку ее понижение приводит к недоуплотнению асфальтобетона, что сопровождается впоследствии снижением колеестойкости.

Для предсказания *зимней трещиностойкости* асфальтобетона рекомендуется определять показатель прочности при 0 °С при сжатии. Чем эта прочность выше, тем асфальтобетон ближе к хрупкому состоянию. На основании накопленного опыта принято, что в случае прочности на сжатие при 0 °С большей 12,0 МПа асфальтобетон будет хрупко разрушаться.

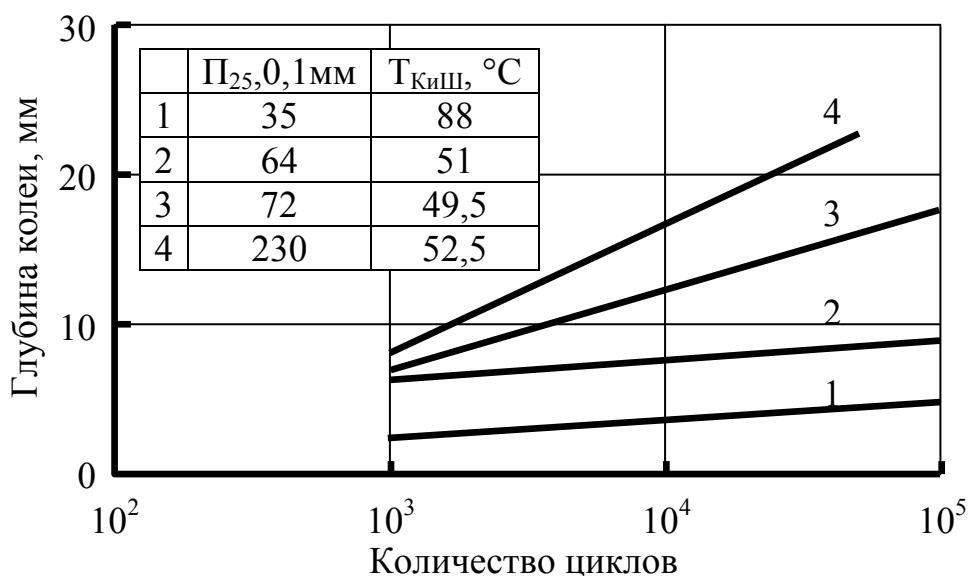


Рис. 2.5. Зависимость глубины колеи асфальтобетонов на битумах разной пенетрации от количества проходов при температуре 60 °С

Недостатками этого показателя, включенного в стандарты Украины и России, является то, что прочность на сжатие при 0 °С не дает физически объективной информации о трещиностойкости асфальтобетона, поскольку схема напряженно-деформированного состояния при испытании (сжатие) и температурный режим испытания не отвечают условиям работы асфальтобетона в покрытии (осевое растяжение и изменяющаяся температура в течение суток); асфальтобетоны с битумами разной пенетрации при 0 °С могут находиться в разных физических состояниях (вязкопластичном, вязкоупругом, хрупком), тогда как показатель прочности на сжатие не взаимосвязан с этими состояниями. В связи с этим попытки найти физически обоснованный критерий трещиностойкости продолжают уже многие десятки лет, начиная с первой подготовленной Г.К. Сюньи по этой теме на кафедре технологии дорожно-строительных материалов ХАДИ (г. Харьков) под руководством М.И. Волкова и защищенной в 1940 г. кандидатской диссертации.

Экспериментальные температурные зависимости прочности асфальтобетона, впервые установленные в 1963 г. С.О. Гордеевым и полученные для асфальтобетонов на битумах разной вязкости Ю.Е. Никольским (часть I, раздел 8), свидетельствуют о том, что в качестве *условной температуры хрупкости* асфальтобетона целесообразно было бы принять температуру, отвечающую *максимуму*

прочности (рис. 2.6). Тогда температура хрупкости асфальтобетона на битуме БНД 90/90 будет самой высокой – минус 18 °С (кривая 1), асфальтобетона на битуме БНД 130/200 – минус 24 °С (кривая 2), а на битуме МГ 130/200 (кривая 3) самой низкой – минус 33 °С. Такой метод требует выполнения достаточно большого объема испытаний при 5–6-ти температурах.

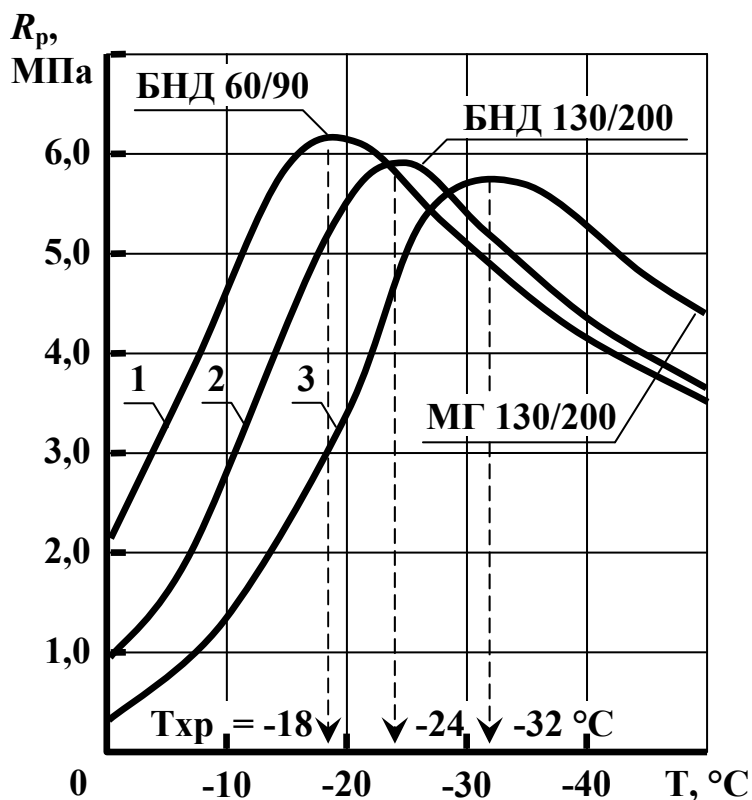


Рис. 2.6. Зависимости предела прочности асфальтобетона типа Г с битумами различной вязкости на растяжение от температуры (по данным Ю.Е. Никольского)

В Европе применяют метод, сущность которого заключается в определении температуры перехода асфальтобетона из застеклованного в хрупкое состояние. При этом определяется две температуры: первая, отвечающая максимальному значению прочности на растяжение предварительно охлажденных асфальтобетонных образцов (рис. 2.7, кривая 1); вторая, отвечающая моменту потери сплошности (разрыву) балки жестко закрепленной с целью предупреждения изменения ее размеров при охлаждении за счет возникающих в ней в процессе плавного охлаждения температурных напряжений (рис. 2.7, кривая 2).

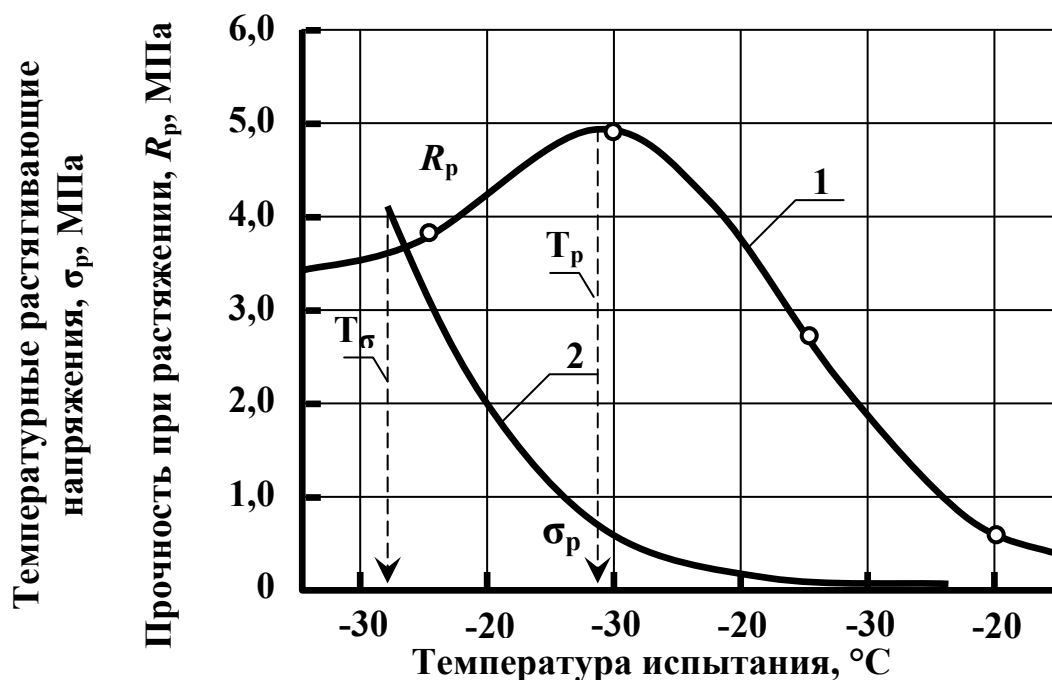


Рис. 2.7. Температурная зависимость прочности асфальтобетона на растяжение (1) и растягивающее температурное напряжение (2) (по В. Арманду)

В обоих случаях определяют напряжения, возникающие в образце. В первом — это прочность при заданной температуре под действием нагружения (R_p). Во втором — предельные температурные напряжения (σ_p) в закрепленной балке, приводящие к потере при критически низкой температуре асфальтобетоном сплошности, подобно тому, как на непрерывной ленте дорожного покрытия образуются периодически чередующиеся поперечные температурные трещины.

Температуры, отвечающие максимальным значениям прочности при растяжении T_p , и температуры T_σ , отвечающие температурным напряжениям, приводящим к разрыву балок из-за растягивающих температурных напряжений, не равны друг другу. Это может быть связано с несогласованностью режимов охлаждения и деформирования, что сопровождается различной скоростью релаксации напряжений в процессе испытания. Поскольку разница между температурами T_p и T_σ , по данным немецких исследователей, одинакова для разных асфальтобетонов (отклонение от среднего значения не превышает 10 %), то для сравнительной оценки влияния состава и качества составляющих на трещиностойкость асфальтобетонов можно пользоваться одной из них. Это предусмотрено первым государственным стандартом Украины на методы испытания асфальтобетона.

Для оценки устойчивости асфальтобетонов к действию воды в стандарт включены показатель водонасыщения, а также *коэффициенты краткосрочной, длительной ($K_{дл}^B$) и экспресс-водостойкости*.

Наиболее надежным из них является $K_{дл}^B$. Он представляет собой отношение прочности асфальтобетона при 20 °С после 15 суток выдерживания в воде при температуре (20 ± 2) °С предварительно водонасыщенных под вакуумом образцов к средней прочности образцов при температуре (20 ± 2) °С, выдержанных столько же времени на воздухе при той же температуре.

Коэффициент $K_{дл}^B$ и водонасыщение зависят от содержания в асфальтобетоне битума (рис. 2.8). С ростом содержания битума прочность асфальтобетона проходит через максимум, водонасыщение уменьшается, а коэффициент $K_{дл}^B$ растет, достигая значения, близкого к 1. Нормируемое стандартом значение водонасыщения зависит от типа асфальтобетона. В среднем его максимально допустимое значение не должно превышать 2–3 %. Обычно оптимальным содержанием битума в асфальтобетоне считают то, которое отвечает максимальной прочности, если при этом водонасыщение не превосходит предела, допускаемого стандартом (табл. 2.1). Остаточная пористость асфальтобетона превышает водонасыщение на некоторую величину, которая зависит от характера и размеров в нем пор, чем они мельче, тем это превышение больше.

Коэффициент водоустойчивости зависит от времени выдерживания асфальтобетона в воде (рис. 2.9). Обычно определение краткосрочного коэффициента водоустойчивости сразу после двухчасового водонасыщения не позволяет объективно оценить водостойкость асфальтобетона, поскольку проникшая в поры асфальтобетона при температуре 20 °С вода не успевает достигнуть границы раздела поверхностей вяжущего и каменного материала и отслоить от нее пленку битума. В связи с этим в целях получения надежной информации о водоустойчивости, регламентируемое стандартом время выдерживания в воде равно 15 суткам.

Однако за это время на асфальтобетонном заводе может быть произведено много тонн некачественных асфальтобетонных смесей. Для устранения такой ситуации в ХНАДУ разработан ускоренный метод определения водоустойчивости.

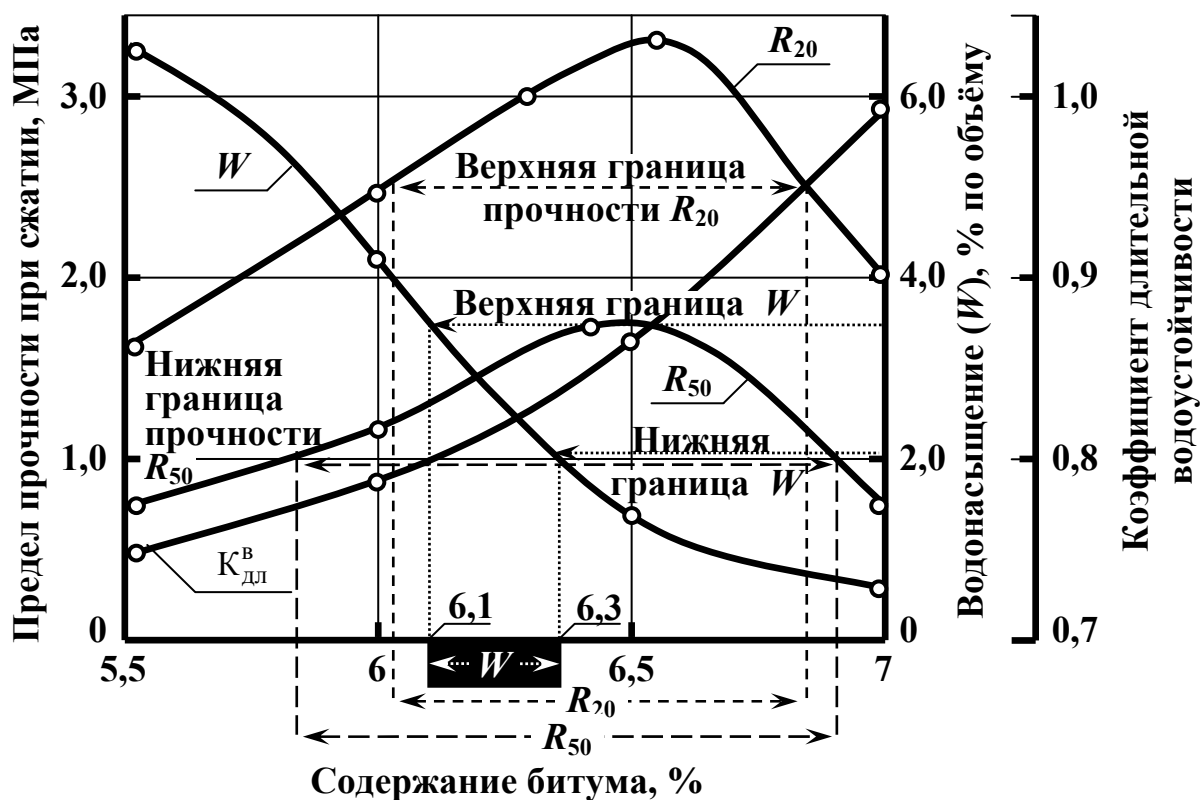


Рис. 2.8. Зависимости прочности на сжатие при 20 °С, 50 °С, водонасыщения (W) и коэффициента длительной водоустойчивости (K_{dl}^B) от содержания битума

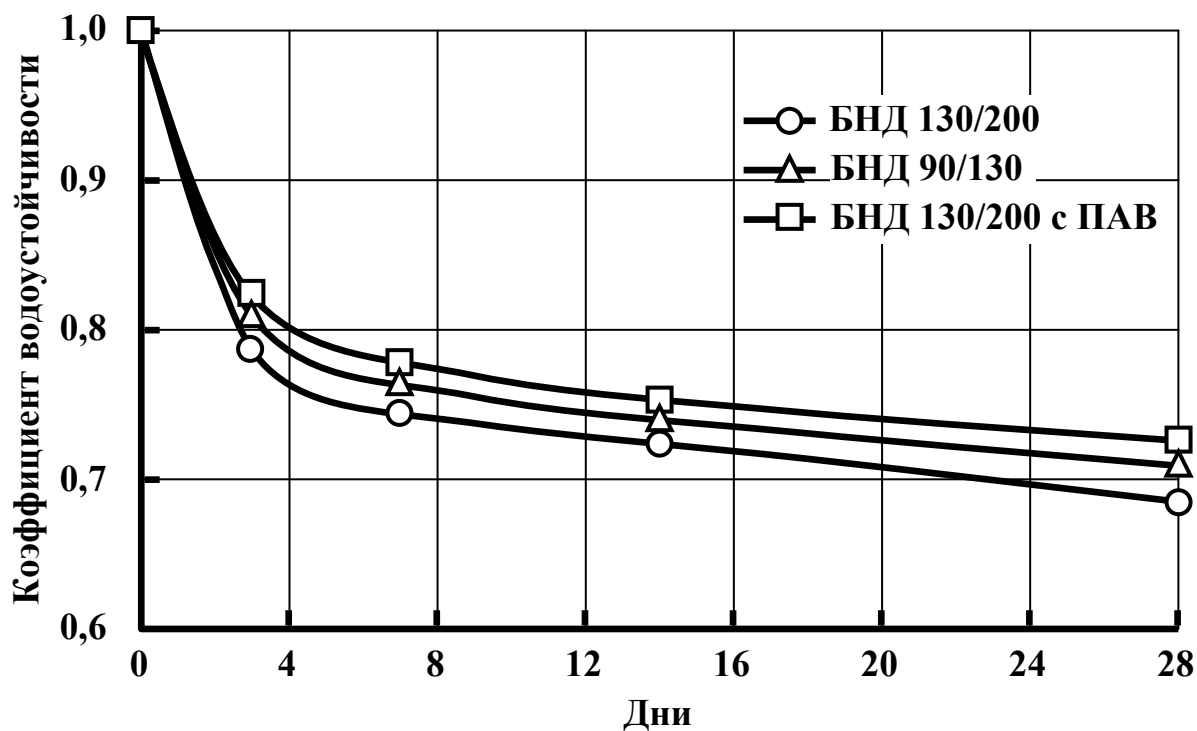


Рис. 2.9. Зависимость коэффициента водоустойчивости от времени водонасыщения асфальтобетона типа Б на битуме: ○ – БНД 130/200; △ – БНД 90/130; □ – БНД 130/200 с ПАВ

Он основан на том, что отслоение битумной пленки от поверхности каменного материала ускоряется с повышением температуры, поскольку при этом снижается межмолекулярное взаимодействие между ними (рис. 2.10). Экспериментально установленный режим экспресс-определения водостойкости по времени равняется 25 минутам при температуре 85 °С. Коэффициент водоустойчивости, определяемый по экспресс-методу, практически равен коэффициенту длительной водоустойчивости, его можно определить за время в 60 раз меньше, чем обычно (6 часов против 360 часов).

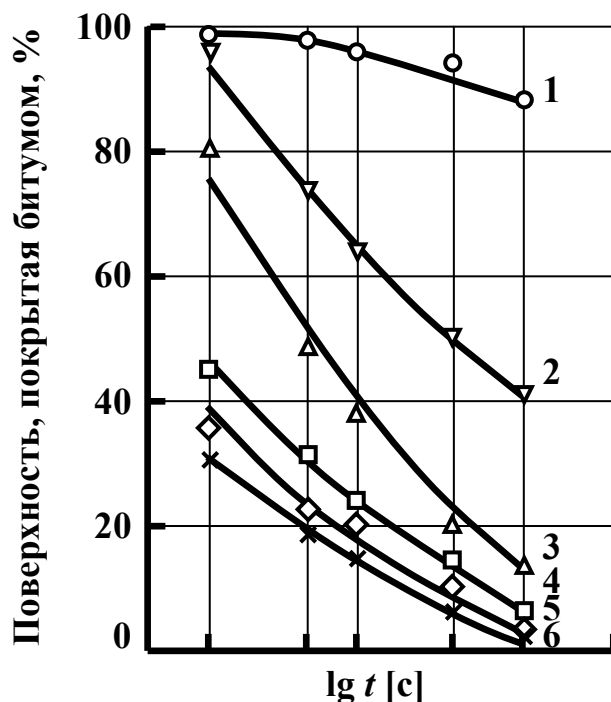


Рис. 2.10. Зависимость устойчивости битумной пленки на стеклянной поверхности от времени испытания в воде при температурах: 1 – 70 °С; 2 – 80 °С; 3 – 85 °С; 4 – 90 °С; 5 – 94 °С; 6 – 98 °С

Взаимосвязь между временем и температурой достижения одного и того же значения коэффициентом водоустойчивости (K^B) показана на рис. 2.11, на котором наклонные прямые отвечают разным температурам выдерживания асфальтобетона в воде.

Из приведенных на рисунке зависимостей следует, что одного и того же уровня водоустойчивости (например, 0,6) можно достичь при различных сочетаниях температуры и времени. При этом чем выше температура, тем меньше время выдерживания асфальтобетона в воде и наоборот. При одной и той же температуре время, необходимое для получения меньшего значения K^B , увеличивается, а при одном и том же времени – повышается температура. Из этой зависимости следует, что разрушающее действие воды растет с температурой.

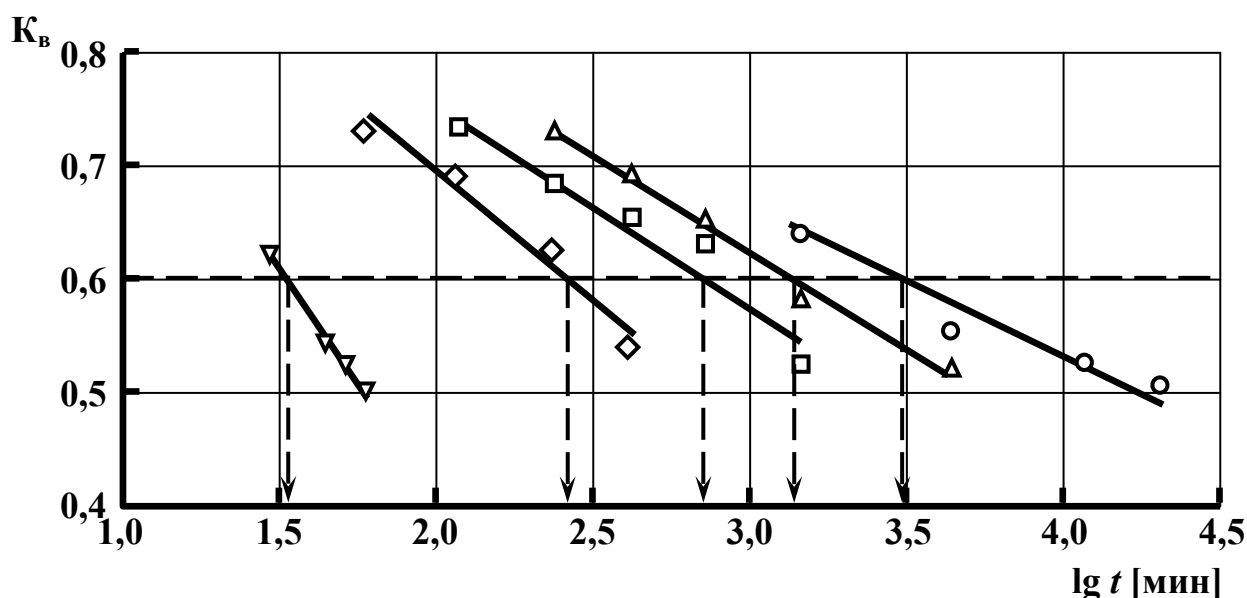


Рис. 2.11. Изменение коэффициента водоустойчивости асфальтобетона при температурах: $\bigcirc$ – 20; $\triangle$ – 40; $\square$ – 50; $\diamond$ – 70; ∇ – 85 °C

Следовательно, в районах с большим количеством осадков и жарким климатом (например, в Бангладеш 4000 мм осадков в год) необходимо использовать специальные добавки ПАВ (часть I, раздел 5) или другие технологии, чтобы предупредить шелушение, выкрашивание и выбоинообразование верхних слоев дорожных покрытий.

2.4. Европейская система оценки качества асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов

Качество любой продукции определяется уровнем требований, предъявляемых к ней принятой системой оценки качества. Чем более строгими и научно обоснованными являются требования к свойствам продукции, тем выше ее качество. Эти требования включаются в стандарты, которые регулярно пересматриваются с целью обеспечения соответствия между уровнем развития технологий и уровнем требований. Требования не могут быть произвольно завышенными, поскольку в отсутствие технических и технологических возможностей они не могут быть выполнены. В то же время они должны быть высокими настолько, чтобы поднять качество продукции до уровня инновационных технологий на предприятиях ведущих в отношении профильной продукции стран. В противном случае выпускаемая продукция становится неконкурентоспособной, импортозависимой и

технически отсталой. На нынешнем этапе развитие дорожной отрасли нашей страны и стран бывшего Советского Союза отстает от уровня дорожных технологий стран Европейского Союза и США.

Целенаправленное движение нашей страны в Европейскую Ассоциацию и Европейский Союз вызывает необходимость внедрения в дорожное строительство инновационных европейских технологий и соответственно европейской системы оценки качества объектов дорожного строительства и методов его определения. В этом направлении возможны три пути. Первый – разработка систем и методов, не уступающих западноевропейским. Второй – введение в отрасли стандартов, идентичных европейским. Третьим подходом решения проблемы является применение таких технических требований к продукции дорожного профиля и методов определения показателей ее качества, которые бы рациональным образом учитывали дорожно-климатические и эксплуатационные условия работы дорожных одежд, существующие технические и технологические возможности и зарубежный опыт выполнения высоких требований. В соответствии с этим знакомство, а затем, изучение и применение зарубежных методов контроля качества продукции в области асфальтобетонных технологий является необходимым.

Европейская система оценки качества асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов основана в 1990 году. К 2008 году она стала обязательной для стран-членов ЕС. Эта система включает стандарты на 8 видов битумной продукции и две группы стандартов на методы испытаний. К видам продукции относятся: асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны среднещебенистые, которым соответствуют применяемые в Украине асфальтобетоны типа Б; асфальтобетоны с повышенным модулем упругости; асфальтобетоны для тонких и сверхтонких слоев; «мягкие» асфальтобетоны для дорог низких категорий; гравийно-битумные бетоны с повышенным модулем упругости; теплые энергетически экономные асфальтобетонные смеси; щебеночно-мастичные асфальтобетоны; традиционные горячие асфальтобетонные смеси; литые дорожные асфальтобетоны; дренажные асфальтобетоны.

Стандартизация в области асфальтовых технологий в Европе осуществляется в соответствии с такой схемой: руководящим органом в области стандартизации в ЕС является CEN – Европейский Комитет по нормализации. В области дорожного строительства он осуществляет свою деятельность через Технический Комитет ТК 227,

который имеет в своем составе рабочую группу WG1 (Рабочая группа 1 – WG1) – битумные материалы. К этой группе относятся подгруппы: TG1 – терминология; TG2 – методы испытания; TG3 – технические требования; TG4 – качество дорожных покрытий.

Кроме того, Техническому Комитету ТС 227 подчиняются непосредственно группы: WG3 – бетоны (дорожный слой); WG4 – материалы, необработанные и обработанные гидравлическими вяжущими; WG5 – свойства поверхности; WG6 – связующие слои.

Методы испытания асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов включают 47 стандартов, являющихся составной частью стандарта EN 12697 «Смеси битумные. Методы испытаний». Они могут быть объединены в несколько групп. Условно к *первой группе* относятся методы определения зернового состава смесей, содержания и состава вяжущего. *Ко второй* – методы определения физико-механических свойств асфальтобетонов: средней плотности (разные методы); остаточной пористости; взаимодействия вяжущего с поверхностью каменных материалов; водоустойчивости; содержания воды; водопроницаемости; прочности на сжатие по Дюрьезу; пластичности и устойчивости по Маршаллу. К этому относятся и методы определения свойств асфальтобетонных смесей – уплотняемости, измерения температуры, стекания, сегрегации. *Третью группу* составляют стандарты на методы перемешивания смесей; приготовления асфальтобетонных образцов в лаборатории сжатием при фиксированных давлении и времени его действия; уплотнения их вращательными прессами, вибротрамбованием, трамбованием по методу Маршалла. К *четвертой группе* относятся методы определения деформационно-прочностных свойств, отражающие работу асфальтобетона в покрытии: прочность на растяжение по образующей; колеестойкость; циклическую усталость при изгибе и сжатии; модули упругости. *Пятая группа* стандартов включает методы оценки качества асфальтобетона в покрытии или образцов, изъятых из покрытия: толщины слоев; износ под влиянием шипованных шин; устойчивость дренирующих асфальтобетонов против выкрашивания; адгезию вяжущего к каменным материалам в заводской смеси; коррозию в противогололедных растворах и растворение в горюче-смазочных жидкостях; шероховатость методом песчаного пятна.

Трёхуровневая система оценки качества асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов, основанная на использовании таких показателей, принята во Франции (табл. 2.2).

Система оценки качества асфальтобетона во Франции

Уровень 1 Подбор смеси при проектировании объекта и конструировании дорожной одежды	Уровень 2 Корректирование состава в случае изменения составляющих	Уровень 3 Операционный контроль свойств в процессе производства
Исследовательский центр	Региональные лаборатории	Заводские лаборатории
Определение уплотняемости нескольких смесей на вращательном прессе (рис. 2.2)*	Определение уплотняемости нескольких смесей на вращательном прессе (рис. 2.2)*	Определение уплотняемости нескольких смесей на вращательном прессе (рис. 2.2)*
Испытание смесей по методу Дюрье (подобно п.п. 2.2 и 2.3)	Испытание смесей по методу Дюрье (подобно п.п. 2.2 и 2.3)	Испытание смесей по методу Дюрье (подобно п.п. 2.2 и 2.3)
Испытание на образование колеи (рис. 11.3)	Испытание на образование колеи (рис. 11.3)	
Выбор состава		
Определение модуля упругости		
Циклическая или статическая усталость		

Примечание: * уплотняемость может быть определена на секторном прессе или виброуплотнителе (рис. 2.3). В районах с континентальным климатом должна быть определена трещиностойкость (рис. 2.6–2.7)

Предъявленные в соответствии с этой системой требования к показателям свойств асфальтобетона типа Б, определяемым на I уровне, должны находиться в пределах: остаточная пористость после прессования 5–10 %; остаточная пористость после уплотнения шестьюдесятью вращениями вращательного пресса – 4–8 %; сопротивление сжатию при 18 °С образцов, уплотненных под давлением 12 МПа в течение 5 мин (рис. 2.12) – больше 5 МПа в случае использования битума (80–100) × 0,1 мм, в случае битума (60–70) × 0,1 мм – больше 6 МПа, в случае битума (40–50) × 0,1 мм – больше 7 МПа; коэффициент водоустойчивости не менее 0,75; глубина колеи в слое толщиной 10 см при температуре 60 °С после 3×10^4 проходов пневмоколеса – менее 10 %; модуль упругости при температуре 10 °С и времени действия нагрузки 0,02 с должен быть не менее 8000 МПа

(битум 40–50), не менее 6000 МПа (битум 60–70), не менее 4000 МПа (битум 80–100)×0,1 мм; динамический модуль упругости при температуре 15 °С и частоте 10 Гц – не менее 5400 МПа; количество циклов до стадии разрушения при заданной деформации, температуре 10 °С и частоте 25 Гц – не менее 10^6 .

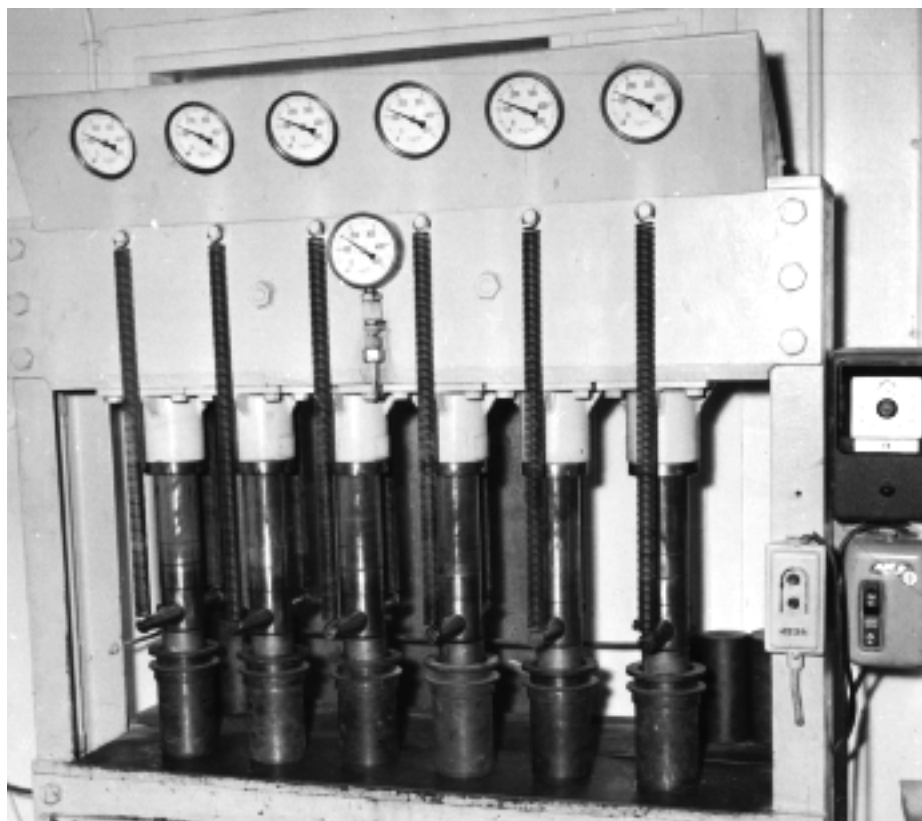


Рис. 2.12. Пресс для одновременного уплотнения шести образцов под давлением 12,0 МПа в течение 5 мин (Центральная лаборатория дорог и мостов Франции, 1964 год)

Особенность системы оценки качества асфальтобетона заключается в том, что она зависит от технологической стадии его существования. На этапе проектирования и подготовки к строительству выполняют полный цикл испытаний, изложенный выше. При изменении состава асфальтобетонной смеси в процессе ее заводского производства проверяют остаточную пористость после вращательного уплотнения; показатели физико-механических свойств образцов, уплотненных прессованием, и колеестойкость. В случае операционного производственного контроля устанавливают остаточную пористость после уплотнения вращательным прессом и физико-механические свойства образцов асфальтобетона, уплотненных прессованием.

3. СТРУКТУРА АСФАЛЬТОБЕТОНОВ И РОЛЬ МАТЕРИАЛОВ В ЕЕ ФОРМИРОВАНИИ

Свойства асфальтобетонных, как и других материалов, определяются их составом, структурой и состоянием.

Структура – это взаимное расположение, взаимное соотношение структурообразующих элементов и характер связи между ними. *Взаимное расположение* характеризуется *однородностью* распределения в асфальтобетоне его составляющих. Это означает, что в любой пробе смеси, отобранной из мешалки или с транспортного средства, гранулометрический состав минеральных материалов и содержание вяжущего должны быть воспроизводимы в пределах допускаемой статистической погрешности. Взаимное расположение – это также *плотность упаковки* структурообразующих элементов и расстояние между ними.

Роль структурообразующих элементов в асфальтобетоне выполняют щебень, песок и минеральный порошок. В зависимости от взаиморасположения, соотношения структурообразующих элементов и расстояния, на котором они расположены, могут образовываться принципиально различные структуры. На уровне структуры битумов и эмульсий в соответствии с этим принципом в зависимости от содержания асфальтенов в битуме или капель битума в эмульсии могут формироваться структуры типов «золь», золь-гель» и «гель» в битумах или разбавленные, концентрированные и высококонцентрированные структуры в эмульсиях.

Взаимное соотношение структурных элементов – это количественное (массовое или объемное) соотношение входящих в асфальтобетон зерен щебня, песка и минерального порошка. Соотношением между содержанием щебня, песка, минерального порошка определяется упаковка и расстояние между различными структурообразующими элементами. Таким образом, расположение и соотношение структурообразующих компонентов являются взаимосвязанными параметрами структуры. Когда щебня очень много, а песка и порошка мало, расстояние между зернами щебня небольшое. Когда песка и порошка много, а щебня мало, зерна щебня раздвигаются зернами песка и порошка. Вследствие этого они располагаются на большом расстоянии друг от друга. При этом формируется отличный от

предыдущего тип структуры. Естественно, свойства материалов, отличающихся структурой по признаку взаимного расположения структурообразующих элементов и их соотношения, будут различными.

В соответствии с этим в 60-х годах прошлого века профессором М.И. Волковым и его учениками в зависимости от количества (соотношения) и взаимного расположения структурообразующих элементов в асфальтобетоне выделено три типа структур.

Макроструктура, которая характеризуется взаимным расположением зерен щебня в асфальтобетоне и соотношением щебенистой и растворной части, представленной песком, минеральным порошком и битумом. Следовательно, все асфальтобетоны, содержащие щебень, имеют макроструктуру.

Мезоструктура^{*}, признаком которой является взаимное расположение зерен песка в асфальтобетоне и соотношение песка и асфальтовяжущего вещества, представленного минеральным порошком и битумом. Мезоструктура – это структура растворной части щебнесодержащего или песчаного асфальтобетона.

Микроструктура – это структура асфальтовяжущего вещества, характеризующаяся взаимным расположением зерен минерального порошка в среде битумного вяжущего.

Отсюда следует, что асфальтобетоны, содержащие щебень, обладают макро-, мезо- и микроструктурой. Макроструктура отчетливо видна невооруженным глазом. Если выделить пространство между зернами щебня, то в нем можно также визуально определить невооруженным глазом или рассмотреть с помощью лупы зерна песка. Следовательно, песчаные асфальтобетоны характеризуются наличием мезо- и микроструктуры.

В объеме, располагающемся между зернами песка, находятся зерна минерального порошка – структурообразующего элемента микроструктуры асфальтобетона.

Таким образом, каждая из структур асфальтобетона может рассматриваться как дисперсная система, состоящая из двух частей, в которой фазой является структурообразующий более крупный элемент, а средой – смесь меньших по крупности зерен с вяжущим. В щебенистом асфальтобетоне – структурообразующим элементом является щебень (фаза), а растворная часть, состоящая из песка, минерального порошка и битума, – средой (рис. 3.1).

^{*} Мезоструктура – средняя промежуточная часть

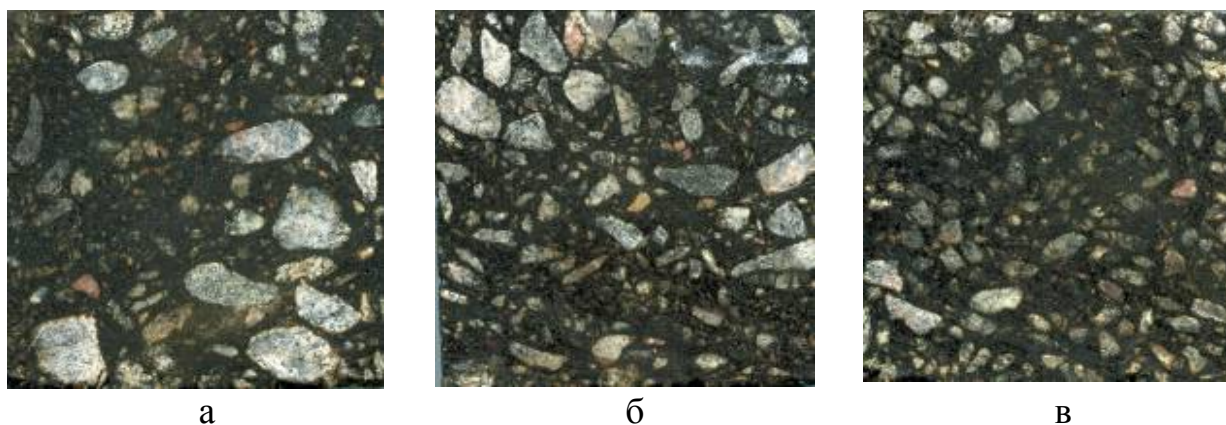


Рис. 3.1. Макроструктура асфальтобетона со щебнем различной крупности: а – 20 мм; б – 15 мм; в – 10 мм

В мезоструктуре асфальтобетона структурообразующим элементом (фазой) являются зерна песка, а средой – асфальтовязующее вещество. В микроструктуре структурообразующим элементом (фазой) являются зерна минерального порошка размером мельче 0,071 мм, а средой – битумное вяжущее. В битумах структурообразующими элементами являются асфальтены, а средой – мальтены, состоящие из смеси смол и масел. В прямых эмульсиях фазой являются капли битума, а средой – вода, в обратных – наоборот. В соответствии с этим в зависимости от содержания щебня в асфальтобетоне формируется три типа макроструктуры: базальная, промежуточная и контактная (рис. 3.2).



Рис. 3.2. Асфальтобетоны разных структурных и гранулометрических типов: щебеночно-мастичный (ЩМА); многощебенистый (А) с контактной; среднещебенистый (Б) с переходной; малощебенистый с базальной макроструктурой (В); песчаный (Г)

В случае *базальной макроструктуры* содержание щебня малó (до 30–35 %). Расстояние между зернами щебня велико, они свободно располагаются, «плавают» в растворной части. Свойства асфальтобетона с такой макроструктурой определяются свойствами растворной части и асфальтовяжущего вещества. В его составе содержится щебня менее 35 %, песчаных зерен около 53 %, минерального порошка около 12 %, вяжущего около 6–7 %. Отличительной особенностью таких асфальтобетонов является большое значение соотношения минерального порошка (МП) к битуму (Б) ($МП/Б \geq 2,0$). Такой тип макроструктуры присущ асфальтобетонам типа В.

В асфальтобетоне с *контактной структурой* из-за большого содержания щебня их зерна находятся в непосредственной близости друг от друга, контактируя через слой слабо структурированного асфальтовяжущего вещества. В таких асфальтобетонах содержится щебня 45–55 %, песчаных зерен около 41 %, минерального порошка около 9 %, битума 4,5–5,5 %. Отношение порошка к битуму меньше 1,5. Асфальтовяжущее вещество в этом случае характеризуется низкой вязкостью и прочностью. Механические свойства такого асфальтобетона определяются преимущественно устойчивостью каркаса (минерального остова), образуемого зернами щебня. Такой тип макроструктуры свойственен асфальтобетону типа А.

Между этими двумя крайними разновидностями макроструктуры существует *структура переходного типа*. В асфальтобетоне с такой макроструктурой достаточно большое содержание щебня – 35–45 %, песка – 47 %, минерального порошка – 10 %, битума – 5,5–7,0 %. Механические свойства такого асфальтобетона определяются сочетанием признаков каркаса и достаточно прочного асфальтовяжущего вещества с отношением порошка к битумам, близким к 1,5–2,0. Такой тип макроструктуры характерен для асфальтобетона типа Б.

Песчаные асфальтобетоны типа Г содержат около 17–32 % песчаной фракции 2–5 мм, 8–16 % минерального порошка 7–9 % битума. Отношение МП/Б в них более 2,2. Они могут рассматриваться как асфальтобетоны с мезоструктурой. В зависимости от содержания зерен песка в них, как и в случае щебенистых асфальтобетонов, могут быть выделены базальная, переходная и контактная мезоструктуры.

В зависимости от содержания минерального порошка в асфальтовяжущем веществе различают такие же типы микроструктуры. В

битумах, как было показано в первой части, в зависимости от содержания асфальтенов выделяют такие структуры: «золь», «золь-гель» и «гель».

Между типами микро- и макроструктур существует взаимосвязь, которая может быть представлена схемой (рис. 3.3). Базальному типу макроструктуры отвечает микроструктура переходного типа, а контактному типу макроструктуры – базальная микроструктура.



Рис. 3.3. Взаимосвязь между макро- и микроструктурой в асфальтобетонах

Наличие в асфальтобетонах тонкодисперсного минерального порошка и асфальтовяжущего вещества позволяет отнести его к коллоидным дисперсным системам, в которых мельчайшие частицы минерального порошка склеены тонкими пленками битумного вяжущего, являющегося термопластичной органической системой. Такие системы обладают коагуляционной структурой, определяющей их механические и физические свойства.

4. ФОРМИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Создание асфальтобетона как дорожного материала, работающего в сложных транспортных и климатических условиях, основывается, по крайней мере, на четырех принципах.

Высокая адгезия (прочное прилипание) вяжущего к поверхности каменных материалов обеспечивает прочность контакта в воздушной и водной среде на границе раздела фаз* пленки вяжущего с поверхностью минерального материала.

Высокая когезия вяжущего обеспечивает прочность межзернового пространства в асфальтобетоне.

Наличие контактов между мелкими минеральными зернами за счет тонких адсорбционно-сольватных слоев упрочненного (структурированного) битума.

Формирование в асфальтобетоне *каркаса из крупных* минеральных зерен (щебня), препятствующего его разрушению сдвиговыми усилиями.

Взаимосвязь и противостояние этих условий приводит к образованию асфальтобетонов с различными типами структур. Наглядно связь прочности с количеством структурообразующего элемента можно проследить на примере микроструктуры асфальтовяжущего вещества, поскольку она является наиболее однородной составляющей асфальтобетона (рис. 4.1).

В зависимости от содержания минерального порошка на концентрационной зависимости асфальтовяжущего четко обнаруживаются три типа его структуры. На первом участке зависимости – базальная, когда концентрация порошка в асфальтовяжущем находится в пределах 50–60 % по массе. Прочность асфальтовяжущего при этом изменяется незначительно по сравнению с когезией исходного битума.

* Фазы – ограниченные поверхностями раздела части гетерогенной (неоднородной) системы – асфальтобетона, характеризующиеся одинаковыми химическими и физическими свойствами во всех точках занятого ими объема

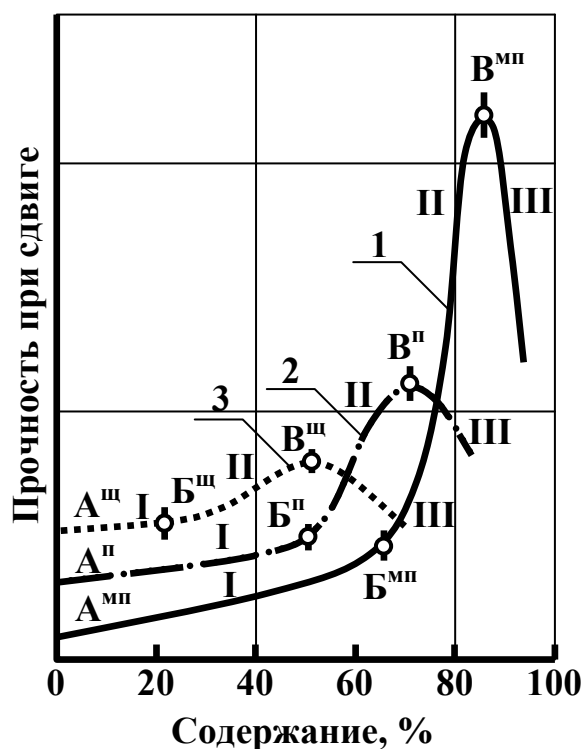


Рис. 4.1. Влияние содержания минерального порошка (1, А^{мп}, Б^{мп}, В^{мп}), песка (2, А^п, Б^п, В^п), щебня (3, А^щ, Б^щ, В^щ) на прочность соответственно асфальтовяжущего, асфальтового раствора и асфальтобетона, образующих I – базальную, II – переходную, III – контактную структуры

В научных публикациях, посвященных этой зависимости, часто подчеркивается, что первый участок (I) описывается уравнением А. Эйнштейна

$$\eta = \eta_0 \cdot (1 + 2,5 \cdot \varphi), \quad (4.1)$$

где η – вязкость системы (асфальтовяжущего);

η_0 – вязкость дисперсионной среды (битума);

φ – объемное содержание дисперсной фазы (частиц минерального порошка).

На самом деле диссертационная работа А. Эйнштейна, защищенная в 1905 году, была посвящена концентрационной зависимости вязкости идеальной жидкости, в которую вводят тонкодисперсный наполнитель в количестве до 2,5 %. Эта работа называется «Новое определение размеров молекул». Тем не менее, даже отдаленное подобие концентрационной зависимости асфальтовяжущего формуле А. Эйнштейна, полученной для более «чистых» систем, является

свидетельством фундаментальности процессов, лежащих в основе получения асфальтобетона. На *втором участке кривой*, отвечающей переходной микроструктуре, наблюдается резкое нарастание прочности, за счет сближения частиц и уменьшения толщины битумных пленок. *Третий участок* характерен для асфальтовяжущего с контактной структурой, когда пленки битума становятся очень тонкими, теряют клеящую способность, образуются очаги прямого контакта частичек порошка из-за недостатка битума для покрытия частиц сплошными пленками. По существу эта зависимость подобна той, которую обычно получают для прочности асфальтобетона от содержания битума.

Физическая сущность нарастания прочности с переходом от асфальтовяжущего с базальной структурой к асфальтовяжущему со структурой переходного типа была впервые объяснена в диссертационной работе И.М. Борща в 1957 г., а затем углублена в работах Н.В. Горелышева (СоюздорНИИ) и П.А. Ребиндера (Институт физической химии АН СССР). Она заключается в том, что битум в асфальтовяжущем и асфальтобетоне по своим свойствам принципиально отличается от исходного. В битуме, покрывающем поверхность минеральных частиц, образуются адсорбционно-диффузионные слои, т.е. слои, в которых сосредотачивается больше активных его компонентов, чем в объемном (чистом) битуме, взаимодействующих с поверхностью каменных материалов. Эти слои академик П.А. Ребиндер назвал *структурированными* (рис. 4.2).

Структурированные слои формируются следующим образом. Каждая частица минерального порошка в процессе перемешивания покрывается пленкой битума. Будучи очень мелкими, частицы минерального порошка обладают большой свободной энергией и адсорбируют активные компоненты битума. Особая роль в этом принадлежит асфальтенам, которые обладают преимущественно отрицательным зарядом. Благодаря этому они вступают в электростатическое взаимодействие с положительно заряженной поверхностью минерального порошка, полученного из карбонатных горных пород. По мере удаления от поверхности степень ориентации уменьшается, и на определенном удалении (зависит от вида и марки битума, а также активности минеральной поверхности) она полностью исчезает. Битум на удалении, превышающем толщину адсорбционно-диффузионных слоев, называют *свободным или объемным*.

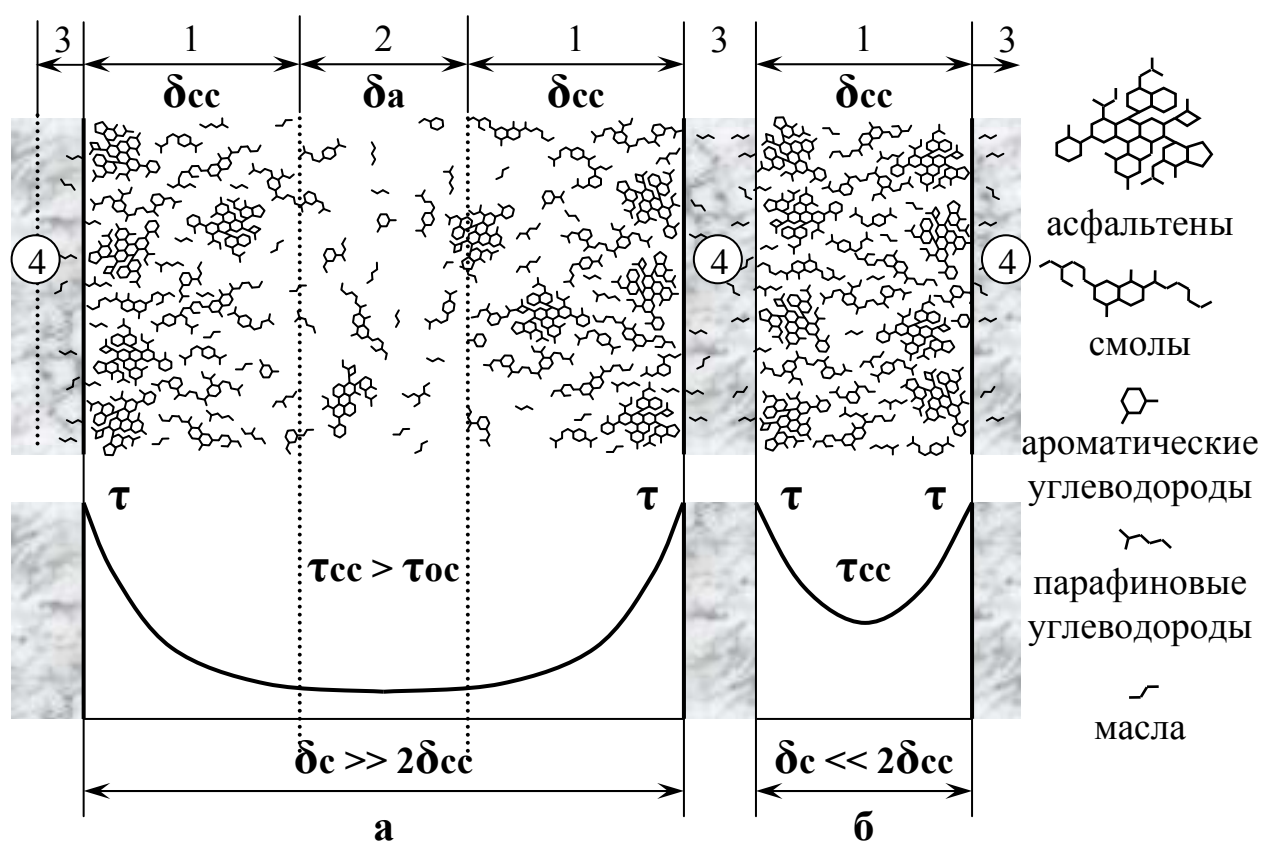


Рис. 4.2. Схема структурирования битума поверхностью каменного материала: а – контакт между поверхностями по объёмному битуму с прочностью τ_{oc} ; б – контакт между поверхностями по структурированному битуму с прочностью τ_{cc} ; 1 – структурированный слой битума; 2 – слой объёмного битума; 3 – диффузия масел внутрь каменных материалов; 4 – каменный материал

Структурированный битум отличается от объёмного многими свойствами, но главными в отношении асфальтобетона являются вязкость и когезия. Максимальной вязкостью и когезией обладает битум, находящийся в поверхностном слое, по мере удаления от поверхности значения этих свойств уменьшаются. Упрочнению битума в поверхностном слое может способствовать химическая адсорбция. Это происходит в тех случаях, когда в битуме содержатся асфальтогеновые кислоты, которые, взаимодействуя с карбонатом кальция, образуют поверхностные водонерастворимые химические соединения – кальциевые мыла. Кроме того, поверхностный слой может упрочняться за счет избирательной диффузии битумных масел в микропоры каменного материала и сосредоточения в результате этого на поверхности каменного материала большого количества смол и асфальтенов (структурирующей составляющей

битумов). Масла проникают в поры, в то время как на поверхности частицы сосредотачивается асфальто-смолистая составляющая битума. Как показано в первой части, когезия и вязкость мальтенов существенно выше, чем масел. Фактор избирательной диффузии более вероятен для карбонатных (даже плотных) горных пород, чем для изверженных. Это связано не только с меньшей пористостью последних, но и с худшей смачиваемостью пор кислых пород битумом.

Избирательная диффузия битумных составляющих впервые обнаружена В.М. Смирновым в ХАДИ. Она может быть проиллюстрирована простым опытом. Пластины из плотного известняка и светлого гранита погружаются на небольшую глубину в промышленное масло и выдерживаются в нем сутки-двое (рис. 4.3). В процессе выдерживания находящаяся на воздухе часть пластин за счет капиллярного подъема пропитывается маслом. При этом масло гораздо больше по высоте и сечению пропитывает плотный известняк, чем гранит. Соотношение влияния на структурирование пленок битума у поверхности каменных материалов процессов межмолекулярного, электростатического, диффузионного, химического взаимодействия к настоящему времени практически не изучено.



а – вода

б – растительное масло

в – промышленное масло

Рис. 4.3. Избирательная диффузия воды и масел в известняк (капиллярный подъём – впитывание)

Если две минеральные частицы, покрытые битумом, находятся на большом расстоянии, то контакт между ними осуществляется по объемному битуму, что характерно для асфальтобетонов с большим и избыточным (когда остаточная пористость близка к 0 %) содержанием битума. Прочность таких асфальтобетонов очень мала, поскольку мала прочность асфальтовяжущего вещества. Чтобы получить асфальтовяжущее высокой прочности, нужно обеспечить контакт между частицами по тонким слоям структурированного битума. Чем тоньше слой (в пределах технологических возможностей), тем прочнее асфальтовяжущее и асфальтобетон.

Увеличение содержания порошка в асфальтовяжущем в пределах структур базального и переходного типа приводит к уменьшению толщины пленки битума и увеличению ее прочности. Таким образом, регулируя толщину пленки битума за счет изменения отношения МП/Б, можно управлять механическими свойствами асфальтобетона.

Чтобы предсказать прочность асфальтобетона, нужно в качестве исходных данных знать толщину пленки битума в асфальтовяжущем на границе базальной и переходной макроструктур. Эта толщина отвечает зарождению контактов по структурированным слоям $\delta_{асс}$. Эти данные могут быть получены из анализа зависимостей прочности асфальтовяжущих на битумах разных марок от содержания минерального порошка (рис. 4.4). Рассмотрение этих зависимостей показывает, что с ростом пенетрации битума толщина структурированной пленки уменьшается, также уменьшается прочность асфальтовяжущего, отвечающего этой толщине. Это соответствует зависимостям когезии битумов от их пенетрации (часть I, раздел 8). При этом форма концентрационных зависимостей прочности асфальтовяжущего на разных по консистенции битумах идентична. Толщина пленки ($\delta_{нс}$) в мкм в каждом случае определяется по формуле

$$\delta_{нс} = \frac{10Б}{\rho_б \cdot S_{п}}, \quad (4.2)$$

где Б – масса битума в % к массе минеральной части;

$S_{п}$ – поверхность зерен минерального материала, м²/кг;

$\rho_б$ – плотность битума, кг/м³.

Если зависимость прочности асфальтовяжущего представить в логарифмических координатах, то она будет изображаться двумя прямыми, расположенными под разными углами к оси абсцисс. Эти же зависимости для асфальтовяжущих на битумах разных марок можно представить в безразмерном виде, отложив по оси ординат отношение фактической прочности (R_{ϕ}) к прочности структурированного битума ($R_{стр}$), а по оси абсцисс отношение фактической толщины пленки битума в асфальтобетоне (δ_{ϕ}) к толщине пленки, отвечающей началу структурирования $\delta_{асс}$. Тогда для всех асфальтобетонов будет получена одна обобщенная зависимость, состоящая из двух участков с разными углами наклона (рис. 4.5). Нижний участок относится к асфальтовяжущему с базальной микроструктурой, а верхний – к асфальтовяжущему с переходной микроструктурой.

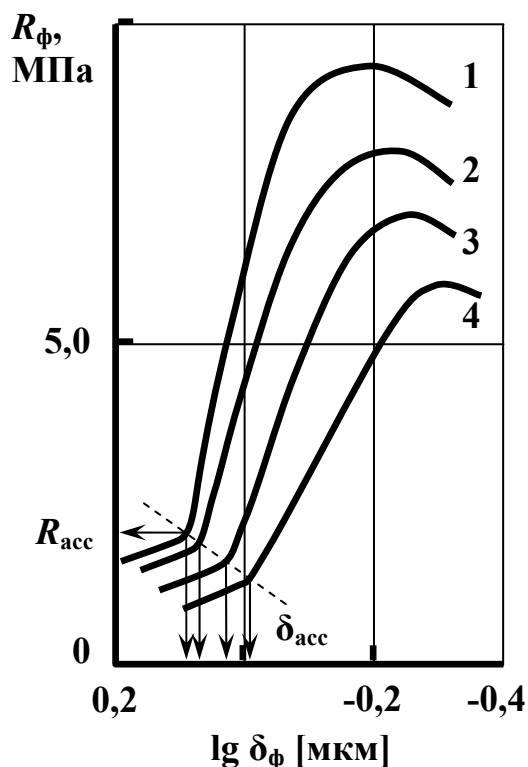


Рис. 4.4. Зависимость прочности асфальтовяжущего от фактической толщины пленки битума марок: БНД 40/60 (1); БНД 90/130 (2); БНД 130/200 (3); БНД 200/300 (4) (по данным И.В. Королева)

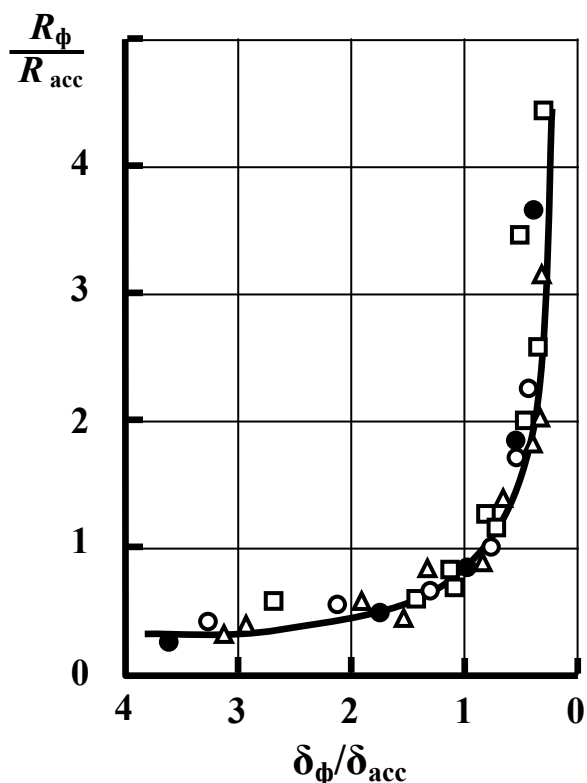


Рис. 4.5. Обобщенная зависимость прочности асфальтовяжущего от содержания известняка и битумов:
□ – 1-го структурного типа; ○ – 2-го структурного типа; △ – 3-го структурного типа; ● – кварца и битума 2-го структурного типа

Эта обобщенная зависимость описывается формулой, подобной той, которая более 50 лет назад была предложена профессором И.А. Рыбьевым

$$R_{\phi} = R_{\text{стр}} \left(\frac{\delta_{\text{асс}}}{\delta_{\phi}} \right)^n. \quad (4.3)$$

Варьируя содержание битума, по формуле (4.4) можно определить толщину пленок проектируемого асфальтобетона. Из формулы следует, что чем меньше толщина слоя битума в асфальтобетоне по отношению $\delta_{\text{асс}}$, тем больше прочность асфальтобетона. Это правило справедливо в отношении показателей прочности при разных схемах напряженного состояния (растяжении, сжатии, изгибе, сдвиге), а также для вязкости и модулей упругости. Регулировать механические свойства асфальтобетона за счет его микроструктуры возможно изменением вязкости битумного вяжущего не только традиционным изменением его пенетрации или когезии, но и введением в него различных добавок (структурирующих и модифицирующих). Для повышения прочности асфальтобетона также можно и необходимо увеличивать степень дисперсности и активности минерального порошка за счет повышения содержания в нем зерен мельче 0,071 мм, использовать порошки из карбонатных горных пород и активированные порошки.

Способность минерального порошка структурировать (усиливать) битум стала первопричиной появления в 30-х годах XIX столетия первых литых тротуарных смесей (см. часть 1). Роль структурированного битума в них играл природный асфальт с очень высокой температурой размягчения. Но такой асфальтобетон не мог сопротивляться развитию пластических деформаций под возрастающим гужевым, а затем и автомобильным движением. С появлением искусственных битумов в смесь каменных материалов стали добавлять большое количество минерального порошка, щебень же рассматривался как инертный заполнитель. До 1967 года прошлого столетия стандарты рекомендовали к применению для верхних слоев дорожных одежд асфальтобетон, содержащий около 30 % щебня и до 20 % минерального порошка. Естественно, это был асфальтобетон с базальной макроструктурой. Но к этому времени транспортная ситуация резко изменилась. Все больше грузов перевозили автомобильным транспортом, возрастала нагрузка на ось автомобиля и

скорость движения. Традиционное для того времени асфальтобетонное покрытие не выдерживало таких нагрузок, оно пластически деформировалось, на нем быстро формировались колеи, наплывы, волны.

Это побудило исследователей обратить внимание на роль щебня в асфальтобетоне. Была разработана концепция, согласно которой увеличение содержания щебня приведет к созданию в асфальтобетоне каркаса, что обеспечит сдвигоустойчивость покрытия. В результате обширных и глубоких исследований, предпринятых во многих странах мира, были разработаны асфальтобетоны с повышенным содержанием щебня, т.е. асфальтобетоны с переходной и контактной макроструктурами. Этим асфальтобетонам присущи свои особенности и закономерности.

С ростом содержания щебня существенно уменьшалось содержание минерального порошка. Этому способствовало применение гранулометрических составов плотных смесей, подобранных по коэффициенту сбега, близкому к 0,65. В результате этого общая поверхность зерен минеральной части уменьшалась, уменьшалось также оптимальное содержание битума. Однако из условий назначения оптимального содержания битума (обеспечение максимальной прочности асфальтобетона) и предельно допустимой плотности по водонасыщению содержание битума уменьшалось в меньшей степени, чем удельная поверхность (рис. 4.6).

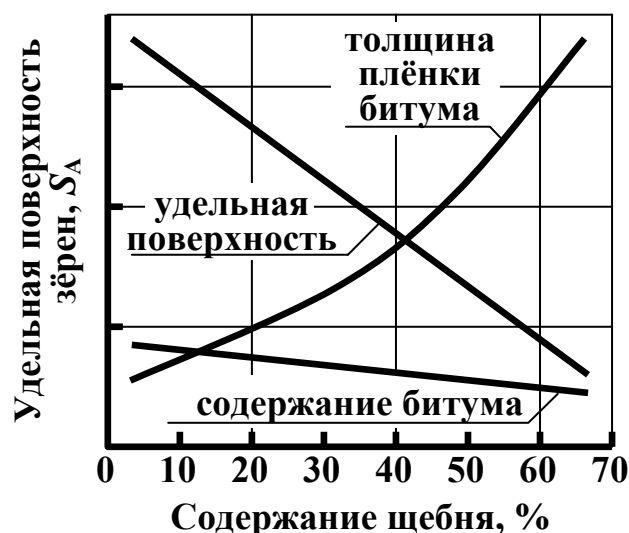


Рис. 4.6. Зависимость удельной поверхности минеральных зерен, толщины пленки и содержания битума от содержания щебня в смеси

Необходимость большой толщины пленок битума в таких смесях связана с увеличением их средневзвешенной крупности. Так, смесь типа В с 30 % щебня имеет среднюю крупность 4,0 мм, а смеси типа А с 55 % щебня – 6,8 мм. В то же время существует закономерность, обнаруженная французским ученым М. Дюрье, согласно которой чем больше размер зерна, тем больше толщина удерживаемой на нем пленки битума (рис. 4.7). К тому же из технологических условий, требующих, чтобы каждое зерно, включая все выступы и неровности минерального материала, было покрыто равномерной пленкой, также следует, что пленка должна быть более толстой, поскольку выступы шероховатости близки к 0,1 диаметра зерна. Тогда для зерна щебня 15 мм высота шероховатости близка к 1,5 мм, песка – 0,2 мм, а минерального порошка – 0,071 мм. В результате средняя толщина пленки битума возрастает. Соответственно с этим должна уменьшаться и прочность асфальтобетона.

В то же время рост содержания щебня изменяет макроструктуру асфальтобетона. При содержании щебня около 50 % его зерна вступают в зацепление через слои достаточно структурированного битума. С дальнейшим ростом содержания щебня в асфальтобетоне отношения с МП/Б все больше снижается и все больше битума переходит из структурированного состояния в объемное.

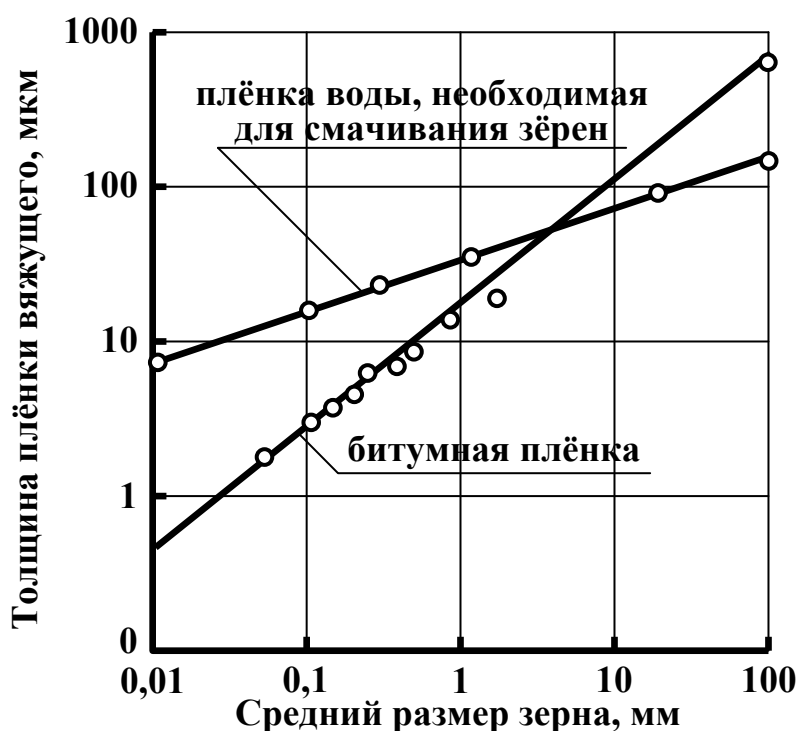


Рис. 4.7. Зависимость толщины плёнки жидкости от среднего размера минерального зерна, по М. Дюрье, Ж. Аррамбиду

В результате этого микроструктура асфальтобетона с повышением содержания щебня смещается в сторону базальной с низкой степенью структурирования битума, а перемещение зерен щебня друг относительно друга затрудняется из-за необходимости преодоления неровностей поверхности сдвига (рис. 4.8). Такой характер перемещения зерен щебня в асфальтобетоне можно рассматривать как проявление в нем внутреннего трения, которое отличается от внешнего трения, характерного для сыпучих материалов. Тогда согласно закону Кулона прочность минерального остова асфальтобетона нарастает

$$\tau = p \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (4.4)$$

где τ – сопротивление сдвигу;
 p – вертикальное давление;
 φ – угол внутреннего трения;
 c – сцепление.



Рис. 4.8. Разрез многощебенистого асфальтобетона с огибающей поверхностью сдвига

Следовательно, с увеличением содержания щебня в смеси протекают два конкурирующих процесса: уменьшение прочности пленок (сцепления) и рост внутреннего трения, способствующий увеличению прочности асфальтобетона.

Результирующая этих двух процессов закономерность проходит через максимум, положение которого в зависимости от крупности зерен щебня в смеси, их формы и характера поверхности, а также

вязкости и вида битума, находится в пределах 40–50 % щебня (рис. 4.9). Такой асфальтобетон является оптимальным по многим признакам. В частности, во Франции он под названием полущебенный (semi-grenue) является наиболее распространенным для устройства верхнего слоя покрытия на протяжении последних 50-ти лет.

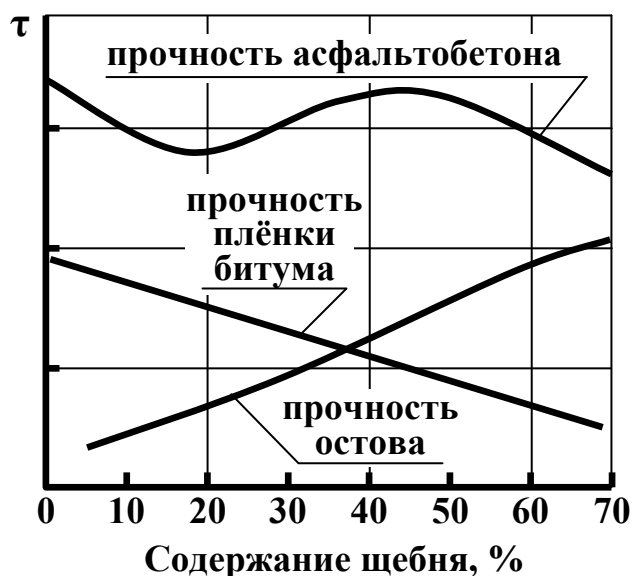


Рис. 4.9. Результирующая зависимость сопротивления асфальтобетона сдвигу от содержания щебня

Чтобы учесть два важнейших фактора, определяющих механические свойства асфальтобетона, в (4.3) можно ввести безразмерный коэффициент, учитывающий увеличение поверхности разрушения как огибающей выступы шероховатости по отношению к геометрической (номинальной) площади поверхности. Тогда формула по определению прочности асфальтобетона приобретает вид

$$\tau_{аб} = \tau_{стр} \left(\frac{\delta_{стр}}{\delta_{\phi}} \right)^{m \cdot K_{п}}, \quad (4.5)$$

где $K_{п}$ — коэффициент, представляющий собой отношение площади, учитывающей неровности поверхности разрушения (S_{ϕ}), к номинальной геометрической площади гладкой поверхности значения ($S_{н}$).

Этот коэффициент по мере увеличения содержания щебня растет от 1,2 для песчаного асфальтобетона до 1,28; 1,5; 1,8; 1,92; 1,78 соответственно для асфальтобетонов с содержанием щебня

20 %, 30 %, 40 %, 50 %, 60 %. Значения (K_n) могут быть определены измерением огибающих поверхность разрушения в асфальтобетонах.

Многощебенистые асфальтобетоны обладают достаточно большой остаточной пористостью, которая снижает их прочность. В связи с этим в каждом отдельном случае может быть введен коэффициент, учитывающий фактор пористости, определяемый как отношение средней плотности асфальтобетона к истинной. Значение этого коэффициента колеблется в пределах от 0,95 до 0,99.

Многочисленные экспериментальные данные показывают, что прочность на сжатие, изгиб и сдвиг асфальтобетонов контактной макроструктуры с большим содержанием (типа А) щебня меньше, чем асфальтобетонов с умеренным его содержанием (типа Б), характеризующихся макроструктурой промежуточного типа. Это также отражено в требованиях к прочности асфальтобетонов типа А, изложенных в государственных стандартах Украины, России, Беларуси. Тем не менее, в реальных условиях накопление пластических деформаций на покрытиях, устроенных из таких и даже более щебенистых (щебеночно-мастичных асфальтобетонов) существенно меньше, чем на малощебенистых асфальтобетонах типа В. Это объясняется, по крайней мере, двумя обстоятельствами: первое – принятые методы и схемы определения сдвигоустойчивости асфальтобетона, в частности прочность на сжатие при 50 °С, не отвечают условиям работы его в покрытии; второе – в покрытии многощебенистый асфальтобетон работает как защемленная плита с ограниченным в объеме смещением зерен минеральных материалов друг относительно друга.

5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОЛУЧЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ И АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

Технология получения асфальтобетонов включает две основные стадии: процесс перемешивания смеси каменных материалов с вяжущим и процесс уплотнения полученной битумоминеральной смеси. Оба эти процесса, как правило, осуществляется при повышенных технологических температурах. Исключение представляют холодные смеси, которые перемешивают при относительно высоких температурах, а уплотняют при температуре окружающего воздуха, смеси на эмульсиях, которые перемешивают и уплотняют при температуре окружающего воздуха.

Здесь не рассматривается процесс транспортирования смеси к месту укладки и уплотнения. Основной целью этой технологической стадии является максимальное сохранение свойств смеси, достигнутых при ее перемешивании. Это касается главным образом температуры смеси и ее однородности, т.е. предупреждения сегрегации. Достижение этой цели обеспечивается организационными мероприятиями: установлением оптимальной дальности перевозки, применением специальных (утепленных) транспортных средств, ограничением строительного сезона, правильным распределением смеси при выгрузке в транспортное средство.

5.1. Перемешивание асфальтобетонных смесей

Целью процесса перемешивания смесей является максимально полное покрытие зерен каменных материалов сплошной, равномерной по толщине для зерен одного размера пленкой вяжущего. Достижение этой цели возможно благодаря знанию закономерностей формирования пленок вяжущего на поверхности минеральных зерен. Эти закономерности аналогичны тем, что имеют место при формировании пленок любой жидкости на твердой поверхности.

Обязательным элементом технологии перемешивания горячих, холодных и литых смесей является перевод термопластичного вяжущего

щего в текучее состояние. Без этого невозможно ни растекание вяжущего по поверхности каменных материалов, ни смачивание минеральных материалов вяжущим. Текучесть жидких систем определяется их вязкостью (часть I, раздел 8). В отношении битумных вяжущих чрезвычайно важно установить температуры их перехода в состояние, при котором возможно осуществление процесса перемешивания.

Для этого необходимо установить температурные зависимости вязкости вяжущих разных марок и видов. Критерием назначения минимально допустимой температуры разогрева вяжущего при перемешивании является *температура ($T_{0,5}$), отвечающая вязкости 0,5 Па·с*. В западных странах в связи с преимущественным применением для дорожных целей дистилляционных (остаточных) битумов из тяжелых нефтей, критическая вязкость битума при перемешивании должна быть не выше 0,2 Па·с.

Температурные зависимости вязкости битумов определяются их составом, структурой и маркой. Естественно, чем больше глубина проникания иглы, тем меньше вязкость битума. В соответствии с этим температурные зависимости вязкости достигают уровня эквивязкой температуры ($T_{0,5}$) в последовательности, показанной на рис. 5.1.

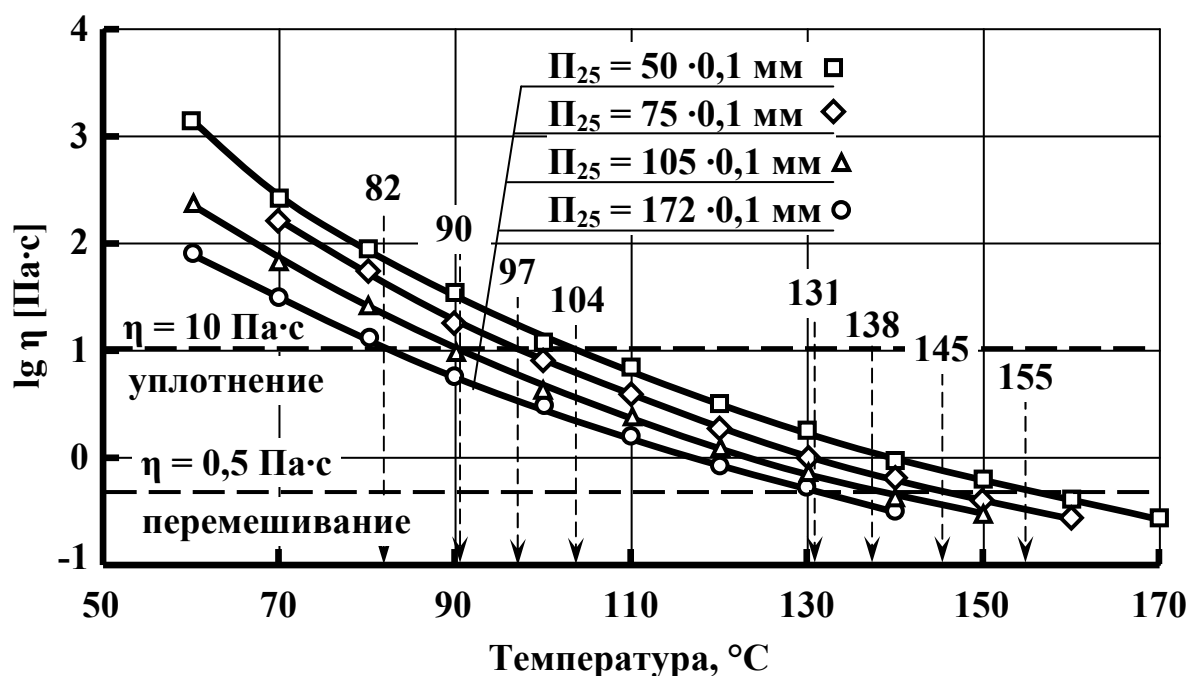


Рис. 5.1. Температурные зависимости вязкости битумов разной пенетрации

Установленные таким образом температуры нагрева битума при перемешивании смесей включаются в стандарты. Примером такого подхода могут служить данные, приведенные в табл. 5.1.

Таблица 5.1

**Температуры нагрева асфальтобетонных смесей
и их составляющих при перемешивании и уплотнении**

Марка битума	Температура, °С			
	битумного вяжущего, подаваемого в смесь	минеральных материалов на выходе из сушильного барабана	асфальтобе- тонной смеси на выходе из смесителя	асфальто- бетонной смеси в начале уплотнения
БНД 40/60	145–165	175–185	150–165	140–155
БНД 60/90	140–155	170–180	145–160	135–145
БНД 90/130	135–145	165–175	140–155	130–140
БНД 130/200	125–135	155–165	135–145	125–135
МГО 130/200,	90–110	125–145	100–120	при температуре приготовления или не ниже температуры окружающей среды
МГ 130/200	90–110	125–145	100–120	то же самое
СГ 130/200	80–105	115–140	90–115	то же самое
МГО 70/130	80–90	115–125	90–100	то же самое
МГ 70/130	80–90	115–125	90–100	то же самое
СГ 70/130	75–90	110–125	85–100	то же самое

Наиболее вязким битумам соответствуют высокие температуры, уменьшающиеся с увеличением пенетрации от 40 до $200 \times 0,1$ мм, а жидким – низкие температуры, уменьшающиеся с уменьшением условной вязкости от 200 с до 40 с.

Перевод битумного вяжущего в текучее состояние нагревом до вязкости 0,5 Па·с является обязательным, но недостаточным. Физической сутью процесса перемешивания является обеспечение *смачивания поверхности* каменных материалов вяжущим. Смачивание той или иной поверхности вяжущим определяется соотношением сил поверхностного натяжения (σ) на границе раздела фаз: минеральная

поверхность – вязущее – воздух. Критерием смачивания является *краевой угол смачивания* θ твердой поверхности (рис. 5.2). Чем меньше величина этого угла, тем лучше смачивание. Существуют поверхности, угол смачивания жидкостью которых менее 90° . Такие поверхности называются *лиофильными* (в случае органических жидкостей – *олеофильными*). Поверхности, угол смачивания жидкостью которых больше 90° , называют *лиофобными* (отталкивающими жидкость), в случае органических жидкостей – *олеофобными*. Естественно, значение краевого угла смачивания зависит и от вида жидкости. Жидкости, имеющие большое поверхностное натяжение, хуже смачивают твердые поверхности, чем жидкости, обладающие малым поверхностным натяжением.

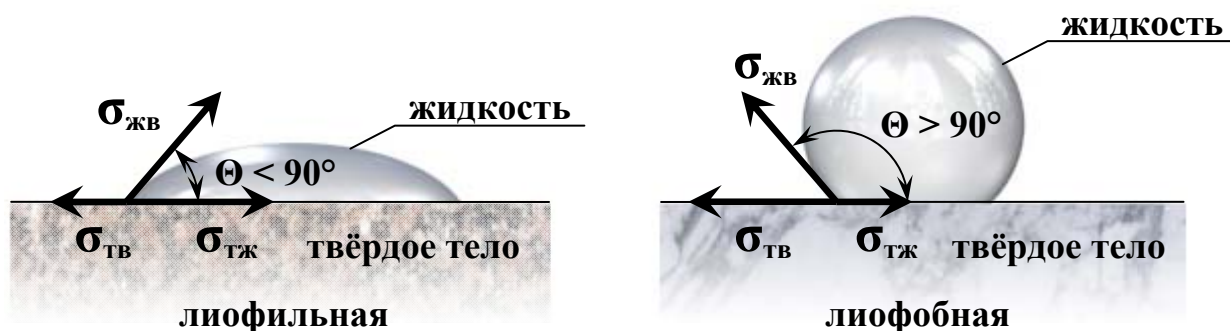


Рис. 5.2. Краевой угол смачивания жидкостью твердой подложки

Иллюстрацией этого могут служить данные по смачиванию водой поверхностей: кварца – $4-8^\circ$; мрамора – $15-30^\circ$; парафина – 106° ; битума – около 90° . Обладающая огромным поверхностным натяжением (475 мДж/м^2) ртуть вообще не смачивает твердые поверхности. Она разделяется на шарики, которые катаются по поверхности.

Результирующее значение краевого угла смачивания определяется особенностями пары: твердая поверхность – жидкость. Значение краевого угла смачивания для каждой конкретной пары может служить основанием для прогноза качества перемешивания смеси минеральных частиц тем или иным битумным вяжущим. Краевой угол смачивания определяют по формуле

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{тв}} - \sigma_{\text{тб}}}{\sigma_{\text{бв}}}, \quad (5.1)$$

где $\sigma_{ТВ}$ – поверхностное натяжение твердого тела (каменного материала) на границе с воздухом;

$\sigma_{ТБ}$ – поверхностное натяжение на границе раздела фаз: твердое тело – битум;

$\sigma_{БВ}$ – поверхностное натяжение битума на границе с воздухом в мДж/м².

Это уравнение следует из условия равновесия капли

$$\sigma_{ТВ} = \sigma_{ТБ} + \sigma_{БВ} \cdot \cos\theta. \quad (5.2)$$

В соответствии с приведенной формулой, качеством смачивания битумным вяжущим минеральных материалов можно управлять за счет различных факторов. Прежде всего, этого можно достичь изменением поверхностного натяжения вяжущего. Поверхностное натяжение вяжущих уменьшается с ростом температуры (рис. 5.3).

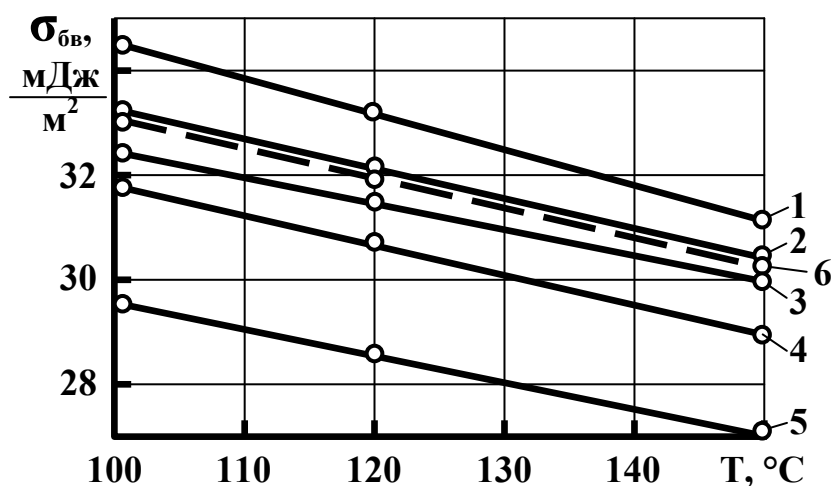


Рис. 5.3. Зависимость поверхностного натяжения от температуры для битумов: 1 – БНД 40/60; 2 – БНД 60/90; 3 – БНД 90/130; 4 – БНД 130/200; 5 – БНД 200/300; 6 – БНД 40/60 + ПАВ

Такое снижение объясняется тем, что с повышением температуры силы молекулярного взаимодействия в вяжущем, обуславливающие поверхностное натяжение, уменьшаются из-за увеличения расстояния между молекулами вещества. Это также обуславливает взаимосвязь между поверхностным натяжением и вязкостью битумов, которая снижается при нагреве. Следовательно, повышение температуры вяжущего при перемешивании приводит к улучшению смачивания. Однако нельзя выпускать из вида, что повышение

температуры сопровождается технологическим старением вяжущего, а в некоторых случаях оно может привести к вспышке вяжущего. Кроме того, любое повышение температуры вредно для окружающей среды из-за увеличения выброса CO_2 («углеродный след») и других газов.

Поверхностное натяжение битумов зависит от их марочной вязкости. Ряду битумов марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130, БНД 130/200, БНД 200/300 при температуре 120 °С соответствуют понижающиеся значения поверхностного натяжения: 33, 32, 31, 30, 28 мДж/м². Следовательно, чем ниже марочная вязкость битума, тем лучше он смачивает поверхность каменного материала. Подобного эффекта можно добиться пластификацией или разжижением вязких битумов.

Исключительно эффективным способом регулирования процессов смачивания и достижения высококачественного перемешивания является добавление в битум поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые снижают поверхностное натяжение битума, растекаясь по поверхности каменных материалов (часть I, раздел 5). Выбор (ПАВ) осуществляется с учетом природы и заряда поверхности минерального материала, используемого для получения асфальтобетона. В случае минеральных материалов из кислых пород (гранит, кварцит, сиенит, диорит и т.д.), имеющих преимущественно отрицательный заряд поверхности, необходимо использовать катионактивные ПАВ, обладающие положительно заряженной функциональной группой. Для материалов, обладающих положительно заряженной поверхностью (преимущественно карбонатные горные породы – известняк, доломит, мрамор), необходимо использовать анионактивные ПАВ, обладающие отрицательно заряженной полярной группой. Как следует из рис. 5.3, поверхностное натяжение битума с оптимальным содержанием ПАВ существенно ниже, чем исходного (чистого) битума.

Доказательством влияния поверхностного натяжения битума на значение краевого угла смачивания им твердой подложки являются следующие данные. Введение 1 % анионактивного ПАВ в битум приводит к снижению краевого угла смачивания поверхности мрамора при температуре 110 °С с 25° до 18°, а введение 0,5 % катионактивного ПАВ в битум снижает краевой угол смачивания битумом поверхности гранита при температуре 125 °С с 23° до 17°. При этом в первом случае поверхностное натяжение битума снижается с

35 мДж/м², а во втором – с 33 мДж/м² до 25 мДж/м². Краевой угол смачивания чистого битума водой равен 91°, а введение в воду ПАВ в количестве 1 % снижает краевой угол смачивания до 26°.

Эти данные свидетельствуют о недостаточной информативности температуры, отвечающей вязкости 0,5 Па × с, для предсказания температурного режима перемешивания асфальтобетонной смеси. В пользу этого свидетельствуют также различные значения краевого угла смачивания при 140 °С одним и тем же битумом подложек из кварцита – 15° и мрамора – 8° (рис. 5.4, а). Следовательно, наряду с критерием вязкости для назначения температур нагрева составляющих асфальтобетонной смеси целесообразно использовать и температуру, при которой угол смачивания подложки битумом был бы не больше 15°. Использование этого критерия позволит выбрать энергосберегающий режим производства смесей без ущерба их качеству. Благодаря этому, температура нагрева минеральных материалов из карбонатных пород по сравнению с материалами из кислых пород может быть снижена на 5–12 °С, использование же качественных ПАВ позволит снизить температуру нагрева составляющих на 15–20 °С (рис. 5.4, б).

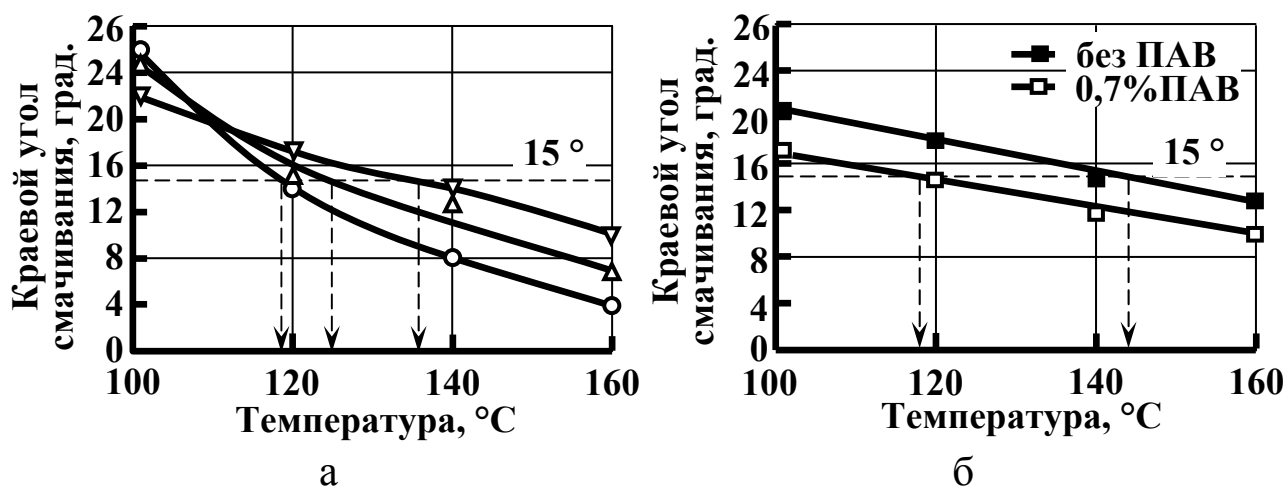


Рис. 5.4. Температурная зависимость краевого угла смачивания и температуры, отвечающей углу 15°:

а – битумом минеральных поверхностей:

○ – мрамор; △ – гранит; ▽ – кварц

б – чистым битумом (■)

и битумом с 0,5 % Wetfix (□)

При назначении условий смачивания и перемешивания каменных материалов с вяжущим необходимо учитывать также некоторые фундаментальные положения, касающиеся смачиваемой подложки и смачивающей жидкости. Общее правило заключается в том, что

лучшее смачивание достигается тогда, когда подложка и жидкость близки по полярности. Вода – полярная жидкость, а битум – неполярная жидкость, поэтому они не совместимы: вода плохо смачивает битум. В то же время вода хорошо смачивает стекло, кварц и другие системы с сильным межмолекулярным взаимодействием, т.е. с большой полярностью. Битум (органическая система) при технологической температуре хуже смачивает такие подложки, поскольку разность полярности поверхностей в случае битума выше, чем в случае воды. Косвенно это правило может быть сформулировано так: *чем тверже минерал или минеральный материал, тем лучше он смачивается водой и хуже битумом.* В связи с этим можно ожидать неоднородности смачивания поверхности каменных материалов полиминеральных пород, каковыми являются многие изверженные и метаморфические горные породы. Следуя этому правилу, можно заключить, что поверхность карбонатных пород (менее твердых) должна лучше смачиваться вяжущим, чем поверхность кислых более твердых пород, что подтверждают приведенные выше данные (рис. 5.4).

Этот вывод имеет большое практическое значение в отношении природы применяемого в качестве тонкодисперсной добавки в асфальтобетонную смесь минерального порошка. Использование минерального порошка из карбонатных горных пород обеспечивает хорошее его обволакивание битумом. Этому сопутствуют еще два обстоятельства: первое – помол карбонатных горных пород осуществляется с меньшими ресурсозатратами; второе – на поверхности зерен минерального порошка, поверхность которого составляет около 85 % всей поверхности минеральной части смеси, формируются, как было показано выше, специфические адсорбционно-диффузионные (структурированные) слои вяжущего, придающие асфальтобетону высокую прочность и водоустойчивость. Асфальтобетоны с порошком из прочных кислых горных пород в отношении водоустойчивости уступают асфальтобетонам с карбонатным порошком. В случае карбонатного минерального порошка может иметь место еще одно явление, способствующее повышению качества асфальтобетона. Это *хемосорбция*, т. е. протекание химической реакции между асфальтогеновыми кислотами битума и карбонатом кальция (CaCO_3). В результате такой реакции образуются нерастворимые в воде кальциевые мыла, что благоприятно сказывается на водоустойчивости асфальтобетона.

Реальные минеральные материалы имеют шероховатую поверхность, что не может не сказаться на процессах смачивания их битумом.

мом. Влияние шероховатости поверхности каменных материалов сводится к следующему: шероховатость зерен каменных материалов, хорошо смачиваемых вяжущим, способствует смачиванию, а шероховатость зерен, плохо смачиваемых вяжущим, – наоборот, ухудшает смачивание. Следовательно, шероховатость карбонатных каменных материалов не только не ухудшает смачивание, но даже улучшает его. В то же время шероховатость поверхности кислых минеральных материалов может его ухудшать. Это хорошо согласуется с сущностью капиллярного подъема в порах со смачиваемыми и несмачиваемыми жидкостью стенками. Если жидкость хорошо смачивает стенки капилляров, она поднимается по капиллярам, если же нет, то она опускается (рис. 4.3).

Качество покрытия вяжущим зерен минеральных материалов зависит от их крупности. Смачивание крупных зерен подчиняется обычным законом растекания-смачивания. С уменьшением размера зерен улучшаются условия гравитационного растекания вяжущего. При очень малых размерах зерен (например минерального порошка) происходит не просто смачивание, а их поглощение вяжущим. Этим объясняется тот факт, что при перемешивании мелкие каменные частицы покрываются битумом в первую очередь, и образовавшееся в результате этого асфальтовяжущее, обладающее большой вязкостью, не так интенсивно покрывает крупные минеральные зерна. Полное их покрытие битумом достигается за счет интенсивного принудительного механического перемешивания (рис. 5.5).

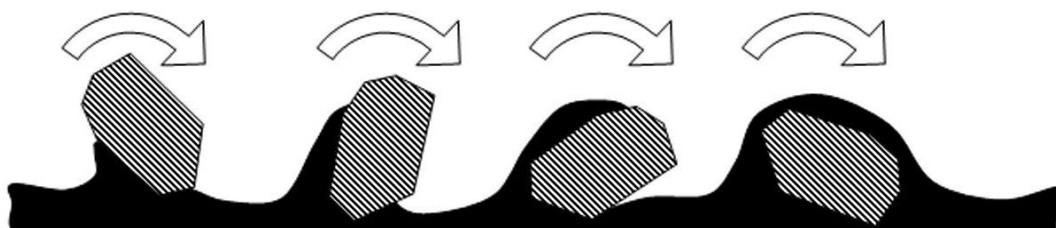


Рис. 5.5. Схема обволакивания крупных зёрен щебня в процессе перемешивания смеси

Кроме всего сказанного выше, в пользу лучшего смачивания мелких минеральных зерен битумом свидетельствует еще одно обстоятельство, возможно, самое главное. Тонкоизмельченные минеральные частицы обладают большой свободной поверхностной энергией, накопленной при тонком измельчении и помоле кусков горной по-

роды в мелкие зерна. Эта свободная поверхностная энергия, обусловленная переходом большого количества молекул из объемного в поверхностное состояние, способствует повышенной *адсорбции* (или сосредоточению, скоплению) на поверхности мелких частиц поверхностно-активных компонентов битума (в частности асфальтенов) и молекул ПАВ. Адсорбция на поверхности минерального материала активных компонентов битума способствует созданию из них адсорбционно-диффузионных (структурированных) слоев, которые являются, как было показано выше, основой создания асфальтобетонов (обеспечения их прочности, водоустойчивости и долговечности). В силу большой удельной поверхности и высокой адсорбционной активности частицы минерального порошка являются главными элементами структурообразования, которое зарождается на стадии производства асфальтобетонных смесей.

5.2. Уплотнение асфальтобетонных смесей

Целью процесса уплотнения асфальтобетонной смеси является максимально полное сближение зерен минерального остова между собой до достижения теоретически обоснованного предела плотности асфальтобетона. После перемешивания асфальтобетонная смесь представляет собой рыхлую массу. Уложенная в слой покрытия без предварительного уплотнения, она имеет среднюю плотность, близкую 1800 кг/м^3 . В уплотненном состоянии средняя плотность смеси достигает значения близкого к 2400 кг/м^3 .

Отсюда пустотность смеси до уплотнения ($V_{\text{ду}}$) равняется

$$V_{\text{ду}} = \left(1 - \frac{1800}{2400}\right) \cdot 100 = 25 \%. \quad (5.3)$$

Если допустить, что истинная плотность асфальтобетона равна 2480 кг/м^3 , то остаточная пористость асфальтобетона после уплотнения ($V_{\text{пу}}$) достигнет

$$V_{\text{пу}} = \left(1 - \frac{2400}{2480}\right) \cdot 100 = 3,2 \%. \quad (5.4)$$

Следовательно, уплотнение смеси обеспечило снижение пористости на $(V_{\text{ду}} - V_{\text{пу}}) = 21,8 \%$.

Обеспечение требуемой остаточной пористости асфальтобетона является чрезвычайно важной стадией формирования его структуры и свойств. Недоуплотнение приводит к образованию колеи и наплывов летом, интенсивному разрушению (шелушению и выкрашиванию) под действием воды, а также переменного замораживания – оттаивания весной и осенью, ускоренному старению асфальтобетона летом.

Для достижения запроектированной плотности асфальтобетона необходимо расположить зерна так, чтобы расстояние между ними было близким к толщине слоя структурированного битума (рис. 5.6). Это требует пространственного перемещения зерен, чего можно добиться в случае, если уплотняющие средства создают в слое нормальные сжимающие и касательные сдвигающие напряжения. Пространственному смещению зерен друг относительно друга препятствуют их зацепление и сопротивление пленок битума выдавливанию его из зон контакта.

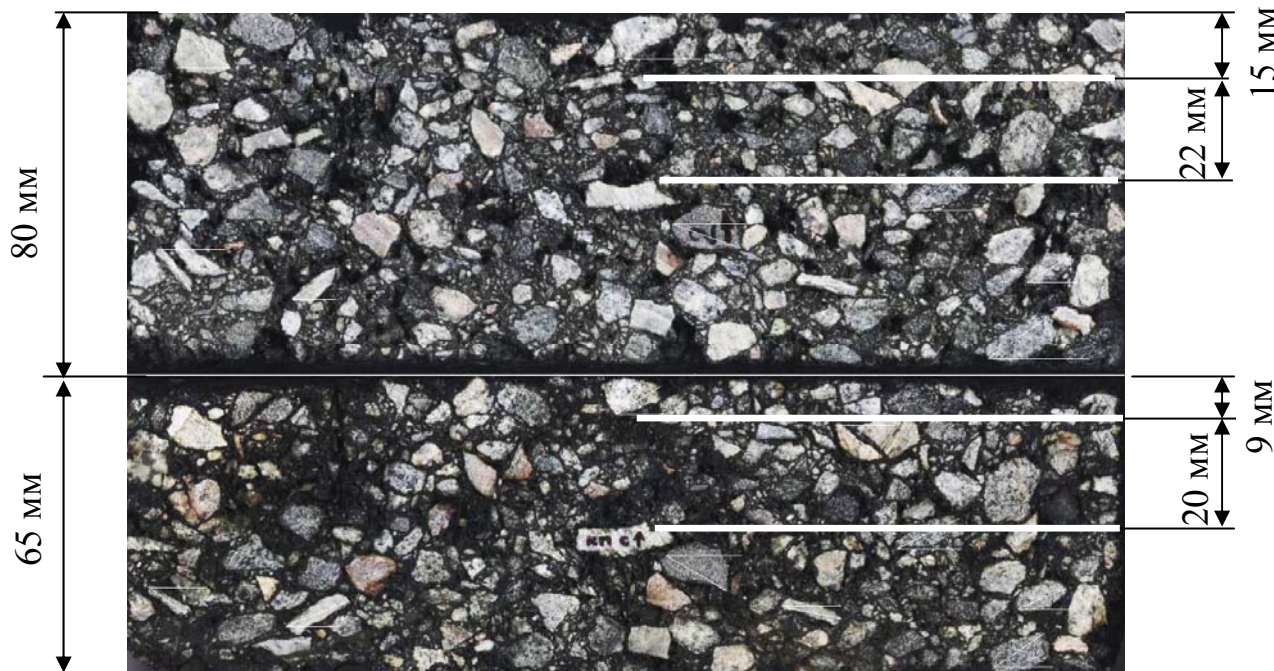


Рис. 5.6. Взаимное расположение зерен каменных материалов в асфальтобетонной смеси до уплотнения (вверху) и после уплотнения (внизу)

Можно предложить, что уплотнение будет эффективным, когда

$$\sigma_{\text{упл}} \geq \sigma_3 + \sigma_6, \quad (5.5)$$

где $\sigma_{\text{упл}}$ – уплотняющее напряжение;

σ_3 – сопротивление зерен перемещению;

σ_6 – сопротивление битума выдавливанию.

Сопротивление зерен перемещению может быть представлено формулой, аналогичной закону Кулона

$$\sigma_3 = p \cdot \operatorname{tg} \varphi + c, \quad (5.6)$$

где φ – угол трения в асфальтобетонной смеси;

c – зацепление зерен;

p – вертикальное давление.

Сопротивление слоев битума выдавливанию (когезию) в первом приближении можно определить по формуле Ньютона

$$\sigma_6 = \eta \cdot \dot{\epsilon}, \quad (5.7)$$

где η – вязкость битума;

$\dot{\epsilon}$ – скорость выдавливания битума из зазора между минеральными зёрнами.

Тогда условие уплотнения имеет вид

$$\sigma_{\text{упл}} > \eta \cdot \dot{\epsilon} + p \cdot \operatorname{tg} \varphi + c. \quad (5.8)$$

Естественно, это уравнение только иллюстрирует принцип уплотнения. Для его приближения к реальному уплотнению необходимо учесть, что из пространства между крупными составляющими выдавливается не битум, а асфальтовязущее вещество, которое даже при высоких температурах является аномальной системой, т.е. такой, вязкость которой зависит от скорости деформирования (в этом случае от скорости проходов катка) и от величины действующего напряжения. Вязкость изменяется после каждого очередного прохода катка, увеличиваясь по мере уплотнения во времени из-за остывания асфальтобетонного слоя. То же относится и к тангенсу угла трения и когезии структурированного битума.

Главным фактором уплотнения является уплотняющее давление. Такое давление создают *жесткобарабанные катки и пневмо-*

катки. Проблема выбора давления, т.е. массы катка (особенно металлического), состоит в том, что легкий каток создает уплотняющий эффект только на первой стадии уплотнения, когда величина создаваемого им давления больше прочности уплотняемой смеси. Когда давление становится меньше прочности асфальтобетонной смеси, необходимо заменить легкий каток более тяжелым (рис. 2.4). Ошибка в выборе катка – использование катка, создающего давление намного больше того, что достигнуто к концу укатки легким катком. Это приведет к образованию поперечных и продольных трещин и может вызвать волнообразование из-за сдвига слоя под катком, а также привести к дроблению зерен щебня, особенно в многощебенистых смесях.

Уменьшение степени развития таких дефектов достигается при использовании пневмокатков, давление в шинах которых может возрастать по мере упрочнения при укатке асфальтобетонного слоя и его охлаждении. Эффективность пневмоукатки во многом определяется за счет хорошего сцепления пневматика с асфальтобетонным слоем, что вызывает в нем, кроме нормальных сжимающих, еще и касательные напряжения, способствуя тем самым лучшей упаковке зерен из-за их смещения друг относительно друга.

В соответствии с уравнением (5.8) улучшению уплотняемости смеси будут способствовать следующие факторы: уменьшение скорости укатки, которое понижает сопротивление битума и асфальтовяжущего выдавливанию их из межзернового пространства, но существенно снижает темп уплотнения; снижение внутреннего трения за счет уменьшения содержания щебня в смеси или снижения отношения МП/Б, что может привести к снижению сдвигоустойчивости асфальтобетона; снижение внутреннего трения и сцепления за счет большого содержания битума в смеси, что также может сопровождаться понижением прочности асфальтобетона. Улучшению уплотнения способствует введение в асфальтобетонную смесь 10–12 % окатанного природного песка, увеличение его содержания выше этого предела приводит к снижению сдвигоустойчивости асфальтобетона. Таким образом, перечисленные факторы, способствуя улучшению уплотнения, могут привести к негативным последствиям для качества асфальтобетонного покрытия. Важно управлять уплотняемостью, чтобы их избежать.

В этом отношении эффективным средством повышения уплотняемости смесей и снижения температуры уплотнения являются ПАВ, которые снижают внутреннее трение в смеси, а также температуропонижающие добавки парафинового типа, которые снижают вязкость битума в межзерновом пространстве (рис. 5.7).

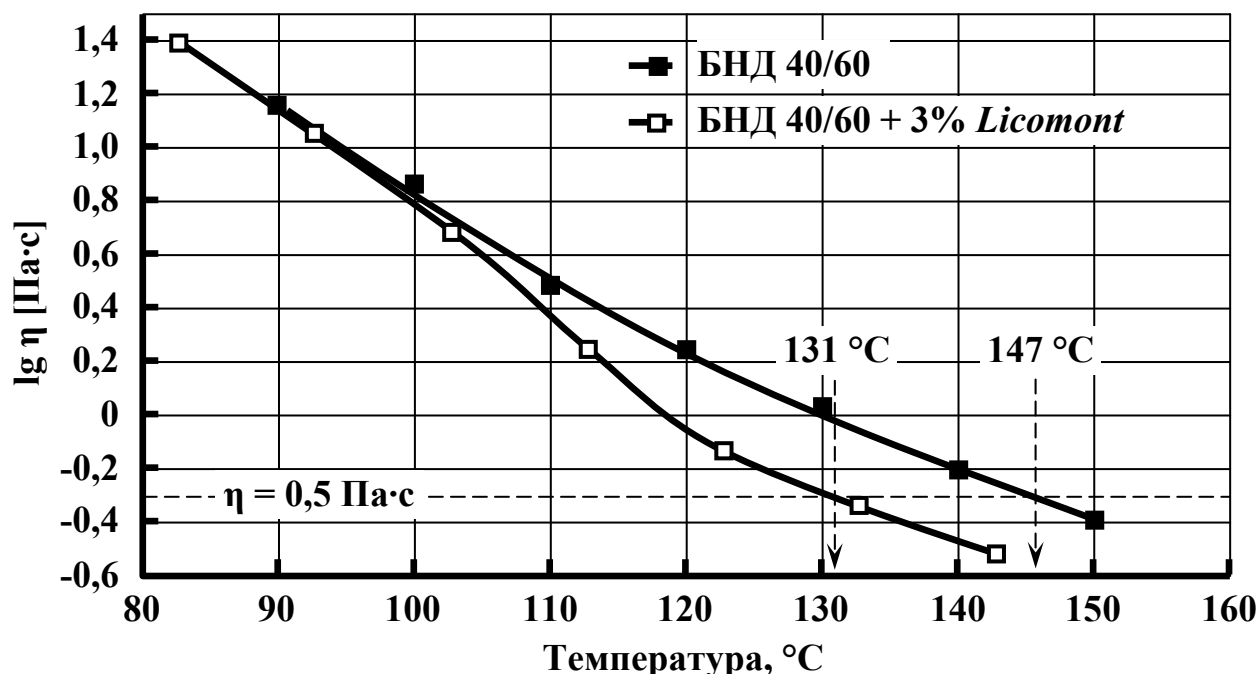


Рис. 5.7. Влияние энергосберегающей добавки на вязкость вяжущего (■ — чистый битум БНД 40/60; □ — битум с 3 % добавки)

Одним из факторов обеспечения качества асфальтобетона является также температура уплотнения. Считается, что процесс уплотнения может быть эффективным, если вязкость битума в конце этого процесса не превышает 10 Па·с. Чтобы установить температуру, отвечающую этой вязкости для битумов разных марок, нужно на рис. 5.1 из точки, соответствующей этой вязкости, провести линию, параллельную оси температур. Точка пересечения этой линии с кривыми температурной зависимости вязкости будет соответствовать температуре уплотнения смесей на конкретном битуме. Очевидно, что допустимые температуры уплотнения (T_y) для каждого битума ниже температур перемешивания и что температуры уплотнения снижаются по мере перехода от битумов с малой глубиной проникания иглы к битумам с большой глубиной проникания иглы, а также от вязких к жидким битумам. Определенные подобным способом температуры уплотнения нормируются стандартами и строительны-

ми нормами и правилами (табл. 5.2). Температурный режим уплотнения необходимо уточнять для каждого нового состава асфальтобетонной смеси с учетом принятых катков и температуры воздуха, которая влияет на охлаждаемость смесей в уплотняемом слое.

Таблица 5.2

**Рекомендуемые температуры уплотнения асфальтобетонных смесей
(извлечение из проекта ДСТУ Б В.2.7-119 «Смеси асфальтобетонные
дорожные и асфальтобетоны»)**

Вид смеси	Марка битума	Температура, °С, в начале уплотнения для асфальтобетонов	
		с содержанием щебня более 45 % по массе	с содержанием щебня менее 45 % по массе
Горячая	БНД 40/60	150–155	130–140
	БНД 60/90	145–150	115–130
	БНД 90/130	135–145	105–115
	БНД 130/200	120–135	90–105

Использование температурного фактора для регулирования уплотнения, как и других, рассмотренных выше процессов, носит ограниченный характер. Высокие (сверх рекомендуемых) начальные температуры нежелательны ввиду технологического старения битума в связи с возможностью образования микротрещин под катком, которые в последующем станут очагом массового разрушения покрытия из-за образования на нем неровностей.

Выбор режимов уплотнения и их оптимизация должны основываться на учете взаимосвязи между составом и свойствами смесей с одной стороны и температурой уплотнения, уровнем уплотняющего воздействия принятых средств уплотнения – с другой. Низкие температуры уплотнения неминуемо приведут к недоуплотнению слоя асфальтобетона и к дефектам, рассмотренным ранее.

Прогрессивные технологии уплотнения асфальтобетонных смесей в настоящее время тесно связаны с разработкой и применением новых уплотняющих средств: пневмокатков с регулируемым давлением в шинах, виброкатков, комбинированных вибропневмокатков. Такие катки, обеспечивая высокоэффективное и качественное уплотнение, позволяют повысить темп уплотнения, исключить дробимость зерен каменных материалов при уплотнении, создать ровную и шероховатую поверхность покрытия.

6. ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА АБЗ

Производству асфальтобетонных смесей на АБЗ предшествует изучение информации в отношении конструкции дорожной одежды и климатических условий работы асфальтобетона в слоях покрытия. Как правило, при новом строительстве эту информацию обрабатывают проектные организации. Они же закладывают в проект вид, группу, гранулометрический тип и марку асфальтобетонной смеси и асфальтобетона. При этом разработчики проекта пользуются рекомендациями действующего ДСТУ, в котором приведено районирование территории Украины по климатическим условиям работы асфальтобетонного покрытия и рациональные, пригодные для этих условий и категории дороги, асфальтобетоны (рис. 1.10).

Государственные, областные, городские или заводские дорожные лаборатории определяют материалы, которые необходимо иметь для получения предусмотренного проектом дороги асфальтобетона. При этом анализируются свойства материалов, их стоимость, стоимость доставки из места их производства на завод. На основе такого анализа принимается наиболее выгодное технико-экономическое решение.

С учетом требуемых показателей качества исходных материалов на основании известных исходных гранулометрических составов минеральных составляющих (щебня, искусственного и природного песка, минерального порошка) рассчитывают состав минеральной части асфальтобетона, приготавливают несколько пробных асфальтобетонных смесей, включающих разное содержание битумного вяжущего нужного вида и марки, формуруют асфальтобетонные образцы, определяют значение требуемых стандартом показателей свойств, анализируют их на предмет установления оптимального содержания вяжущего и соответствия техническим требованиям стандартов. Студенты выполняют эти работы в процессе обучения в учебных лабораториях, руководствуясь лабораторным практикумом «Испытания дорожно-строительных материалов».

В соответствии с предполагаемыми объемами работ по производству асфальтобетонных смесей АБЗ запасается всеми необходимыми материалами на расчетный срок работы АБЗ. Этот срок зависит от вида транспорта, используемого для доставки материа-

лов на АБЗ. В случае их поставок автомобильным транспортом этот срок короче (5–12 суток) и, естественно, меньше необходимый запас материалов. В случае доставки материалов железнодорожным транспортом расчетный срок длиннее (10–15 суток). Каменные материалы хранятся на складах, технологический вид и конструкция которых во многом зависит от вида транспортных средств. В этом отношении и в отношении качества производимых заводом смесей важно, чтобы источники поставок были стабильными.

Как правило, сыпучие каменные материалы разгружают в приемный бункер, из которого их специальными питателями и системой транспортеров распределяют по штабелям в соответствии с их видом и крупностью (рис. 6.1). Под штабелями устраивают подземную галерею с ленточным транспортером, на который специальными питателями подают нужный в определенный период времени, в зависимости от состава минеральной части асфальтобетонной смеси, материал. Из подштабельной галереи материал определенной фракции подается в соответствующий бункер агрегата питания, осуществляющего предварительное дозирование. Эти бункеры снабжены ленточными дозаторами-питателями, ссыпаящими каменные материалы на горизонтальный ленточный транспортер. С него предварительно отдозированные материалы перегружают на «холодный» наклонный конвейер, который в свою очередь выгружает каменные материалы в сушильный барабан. Сушильный барабан независимо от типа или вида смесительной установки (непрерывного или периодического типа действия) является ее обязательным агрегатом. В сушильном агрегате каменные материалы нагреваются до определенной, предусмотренной технологическим регламентом и требованиями стандарта на асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны, температуры (табл. 5.1). Нагретые каменные материалы на последующих этапах производства смесей (их транспортировке и уплотнении) являются аккумуляторами тепла, обеспечивают необходимую температуру битума в смеси и, следовательно, необходимую его вязкость в тонких пленках, что является важнейшим фактором перемешивания, погрузки, разгрузки в асфальтоукладчик и уплотнения смесей.

Нагретые во вращающемся сушильном барабане за счет факельного пламени, образующегося в форсунке при сжигании газа или жидкого топлива, щебень, песок и высеки по вертикальному

горячему элеватору поступают на грохоты-сита, на которых их рассеивают на определенные фракции и распределяют по весовым бункерам-дозаторам.

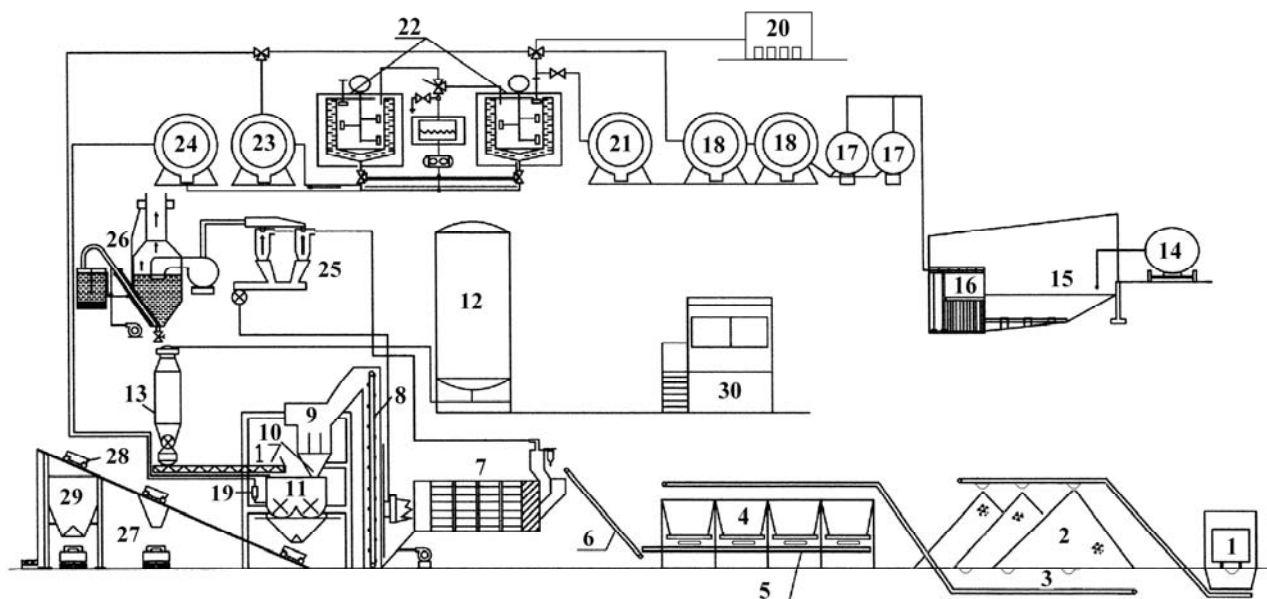


Рис. 6.1. Технологическая схема производства асфальтобетонных смесей на АБЗ: *Блок приема и подачи каменных материалов:* 1 – транспортное средство; 2 – склад каменных материалов; 3 – подземная галерея; 4 – бункер агрегата питания; 5 – ленточный конвейер; 6 – наклонный конвейер; 7 – барабан сушильного агрегата; 8 – горячий элеватор; 9 – грохоты; 10 – весовой дозатор; 11 – смеситель. *Блок подачи минерального порошка:* 12 – силосный склад минерального порошка; 13 – агрегат подачи минерального порошка. *Блок подготовки и подачи вяжущего:* 14 – цистерна с битумом; 15 – битумохранилище; 16 – приямок; 17 – нагревательные котлы; 18 – емкость готового вяжущего; 19 – дозатор вяжущего. *Блок приготовления жидких битумов, битумов с добавками и битумов, модифицированных полимерами:* 20 – склад с добавками и полимерами; 21 – емкость с растворителем; 22 – смесительная установка; 23 – емкость готового жидкого вяжущего; 24 – емкость битумного вяжущего. *Система пылеулавливания:* 25 – блок циклонов; 26 – мокрый пылеулавливатель с отстойником и узлом возврата пыли в смеситель. *Система разгрузки:* 27 – автосамосвал; 28 – скиповый подъемник; 29 – бункер готовой смеси; 30 – кабина оператора

Минеральный порошок поступает на АБЗ со специальных заводов или из цеха минерального порошка, который может быть на АБЗ. Минеральный порошок доставляют на завод цементовозами или в специальных вагонах. Из этих транспортных средств его

выгружают пневмонасосом в цилиндрические силосные «банки» общей емкостью, зависящей от производительности смесителя (чаще всего от 50 т/час до 400 т/час асфальтобетонной смеси). Из силосной банки холодный минеральный порошок пневматически или шнеком подается в раздаточный агрегат, откуда шнеком дозируется в лопастную мешалку смесителя. В мешалке все минеральные материалы перемешиваются в течение короткого промежутка времени (около 15 с).

Битум чистый, с добавками или модифицированный поступает на АБЗ с нефтеперегонного завода (НПЗ) или специальных баз, как правило, в цистернах емкостью около 60 т железнодорожным или автомобильным транспортом. Из цистерн битум переливается в закрытое битумохранилище, из которого после местного разогрева в приемке до 60–90 °С (в зависимости от марки) его перекачивают в битумоплавильные котлы, снабженные жаровыми трубами или тенами.

В процессе загрузки цистерн на НПЗ, транспортирования, выгрузки и хранения в битумохранилище в битум может попадать вода. Наличие воды в битуме при нагреве его до высокой температуры может привести к его вспениванию и выбросу из битумоплавильных котлов. Во избежание этого битум предварительно обезвоживают при температуре около 105 °С. После обезвоживания, о чем свидетельствует отсутствие на поверхности битума пузырьков воздуха, битум разогревают до предусмотренной в зависимости от его марки температуры (табл. 5.1). Приведенные в таблице температуры определены по температурным зависимостям вязкости. Минимальная температура нагрева отвечает вязкости, равной 0,5 с.

После дозирования битума (весовым или объемным дозатором) в мешалку смесь перемешивают в течение 40–60 с. Время перемешивания уточняют пробными замесами. Перемешивание считается качественным, если асфальтобетонная смесь однородна, в ней нет сгустков битума или асфальтовяжущего, на минеральных зернах нет непокрытых пленкой битума участков.

После окончания перемешивания асфальтобетонная смесь выгружается непосредственно в транспортные средства или может перегружаться скиповым ковшом в накопительные бункера. В них асфальтобетонная смесь может храниться в течение 3 часов. Бункера-накопители используют для обеспечения бесперебойности работы смесителей и предупреждения скопления транспортных средств на загрузке их смесью.

Обычная практика предусматривает выгрузку смеси непосредственно в специальные асфальтовозы – автомобили, кузов которых имеет полые борта, куда подаются выхлопные газы автомобиля, что позволяет предупредить потерю температуры смеси при транспортировке. Сверху смесь укрывается специальным тентом.

Асфальтобетонные смеси из-за разномерности входящих в них минеральных материалов могут терять однородность при выгрузке в транспортные средства. Это явление называется *сегрегацией* (отделение). Сегрегация в более широком смысле – это потеря однородности распределения составляющих асфальтобетонной смеси в занимаемом ею объеме на всех ее технологических стадиях: перемешивании, выгрузке из смесителя, транспортировке, выгрузке в приемный бункер асфальтоукладчика, укладке смеси асфальтоукладчиком. Способность асфальтобетонной смеси к сегрегации определяют с помощью метода и установки, предусмотренных стандартом ЕС (рис. 6.2–6.3). Она заключается в том, что крупные зерна скатываются сверху в нижнюю часть кузова. Чтобы уменьшить сегрегацию, транспортные средства должны загружаться по схеме, приведенной на рис. 6.4.



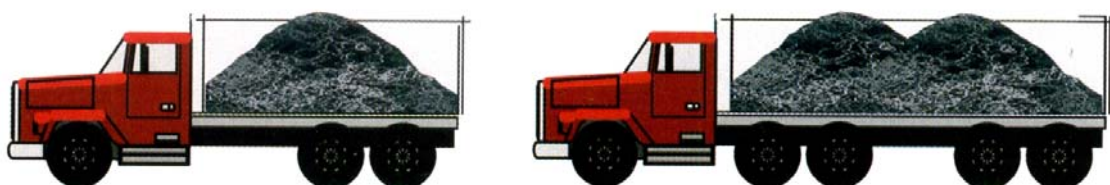
Рис. 6.2. Экспериментальный образец прибора определения показателя сегрегации асфальтобетонных смесей:

- 1 – металлический приемный бункер;
- 2 – термоизоляционный кожух приемного бункера;
- 3 – терморегулятор с монитором и кнопками управления обогрева приемного бункера;
- 4 – кабель питания нагревательного элемента приемного бункера;
- 5 – металлический заслон горловины бункера;
- 6 – платформа для ссыпания смеси;
- 7 – люки: $\varnothing$ 140 мм (а) и $\varnothing$ 220 мм (б);
- 8 – опорные стойки;
- 9 – поддон для отъема смеси;
- 10 – рычаги открывания люков



Рис. 6.3. Определение сегрегации минеральных составляющих асфальтобетонной смеси типа Б

НЕПРАВИЛЬНО



ПРАВИЛЬНО

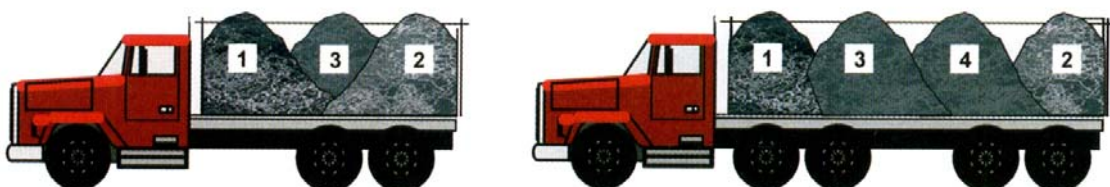


Рис. 6.4. Выгрузка асфальтобетонной смеси из асфальтосмесителя

Описанная технологическая схема принципиально применима для разных типов и видов смесей на битумных вяжущих. При производстве холодных асфальтобетонных смесей предусматриваются склады для их длительного хранения.

В случае производства асфальтобетонных смесей на эмульсиях на АБЗ может быть создан цех по производству эмульсий. Эмульсии могут также доставляться со специальных эмульсионных баз. При этом дальность транспортирования не должна превышать 50–100 км. При производстве асфальтополимерных смесей на АБЗ может быть предусмотрен цех по производству битума, модифицированного полимером. Обычной технологичной практикой является применение

битумных вяжущих, улучшенных с целью повышения водоустойчивости асфальтобетона добавками поверхностно-активных веществ. Эти добавки, кроме того, улучшают смачивание поверхности каменных материалов битумным вяжущим и позволяют снижать температуру перемешивания асфальтобетонных смесей, что снижает расход топлива и уменьшает количество выбросов CO_2 в окружающую среду.

В последние годы достаточно широкое распространение получили энергосберегающие добавки, которые, будучи введенными в битум или в смесь, также снижают технологические температуры ее приготовления и уплотнения (рис. 5.7). Во всех перечисленных случаях оборудование АБЗ должно быть дополнено специальными технологическими узлами.

В экологическом аспекте технология приготовления асфальтобетонных смесей, особенно стадия нагрева каменных материалов, сопровождается пылевыведением. Для предупреждения выброса мелких минеральных частиц в окружающую среду и улучшения охраны труда на АБЗ смесительные установки снабжаются многоступенчатой системой пылеочистки. Уловленная такими системами пыль поступает в специальные отстойники и затем утилизируется.

7. РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПРОЧНОСТИ И УСТАЛОСТЬ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ

7.1. Реологические свойства асфальтобетонов

Основой реологического поведения и реологических свойств асфальтобетонов, зависящих от скорости деформирования или нагружения, является наличие в их составе типичного реологического тела – битума. При этом определяющая роль битума в формировании реологического поведения асфальтобетона не зависит от типа, вида, марки и других признаков, поскольку в любых из них есть битумная среда, пленки которой покрывают все без исключения минеральные частицы, входящие в асфальтобетон. В своей книге «Асфальтовый бетон» профессор И.А. Рыбьев (разработчик количественной теории асфальтовязущего вещества как основы формирования свойств асфальтобетона) описывает эксперимент, суть которого заключалась в том, что зерна каменной соли были смешаны с битумом. Заформованный из этой смеси образец был охлажден и помещен в воду. После растворения в воде осталась ажурная битумная сетка.

В связи с реологической сущностью битума все механические свойства асфальтобетона зависят от времени действия нагрузки от скорости или частоты нагружения или деформирования. В разделе 8 (часть I) даны определения главных реологических свойств битума: вязкости, ползучести, релаксации, когезии, модулей упругости и др. Для асфальтобетонов принципиально важными реологическими свойствами являются модули упругости, прочность и их частотные или скоростные зависимости, ползучесть и релаксация.

Под действием нагрузок и деформирования асфальтобетон стадийно меняет свое деформационное состояние (рис. 7.1). При малых нагрузках или деформациях он проявляет упругость, что выражается прямопропорциональной зависимостью между напряжениями и деформациями; по мере увеличения механического воздействия линейность между напряжениями и деформациями нарушается и деформации нарастают гораздо быстрее, чем напряжения, а затем происходит разрушение, выражающееся в потере сплошности асфальтобетона. Интенсивность этих процессов и величины,

характеризующие эти показатели, зависят от времени, скорости или частоты воздействия, а также от температуры, что отражено в понятии битума как термопластичного тела. В основе температурно-временной зависимостей механических характеристик асфальтобетона лежат релаксационные процессы.

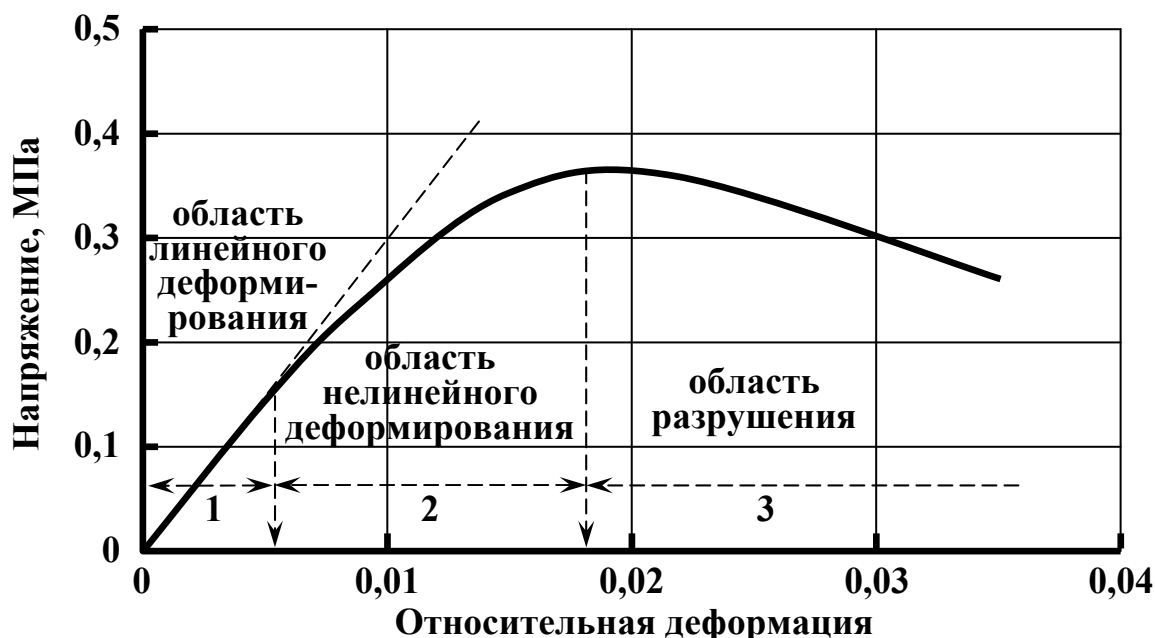


Рис. 7.1. Типичная зависимость между разрушающими напряжениями и деформациями асфальтобетона

Важнейшей реологической характеристикой асфальтобетона является модуль упругости, определяемый на ранней линейной стадии деформирования асфальтобетона (участок 1, рис. 7.1). Для оценки деформационной способности асфальтобетона долгое время использовали модули деформации, значения которых зависели от уровня напряженного состояния и относились к области нелинейного деформирования (участок 2, рис. 7.1). Это вносило погрешности в расчеты дорожных одежд.

Модуль упругости асфальтобетона как фундаментальная характеристика его деформирования важна для установления влияния на упругость асфальтобетона его состава, структуры, качества составляющих, добавок, технологических параметров, а также для расчета и конструирования нежестких (с использованием материалов на битумных вяжущих) дорожных одежд. Главный принцип их конструирования сводится к тому, что под действием транспортных нагрузок дорожная одежда должна деформироваться упруго, т.е.

чтобы возникающие при этом деформации восстанавливались после прекращения такого воздействия. Асфальтобетонные слои дорожных одежд вносят решающий вклад в обеспечение упругого поведения дорожной одежды.

Модуль упругости (E) может быть установлен по линейному участку диаграммы «напряжение – деформация» (рис. 7.1) при фиксированной скорости деформации по закону Гука

$$\sigma = E \cdot \varepsilon, \quad (7.1)$$

где σ – напряжение МПа;

ε – относительная деформация.

Кажущаяся на первый взгляд простота определения является обманчивой, поскольку напряжения и деформации, ограничивающие область линейности, являются чрезвычайно малыми (рис. 7.1). Их определение при испытаниях на прессах, как это делается для металлов, для асфальтобетонов приводит к недопустимо большим погрешностям. Кроме того необходимо, чтобы испытания выполнялись при нескольких скоростях деформаций или частотах деформирования.

Для устранения этих трудностей можно использовать испытание на ползучесть, в процессе которого под серией возрастающих постоянных напряжений во времени развиваются упругие и остаточные деформации. Чтобы получить из этих зависимостей диаграмму «напряжение-деформация», устанавливают деформации, развивающиеся за фиксированный отрезок времени под действием разных напряжений, а затем строят зависимости $\sigma = f(\varepsilon)$ (рис. 7.2). По линейному (прямопропорциональному) начальному участку кривых определяют значения модулей упругости. В этом случае возможно установить предельные напряжения и деформации $\sigma_{кр}$ линейного деформирования при заданных временах деформирования $\varepsilon_{кр}$. Знание этих характеристик имеет большое значение для предсказания поведения асфальтобетона в покрытии и прогнозирования накопления на нем пластических деформаций. К недостаткам этого метода определения модуля упругости можно отнести длительность испытания, сложность обеспечения мгновенного и в то же время плавного и неосциллирующего напряжения, практическую невозможность измерений деформаций при временах действия нагрузок менее 1 с. Значение же модулей упругости при малых временах

действия нагрузок крайне важны, поскольку в существующих методах расчета нежестких дорожных одежд в Украине и России в качестве расчетного принимается время, равное 0,1 с, а во Франции – 0,01 с.

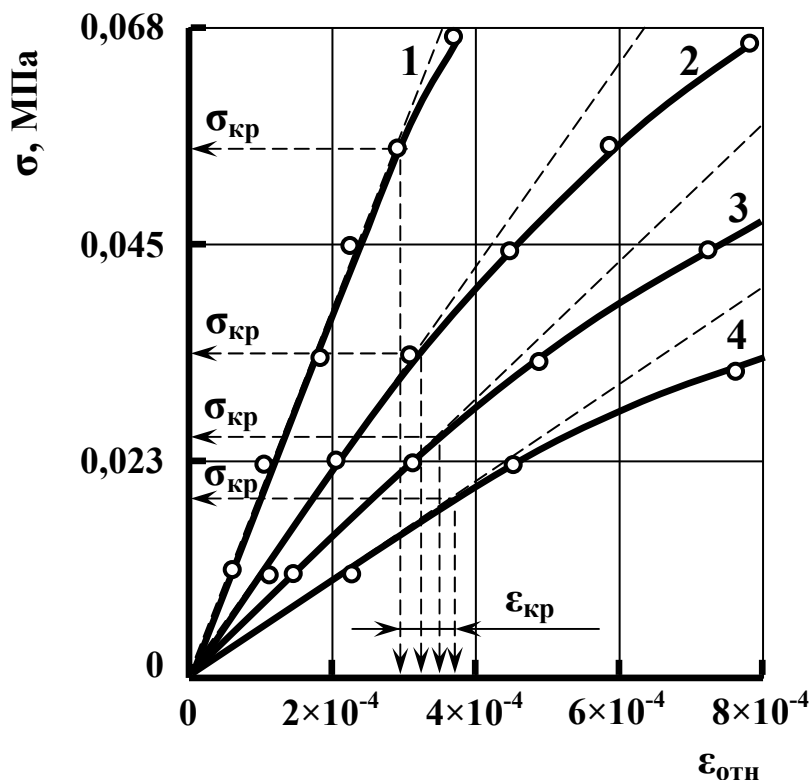


Рис. 7.2. Зависимость между напряжениями и относительной деформацией при времени действия нагрузки: 1 – 5 с; 2 – 60 с; 3 – 600 с; 4 – 1200 с

Недостатки обоих описанных методов определения модулей упругости в значительной мере устраняются при использовании динамического метода испытания (рис. 7.3). Он заключается в том, что к консольно закрепленному образцу в верхней его точке специальными вибраторами прикладываются колебательные усилия или деформации, изменяющиеся, как правило, по синусоидальному закону. Напряжение и соответствующие им деформации определяют высокоточными тензометрическими и индуктивными датчиками. Область изменения частот находится в пределах от 0,001 Гц до 100 Гц. Это означает, что полный период колебания продолжается от 10^3 с до 0,01 с.

В случае такого испытания исключаются смятия на опорах, люфты испытательного оборудования, резко расширяется диапазон определяемых деформаций, поскольку относительный прогиб делит-

ся на большую длину образца (по методу ЕС она должна быть равна 25 см).



Синусоидальные
колебания образца

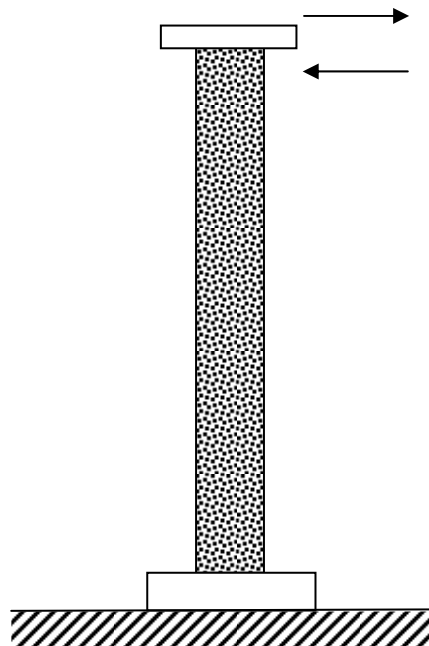


Рис. 7.3. Определение комплексного модуля упругости методом синусоидального изгиба по Европейскому стандарту

Исходными данными для расчета модуля упругости служат напряжения, рассчитываемые по схеме консольного изгиба и относительные деформации. По этим данным строят диаграммы (рис. 7.4), которые подобны (рис. 7.2) полученным при ползучести, определяют область линейности по напряжениям и деформациям, а затем по данным, отвечающим участку линейности, определяют комплексный модуль упругости (E^*) согласно закону Гука. В результате динамических испытаний можно определить сдвиг фаз между напряжением и деформацией, по значению угла которого можно оценить степень накапливаемой при колебаниях и рассеиваемой энергии (часть I, рис. 11.3). Последнее позволяет определить также модули накопления (E') (упругость) и потерь (E''), характеризующие соответственно упругую и вязкую составляющие комплексного модуля (E^*).

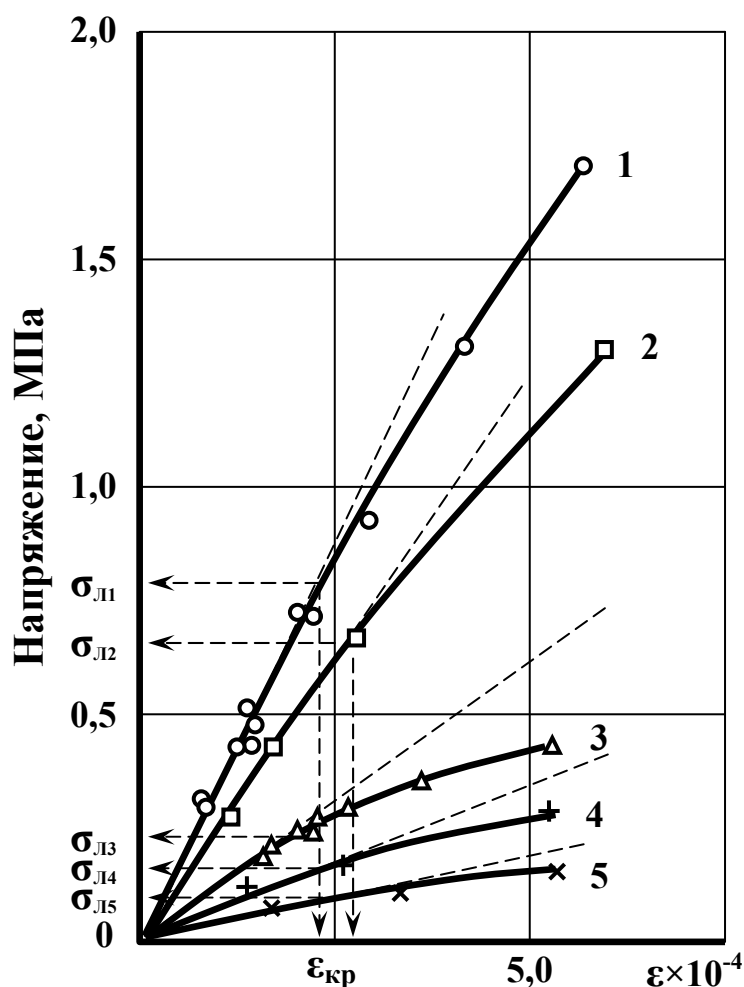


Рис. 7.4. Зависимость между напряжениями (σ) и деформациями (ϵ) при температуре 20 °С для асфальтобетона типа А на битуме БНД 60/90 при частотах деформирования в Гц: 1 – 20; 2 – 5; 3 – 0,5; 4 – 0,05; 5 – 0,01

Дальнейшее изложение будет касаться зависимостей комплексного модуля упругости асфальтобетона, который рассчитан как отношение максимального напряжения к максимальной вызванной им деформации. На основании динамических испытаний также определяют температурные и частотные зависимости модулей упругости в принятом диапазоне испытаний (рис. 7.5). В границах практически используемых частот (от 0,01 Гц до 40 Гц) получаемые зависимости (E^*) в логарифмических координатах близки к прямолинейным.

Для всех зависимостей наблюдается рост комплексных модулей упругости с ростом частоты. Наклон зависимостей изменяется по мере изменения температуры испытания. В области высоких температур 35–50 °С они пологи, затем угол их наклона к оси частот увеличивается. При очень низких температурах зависимости снова выполаживаются,

особенно в области высоких частот. По наклону зависимости при каждой температуре можно определить безразмерный коэффициент, называемый коэффициентом пластичности (m), впервые (в 1947 году) предложенный Н.Н. Ивановым и М.Я. Телегиным для оценки влияния скорости деформирования асфальтобетонов на его прочность. В отношении модулей упругости коэффициент пластичности определяют по формуле:

$$m = \frac{\Delta \lg E^*}{\Delta \lg f} = \frac{\lg E_1^* - \lg E_2^*}{\lg f_1 - \lg f_2}, \quad (7.2)$$

где E_1^* и E_2^* модули упругости соответственно при частотах f_1 и f_2 ($f_1 > f_2$).

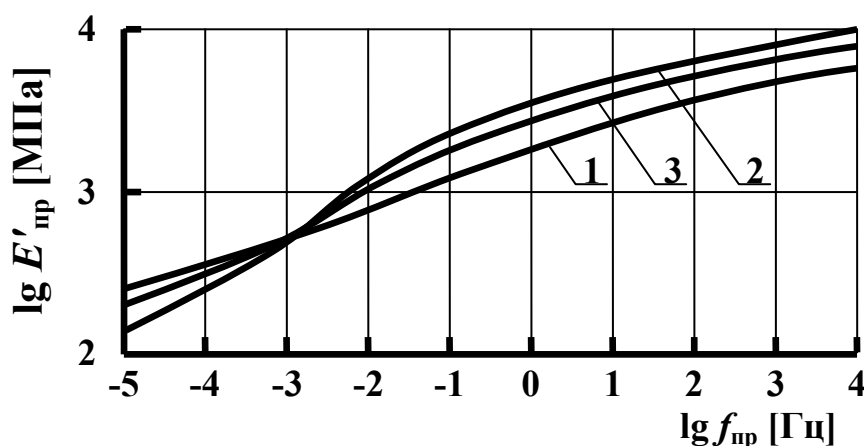


Рис. 7.5. Частотная зависимость модуля упругости (E') асфальтобетона на битуме: соответственно 1, 2 и 3 структурно-реологического типа при температуре 10 °С

Температурные зависимости модуля упругости стоят при заданной частоте. Температурная зависимость коэффициента пластичности имеет выпуклый характер (рис. 7.6). Низкие значения m при высоких температурах и низких частотах означают, что асфальтобетон находится в вязкопластичном состоянии, когда релаксация напряжений происходит быстрее, чем их рост. В области низких температур и высоких частот значения m также малы, поскольку асфальтобетон переходит в застеклованное (практически хрупкое) состояние, когда процессы релаксации «заморожены» и практически не успевают произойти. В области переходных температур значения

m достигает максимума. Здесь асфальтобетон в наибольшей степени проявляет свои вязкоупругие свойства, поскольку скорости нарастания напряжений с частотой близки к скорости релаксационных процессов, одновременно в нем протекающих.

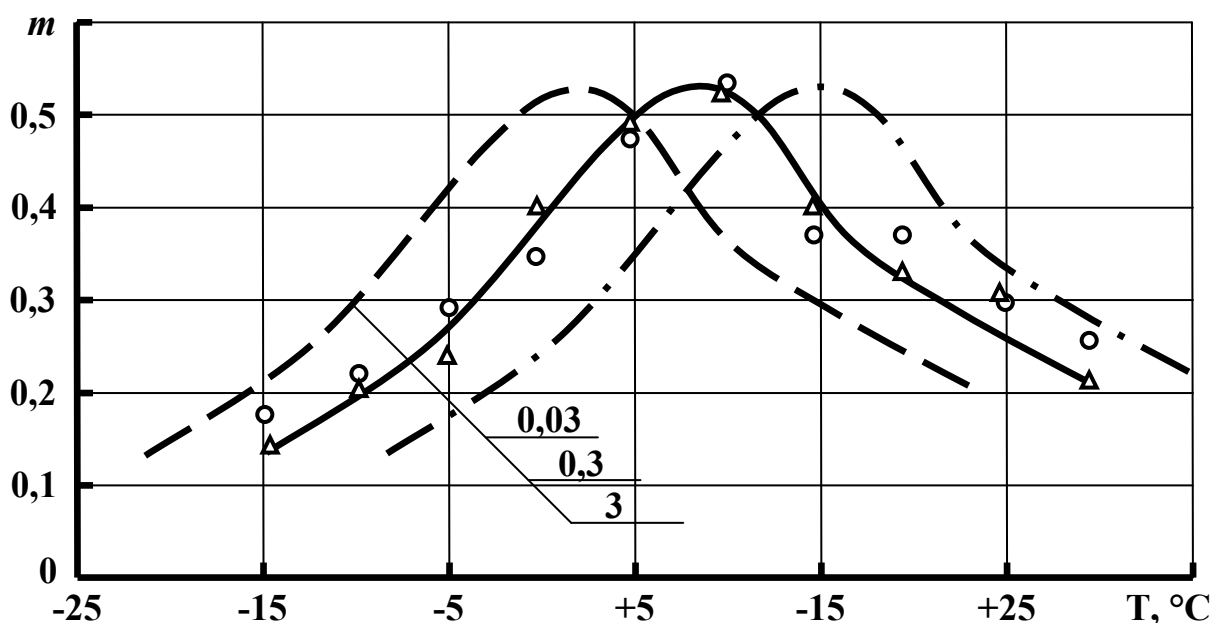


Рис. 7.6. Температурные зависимости коэффициентов пластичности по модулям накопления при изгибе E' (Δ) и кручении G' ($\circ$) при частоте 0,3 Гц (обработка данных Ж. Сайега, Франция) и гипотетическое смещение зависимости при уменьшении частоты до 0,03 Гц (---) и увеличении частоты до 3 Гц (- · -)

Асфальтобетон как типичный реологический термопластичный материал подчиняется *принципу температурно-временной аналогии* (ТВА)* – эквивалентности действия температуры и времени. В соответствии с ним одно и то же значение механического показателя (в данном случае модуля упругости) может быть получено при различных сочетаниях частоты деформирования и температуры. Повышение температуры эквивалентно понижению частоты (увеличению времени деформирования). В соответствии с этим температурные зависимости модулей упругости при фиксированной частоте имеют вид, близкий к S-образному (рис. 7.7). На них также выделяется три области: I – *выполаскивания* модуля при высоких температурах

* В иностранной литературе – принцип температурно-временной суперпозиции.

(область – вязкопластичности), II – близкого к прямолинейному нарастанию модуля с понижением температуры, свидетельствующему о вязкоупругом деформировании, III – снижения приращения модуля при понижении температуры вплоть до выхода на его постоянное значение, что отвечает переходу асфальтобетона в упруго-хрупкое (застеклованное) состояние.

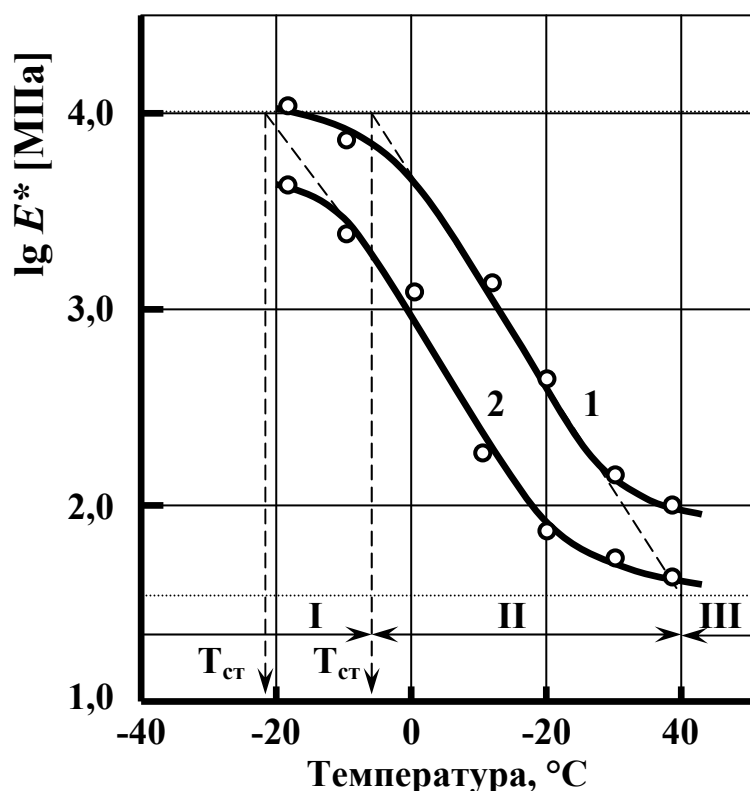


Рис. 7.7. Изменение комплексного модуля упругости в зависимости от температуры испытания при времени действия нагрузки: 1 – 5 с; 2 – 600 с

В соответствии с принципом (ТВА) при изменении частоты температурные зависимости модулей смещаются параллельно друг другу. В качестве температуры перехода в твердое застеклованное состояние принимают температуру, при которой значение модуля не меньше 10^4 МПа. Такое значение модуля характерно для твердых тел: бетона, цинка. Для ее определения проводят прямую, отвечающую области II вязкоупругого поведения асфальтобетона, до пересечения с прямой, отвечающей значению 10^4 МПа, а затем опускают с точки пересечения перпендикуляр на ось температуры (рис. 7.7). Эту температуру называют условной, поскольку граничное значение

модуля назначено на основе умозаключений и сравнения свойств асфальтобетона при низких температурах со свойствами известных твердых и даже хрупких тел. Если значения модуля принять меньше 10^4 МПа, то температуры механического стеклования при всех частотах сместятся в область более высоких температур и наоборот.

Температуры механического стеклования асфальтобетона при повышении частоты деформирования на один порядок (в десять раз) смещаются на 6–8 °С в сторону их положительных значений и, наоборот, с понижением частоты деформирования на ту же величину – в сторону отрицательных температур. Таким образом, нельзя утверждать, что модуль упругости, температура стеклования или прочность одного асфальтобетона выше или ниже, чем другого. Приводя значения этих показателей, следует всегда указывать температурные и частотные (скоростные) параметры испытания. Сравнение же реологических свойств возможно только при одинаковых значениях этих параметров. Обязательным при этом является соответствие модуля области линейного вязкоупругого деформирования при любых частотах и температурах.

Сравнивать асфальтобетоны разных составов на различных битумных вяжущих и полученные по разным технологиям целесообразно по таким реологическим параметрам: критические деформации и напряжения, ограничивающие область линейного поведения, модули упругости, температура стеклования, температурная чувствительность модулей, коэффициенты пластичности.

Подтверждением предпосылки об определяющей роли битума в формировании реологического поведения асфальтобетона являются данные о реологических свойствах асфальтобетонов на битумах близкой пенетрации ($\sim 80 \times 0,1$ мм) разных структурных типов, реологические свойства которых детально рассмотрены в первой части учебника (раздел 8). Модули упругости асфальтобетонов на смолистом остаточном битуме типа «золь» при температуре минус 20 °С и частоте 0,5 Гц существенно выше, чем асфальтобетонов на битуме типа «золь-гель» (табл. 7.1). Первые применяют в странах ЕС, вторые – в Украине и России. Причиной более высокой (минус 18 °С) температуры их механического стеклования (против минус 22 °С асфальтобетонов на битуме типа «золь-гель») является большое количество входящих в битум типа «золь» смол, имеющих высокую температуру хрупкости. В то же время и по той же причине при

температуре 20 °С асфальтобетоны на этих битумах обладают более широкой по критическим относительным деформациям областью линейного поведения $4,8 \times 10^{-4}$ против 4×10^{-4} . Значения этих показателей различаются еще больше при сравнении битумов типа «золь» и «гель». В полном соответствии с поведением чистых битумов коэффициент пластичности при 20 °С асфальтобетона на битуме типа «золь» несколько выше, т.е. их модуль упругости изменяется больше с частотой, чем у асфальтобетонов на битумах двух других типов («золь-гель» и «гель»). На данный момент вопрос о переходе на использование в дорожном строительстве Украины, России, Беларуси остаточных битумов является открытым. Низкая трещиностойкость (часть I, табл. 7.1) и низкое сцепление с минеральной подложкой в водной среде ограничивают возможность их применения в наших климатических условиях.

Таблица 7.1

**Деформационные свойства асфальтобетонов на битумах
с близкой пенетрацией, но разных структурных типов
при частоте определения 0,5 Гц**

Наименование параметра	Температура, °С	Структурный тип битума		
		«гель»	«золь-гель»	«золь»
Модуль упругости $E^* \times 10^{-4}$, МПа	–20	6,3	10,5	14
	0	3,0	4,4	6,0
	20	0,9	1,3	1,4
	40	0,3	0,3	0,25
Критические деформации линейности асфальтобетонов / битумов $\varepsilon_d \cdot 10^4$	20	1,2/0,4	4,0/0,55	4,8/1,0
Коэффициент пластичности, m	20	0,16	0,18	0,20
Температура механического стеклования, °С ¹		–35	–22	–18

Примечание. ¹Температура механического стеклования определена при частоте 0,01 Гц.

Что касается битумов разных марок, то в полном соответствии с тенденциями изменения их пенетрации от $57 \times 0,1$ мм до $170 \times 0,1$ мм, температуры размягчения от 53,5 °С до 42 °С и хрупкости от минус 16 °С до минус 19 °С и увеличением содержания в них масел, уменьшается модуль упругости асфальтобетонов на их основе: при минус 20 °С частоте 0,5 Гц (от $7,8 \times 10^3$ МПа до $6,3 \times 10^3$ МПа), а при

температуре 40 °С – от $3,2 \times 10^2$ МПа до $0,8 \times 10^2$ МПа. Уменьшается также критическая деформация линейности от $3,5 \times 10^{-4}$ до $1,8 \times 10^{-4}$, понижается температура стеклования от минус 20 °С до минус 34 °С. Подобные изменения должны быть учтены при расчете дорожных одежд применительно к дорожно-климатическому району и транспортным условиям эксплуатации. Очевидно, что асфальтобетоны на маловязких битумах не могут быть рекомендованы для покрытий под тяжелое движение в южных районах. С точки зрения обеспечения устойчивости под нагрузкой в покрытии необходимо применять асфальтобетоны с большими значениями предельных деформаций и напряжений.

Прямым свидетельством непосредственного влияния битумного вяжущего на реологическое поведение асфальтобетона является практически линейная зависимость между амплитудой деформации, за пределами которой битум ведет себя как нелинейная, не ньютоновская система (часть 1, раздел 8), и предельной деформацией асфальтобетона при синусоидальном нагружении (рис. 7.8). Эта зависимость распространяется на битумы разных структурных типов (табл. 7.1) и разных марок от БНД 40/60 до БНД 130/200, полученных окислением. Она свидетельствует о том, что прирост критической деформации линейности асфальтобетона почти вдвое меньше, чем битума. Это связано с переходом битума в асфальтобетоне в структурированное состояние, что снижает однородность образованного совместно с минеральным порошком асфальтовяжущего вещества, являющегося при температуре 20 °С по существу твердообразной системой.

Сравнение модулей упругости асфальтобетонов при изгибе и модулей упругости битумов при сопоставимых температурах и частотах деформирования при сдвиге битумов четырех марок приводит к получению прямопропорциональной в логарифмическом масштабе их взаимосвязи. При этом наклон зависимостей определяется соотношением модулей упругости битумов и асфальтобетонов. Он не зависит от типа гранулометрии, которая влияет на абсолютное значение модулей упругости на рис. 7.9. Максимальное значение модуля упругости в приведенном примере отвечает асфальтобетону типа В, затем следует песчаный асфальтобетон типа Г и асфальтобетоны типа Б и А. Значения модулей упругости асфальтобетонов разных типов при температуре 20 °С и частоте деформирования 0,5 Гц соответствуют: тип А – $5,7 \times 10^2$ МПа; тип Б – 7×10^2 МПа; тип В – $1,0 \times 10^3$ МПа; тип Г – $8,7 \times 10^2$ МПа.

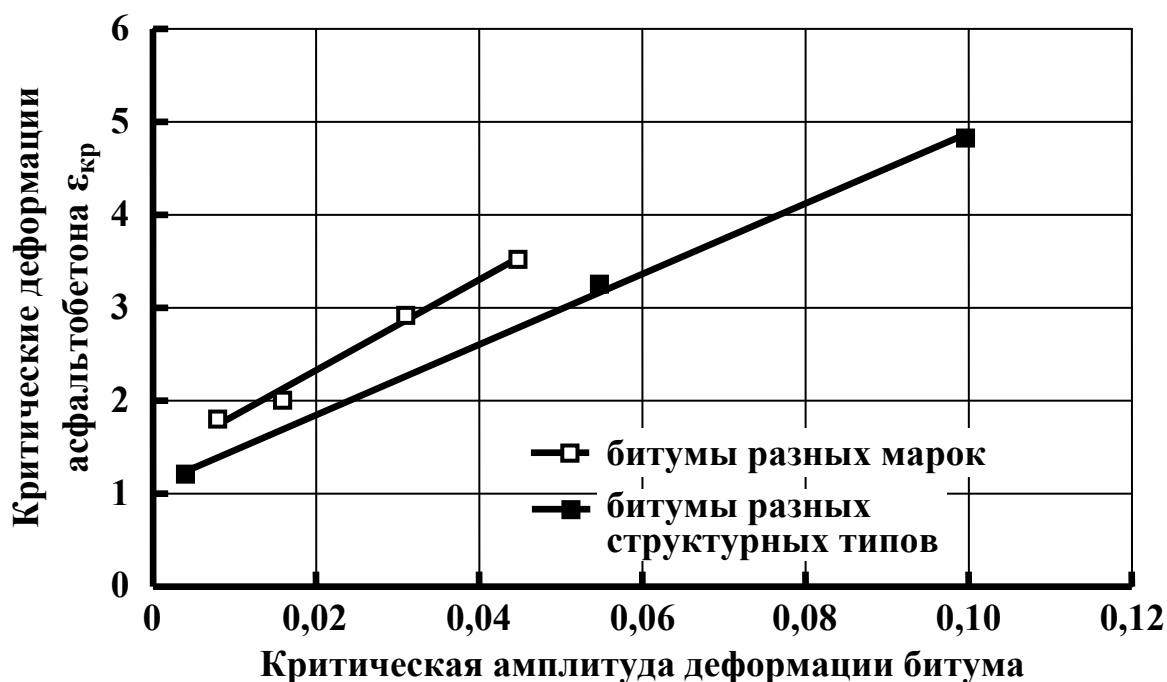


Рис. 7.8. Взаимосвязь между критериями линейности асфальтобетона и битума при температуре 20 °С и частоте 0,5 Гц

Такое распределение асфальтобетонов по модулю упругости может быть связано со степенью структурирования в них битума минеральным порошком. В то же время изменение модуля сдвига битума от 0,1 МПа до 1,0 МПа приводит к росту модуля упругости асфальтобетона от 400 МПа до 1000 МПа. Следовательно, прирост модулей упругости асфальтобетона (2,5 раза) существенно ниже, чем битума (10 раз). Приведенные на рис.7.9 зависимости опубликованы в 1978 году, аналогичные зависимости в странах ЕС опубликованы почти на 20 лет позже (Х. Дж. Бенедетто).

Структурирующая способность минерального порошка подтверждается также линейной в логарифмических координатах зависимостью модуля упругости асфальтобетона от модуля упругости асфальтовяжущего. В соответствии с ней увеличение модуля упругости асфальтовяжущего в 10 раз приводит к росту модуля упругости асфальтобетона в 4 раза. Таким образом, реологические методы позволяют количественно оценить величины и характер изменения фундаментальных реологических характеристик асфальтобетона и пути их регулирования.

На первый взгляд может показаться, что рассмотренные характеристики и зависимости являются абстрактными, не имеющими практического значения. На самом деле это не так. Реологические

показатели имеют основополагающее значение при конструировании дорожной одежды.

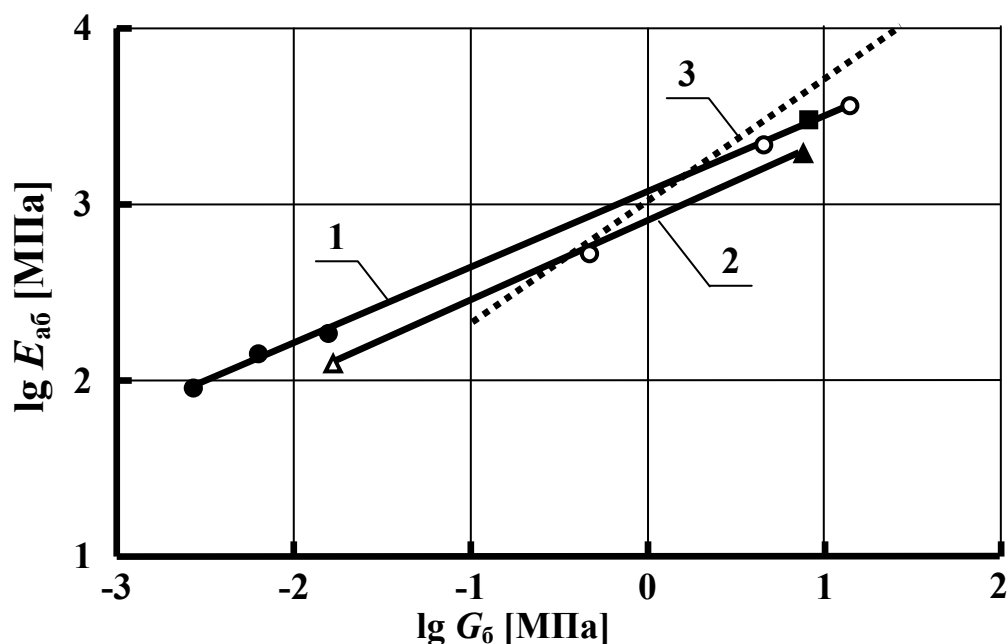


Рис. 7.9. Зависимость между модулем упругости при изгибе асфальтобетонов (E') и модулем сдвиговой упругости битумов (G') при соответствующих температурах и частотах деформирования. Асфальтобетоны: 1 – песчаный; 2 – с 60 % щебня. Битумы: БНД 40/60; БНД 60/90; БНД 90/130 и БНД 130/200. Сплошные линии – данные, полученные в ХАДИ (1977 г.), пунктирная линия – по публикациям Конгресса «Евроасфальт – Евробитум» (1996 г.)

В соответствии с условиями эксплуатации и климата дорожная одежда должна обладать определенным значением требуемого модуля. Этот модуль определяют на основании учета и соотношения модулей упругости, входящих в конструкцию слоев. Соотношение модулей упругости взаимосвязано с толщинами слоев. Чем больше значение модуля упругости верхнего слоя, тем при меньшей его толщине будет обеспечено значение требуемого модуля всей дорожной одежды. Чем больше величина требуемого модуля, тем больше толщина асфальтобетонного покрытия. С учетом модулей упругости асфальтобетонов можно регулировать и толщины других конструктивных слоев дорожных одежд.

Используя при расчете дорожной одежды объективное (достоверно установленное) при заданной температуре и времени нагру-

жения значение модуля упругости асфальтобетона, можно назначить технически оправданную и экономически выгодную конструкцию дорожной одежды. Введение в расчет большего, чем реальное значение, модуля упругости приведет к неоправданно малой толщине и, следовательно, к снижению уровня надежности одежды и преждевременному ее разрушению. Использование в расчетах заниженных значений модулей упругости будет сопровождаться перерасходом средств и материалов на строительство дороги.

Наиболее эффективным способом направленного регулирования реологических свойств битума (как показано в первой части) является его модифицирование полимерами. Это непосредственно сказывается на реологических свойствах асфальтобетона. Введение полимера в битум в количестве 5 % повышает модуль упругости асфальтополимербетона при температуре 20 °С и частоте 0,5 Гц по сравнению с асфальтобетоном на чистом битуме в 1,9 раза (2460 МПа и 1320 МПа), при температуре 50 °С – в 1,8 раза, а при температуре 0 °С – 1,4 раза. Введение 7 % полимера повышает модуль упругости асфальтобетона при 50 °С в 2 раза, а введение 10 % полимера – в 2,5 раза. В то же время увеличение содержания полимера более 5 % не приводит к дальнейшему росту модулей упругости при температурах ниже 0 °С, но сопровождается значительным снижением температуры механического стеклования асфальтобетона (от минус 18 °С до минус 29 °С), что существенно повысит трещиностойкость асфальтополимербетонного покрытия зимой (рис. 7.10). Зависимость температуры механического стеклования асфальтополимербетона от содержания полимера практически полностью следует понижению температуры хрупкости битума при введении в него тех же долей полимера.

Таким образом, модификация битума полимером в пределах 5–7 % радикально изменяет реологические свойства асфальтобетона, повышая его модуль упругости при температурах, близких к расчетным, расширяя область его линейного вязкоупругого поведения, повышая его трещиностойкость. Это открывает новые возможности повышения сдвигоустойчивости, трещиностойкости, долговечности и экономичности дорожных одежд за счет повышения их несущей способности.

В связи с вступлением Украины в Ассоциацию со странами ЕС и дальнейшей перспективой вхождения в страны ЕС а, следовательно, переходом на европейские стандарты выпуска

технической и технологической продукции, актуальным является сравнительное изучение влияния свойств битумов разных технологических видов на реологические свойства асфальтобетонов. Особенности технических и реологических свойств битумов *окисленных* (отечественных) и *дистилляционных* (западноевропейских) рассмотрены в первой части учебника.

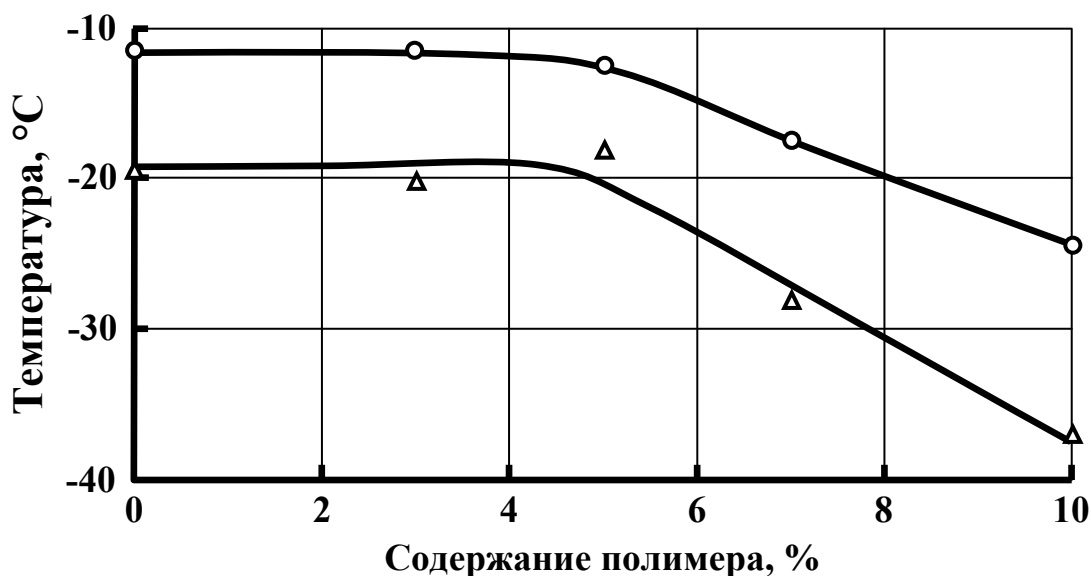


Рис. 7.10. Зависимость температуры хрупкости вяжущего (Δ) и температуры стеклования асфальтополимербетона (О) от содержания полимера при частоте деформирования 0,5 Гц

Экспериментальные данные, полученные в ХНАДУ, показывают, что асфальтобетоны типа Б на остаточных битумах с пенетрацией $79 \times 0,1$ мм и $118 \times 0,1$ мм отличаются от асфальтобетонов на окисленных битумах с близкой пенетрацией $75 \times 0,1$ мм и $105 \times 0,1$ мм. Они обладают большими значениями модулей упругости во всем диапазоне температур (от 40 до минус 20 °C). При температуре минус 20 °C их модули соответственно больше в 1,22 и 1,57 раза; при 0 °C – в 1,14 и 1,58 раза; при 20 °C – 1,13 и 1,22 раза. В то же время температура перехода их в хрупкое состояние на 5 °C выше.

7.2. Влияние скорости деформирования на прочность асфальтобетона

За пределами области линейной вязкоупругости (рис. 7.1), наступает нелинейное деформирование, а затем разрушение асфальто-

бетона. Теоретическое и экспериментальное изучение области нелинейного поведения асфальтобетонов является чрезвычайно сложным, поскольку приходится иметь дело с постоянно меняющимися значениями деформаций и напряжений, которые трудно сравнить друг с другом. Именно поэтому достаточно хорошо исследованы прочностные свойства асфальтобетона при сжатии, изгибе и сдвиге, четко определяющие границы, за которыми следует разрушение. Наиболее приемлемой из условий работы асфальтобетона в дорожной одежде схемой напряженного состояния является изгиб. Для изучения устойчивости к накоплению остаточных деформаций информативными являются также показатели прочности на сдвиг. Тем не менее наиболее распространенной схемой напряженно-деформированного состояния для оценки механических свойств асфальтобетона согласно стандарта, по крайней мере до настоящего времени, на постсоветском пространстве является сжатие. Прочность на сжатие используется для оценки качества асфальтобетона, но она никак не используется для расчета и конструирования дорожных одежд.

Температурная зависимость прочности, как и реологические свойства асфальтобетона, обусловлена особенностями деформационного состояния входящего в него битума (рис. 7.11). Это иллюстрируется подобием зависимостей показателей прочности на изгиб «чистого» битума и асфальтобетона в области температур ниже 20 °С. При этом неструктурированный поверхностью минеральных материалов обычный битум имеет меньшую прочность, чем асфальтобетон, а температура его механического стеклования смещена по сравнению с температурой механического стеклования асфальтобетона в сторону низких температур на 5–7 °С.

Кроме того, температурные зависимости прочности на изгиб асфальтобетона подобны температурным зависимостям когезии битумов (часть I, рис. 8.11). Изменение скорости деформирования приводит к смещению максимума прочности в сторону низких температур при ее уменьшении и в сторону высоких температур в случае ее повышения.

Возможность перехода от схемы напряженного состояния при сжатии к схеме изгиба, приближенной к условиям работы асфальтобетона в покрытии (табл. 7.2), следует из сравнения показателей прочности при сжатии ($R_{сж}$), при растяжении по образующей (r), при

изгибе сосредоточенной нагрузкой, приложенной посредине свободно лежащей балки ($R'_{изг}$), при изгибе балки двумя сосредоточенными нагрузками, расположенными на равном расстоянии друг от друга и опор ($R''_{изг}$).

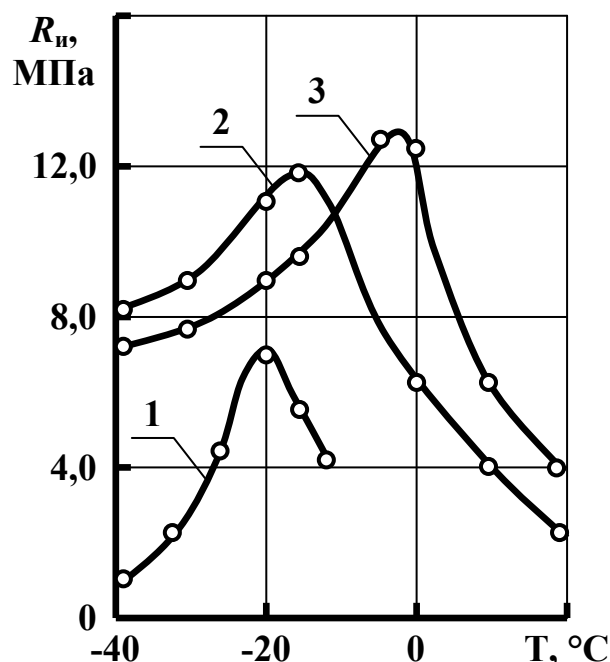


Рис. 7.11. Температурная зависимость прочности на растяжение при изгибе: 1 – чистого битума III типа; 2 – асфальтобетона типа Г с 6 % того же битума; 3 – асфальтобетона типа Г с 6 % битума II типа

Результаты таких испытаний при температуре 20 °C свидетельствуют о том, что наклоны скоростных зависимостей (m) при всех перечисленных схемах напряженного состояния, кроме сжатия, практически одинаковы (рис. 7.12). Кроме того, существуют достаточно надежные соотношения (табл. 7.2) между стандартным показателем прочности на сжатие ($R_{сж}$) и по образующей (r) на растяжение вдоль диаметра образца – около 4,5; между показателем прочности на сжатие ($R_{сж}$) и изгибом с приложением нагрузки посредине балки ($R'_{изг}$) – около 1,9; между прочностью на сжатие ($R_{сж}$) и на чистый изгиб с двухточечным приложением усилий ($R''_{изг}$); между показателями прочности на изгиб ($R''_{изг}$, $R'_{изг}$) и прочностью на растяжение по образующей (r).

**Соотношение показателей прочности при различных схемах
напряженного состояния и скоростям деформирования**

Скорость деформирования мм/мин	$\frac{R_{сж}}{r}$	$\frac{R_{сж}}{R'_{изг}}$	$\frac{R_{сж}}{R''_{изг}}$	$\frac{R'_{изг}}{R''_{изг}}$	$\frac{R'_{изг}}{r}$	$\frac{R''_{изг}}{r}$
4,6	4,23	1,87	1,99	1,09	2,30	2,12
3,0	4,32	1,88	2,02	1,08	2,31	2,14
1,3	4,5	1,94	2,07	1,07	2,33	2,18
0,6	4,7	1,99	2,12	1,06	2,35	2,21
0,3				10,6	2,34	2,25

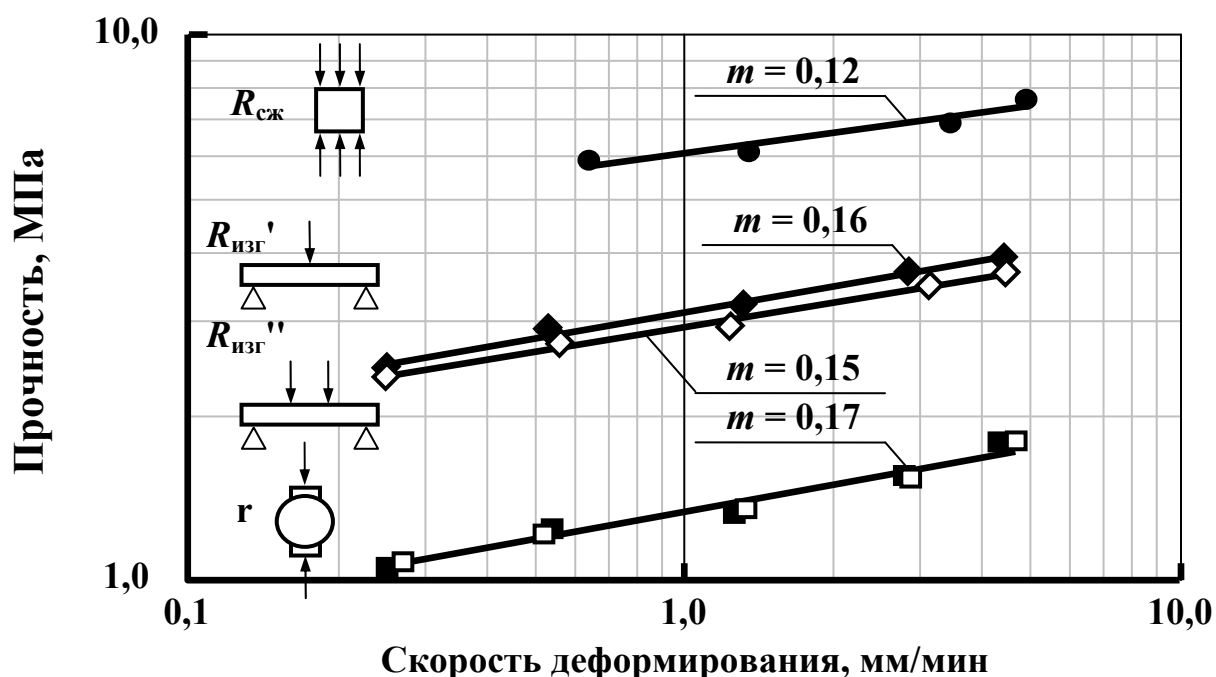


Рис. 7.12. Зависимость предела прочности асфальтобетона типа Г от скорости деформирования при 20 °С: ● – сжатие; ◆ – изгиб сосредоточенной нагрузкой; ◇ – чистый (двумя сосредоточенными нагрузками) изгиб; ■, □ – соответственно растяжение по образующей плитами и пластинами, шириной 10 мм

Близкие значения этих соотношений в диапазоне скорости от 0,3 мм/мин до 4,9 мм/мин свидетельствуют о том, что соотношение между временем релаксации и скоростью разрушения определяет значения показателей прочности при всех схемах напряженного состояния. Более низкое значение коэффициента пластичности при сжатии по сравнению со схемами, в которых участвуют растягиваю-

щие нормальные напряжения, объясняется подавлением релаксационных процессов за счет защемления образца опорными плитами, а также за счет трения и зацепления каменных составляющих асфальтобетона.

7.3. Циклическая усталость асфальтобетона

В дорожном покрытии асфальтобетон подвергается действию циклических и статических транспортных нагрузок. Многократное приложение нагрузок или их длительное действие могут привести к разрушению асфальтобетона при напряжениях гораздо меньших предела прочности, определяемого при одноразовом нагружении. Причиной этого является возникновение на первой стадии эксплуатации асфальтобетонов ограниченного количества микродефектов, которые с ростом количества нагружений или времени действия нагрузки накапливаются, переходят в макродефекты, что в конечном итоге после сотен тысяч проходов транспортных средств приводит к развитию трещин в слое асфальтобетона и образованию на поверхности слоя отдельностей многоугольной формы (рис. 7.13). Такой вид разрушений называется усталостным. Способность асфальтобетона противостоять такому разрушению (его усталостную выносливость) оценивают по количеству циклов разрушения, которое он выдерживает под действием заданных нагрузок или деформаций.



Рис. 7.13. Сетка усталостных трещин

Существует два метода оценки усталостной выносливости. В соответствии с первым из них на образец асфальтобетона передаются нагрузки, вызывающие в нем напряжения, величина и вид которых зависят от схемы напряженного состояния.

В настоящее время наиболее распространено испытание на изгиб, хотя существуют установки, позволяющие изучать усталостные явления при прямом сжатии и растяжении по образующей. При любой из этих схем испытаниям подвергаются партии образцов, разделенные на несколько серий из 3–5 образцов, каждый из которых в пределах серии испытывается под одной и той же нагрузкой.

От величины нагрузки зависит количество циклов, которое асфальтобетон выдерживает до наступления разрыва сплошности. Чем больше нагрузка и, соответственно, создаваемое в образце напряжение, тем меньше количество нагружений он выдерживает, быстрее достигается предельная разрушающая деформация (рис. 7.14)

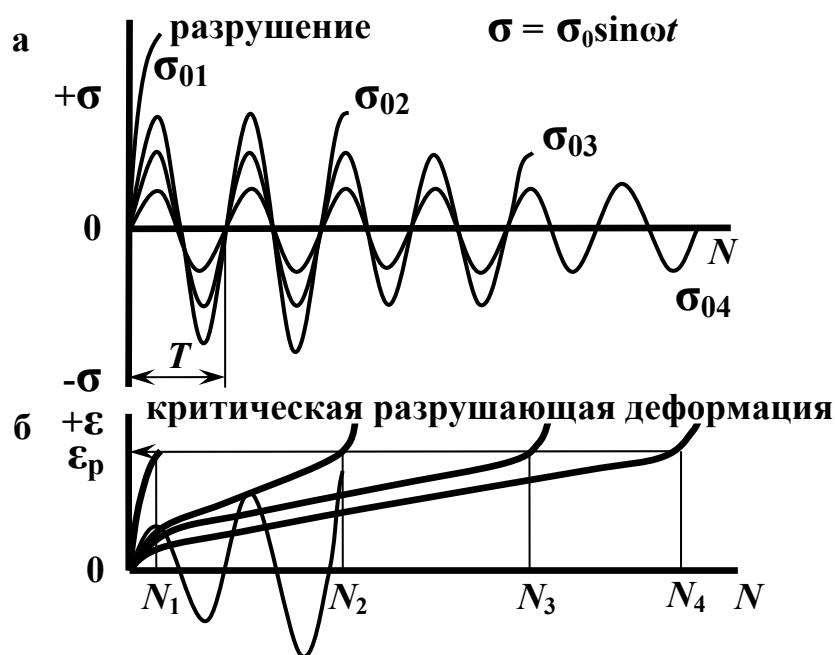


Рис. 7.14. Схема циклического деформирования постоянными напряжениями $\sigma_{01} > \sigma_{02} > \sigma_{03} > \sigma_{04}$ (а) и характера развития деформаций, которые отвечают этим напряжениям (б)

По результатам испытания партии образцов строят зависимости количества циклов до разрушения от напряжения (рис. 7.15). Обычно напряжения выбирают такими, чтобы циклическая усталость измерялась сотнями тысяч нагружений. Чаще всего зависимость между

количеством циклов (N) до разрушения и величиной напряжения (σ) описывается степенным уравнением, установленным в XIX веке по результатам испытаний в 1876 А. Вейлера на усталость металлических тросов, используемых для подъема из шахт клеток с углем или шахтерами

$$N = k \cdot \sigma_0^{-n}, \quad (7.3)$$

где k и n – постоянные, значения которых зависят от многих факторов.

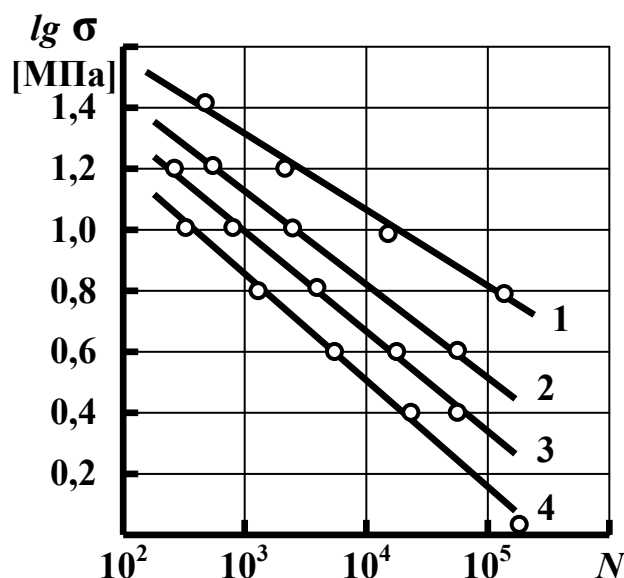


Рис. 7.15. Зависимость усталостной долговечности асфальтобетона на битумах различной вязкости от уровня напряжения (σ) при температуре испытания 20 °С: 1 – $P_{25} = 50 \times 0,1$ мм; 2 – $P_{25} = 70 \times 0,1$ мм; 3 – $P_{25} = 100 \times 0,1$ мм; 4 – $P_{25} = 150 \times 0,1$ мм (по данным В.И. Гончаренко)

Задаваемые нагрузки назначают с учетом установленной заблаговременно прочности асфальтобетона при одноразовом испытании до разрушения. В Западной Европе и США получила распространение установка для испытания асфальтобетона на чистый изгиб с приложением двух равномерных сосредоточенных нагрузок на равном расстоянии друг от друга (рис. 7.12, 7.16). Отличительной особенностью прибора являются размеры испытываемого образца (призмы), особенно его длины ($l = 38$ см, $b = 5$ см и $h = 5$ см). Синусоидальные колебания и напряжения передаются на образец с частотой 10 Гц, количество циклов до разрушения может достигать 1×10^6 .

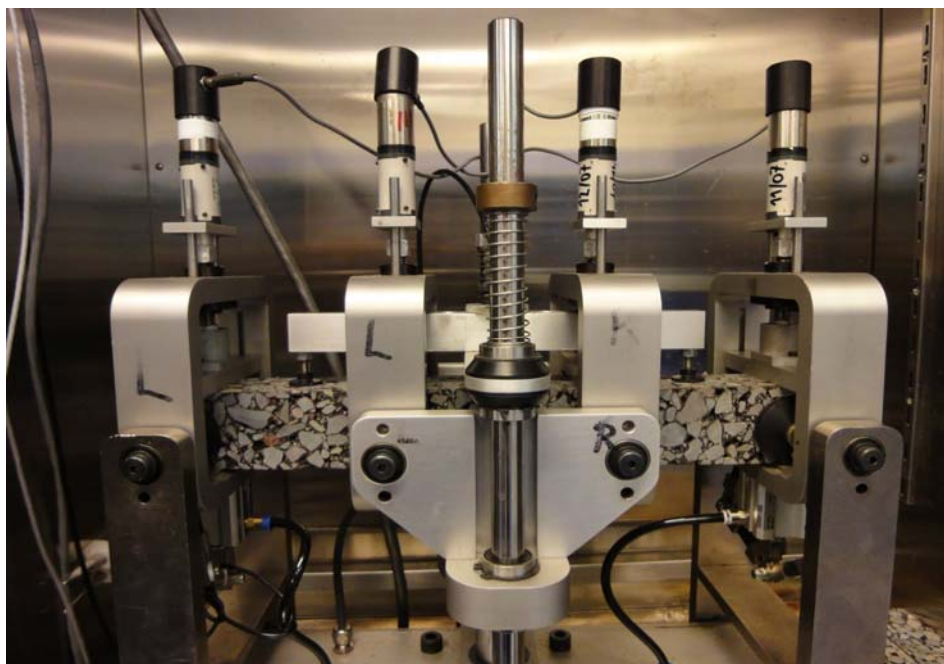


Рис. 7.16. Установка для испытания на чистый изгиб (Нидерланды)

Количество циклов до разрушения, как и все показатели механических свойств, учитывающие время, является чрезвычайно чувствительной характеристикой. При соотношении прочности асфальтобетона типа Б на изгиб при $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, равном 2,1, соответствующее соотношение количества циклов до разрушения при равной относительной деформации равно 30. Это же относится и к усталостной выносливости асфальтобетонов на битумах с разной глубиной проникания иглы (рис. 7.15). При равном напряжении $0,8\text{ МПа}$ асфальтобетон на битуме с пенетрацией $50 \times 0,1\text{ мм}$ превосходит асфальтобетон на битуме с пенетрацией $150 \times 0,1\text{ мм}$ по количеству циклов до разрушения почти в 100 раз. Тогда как соотношение значений пенетраций битумов не превышает 3.

Типичные зависимости усталостной прочности асфальтобетона при разных температурах приведена на рис. 7.17. Из них следует, что количество циклов до разрушения асфальтобетона при напряжении 1 МПа и температуре $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ в 72 раза больше, чем при температуре $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Второй метод испытаний на циклическую усталость основан на циклическом изгибе образцов серией постоянных (ε) деформаций (рис. 7.18). В этом случае в процессе циклического деформирования напряжения релаксируют. В качестве критерия выносливости принимают количество циклов, за которое начальное напряжение уменьшится в 2 раза. Количество циклов до падения напряжения в 2 раза в случае $\varepsilon = \text{const}$ для одного и того же асфальтобетона значительно

больше, чем в случае испытаний при $\sigma = \text{const}$ до разрушения. Это связано с тем, что при $\varepsilon = \text{const}$ дефекты в образце формируются очень медленно, релаксация идет на молекулярном уровне и трещины не развиваются.

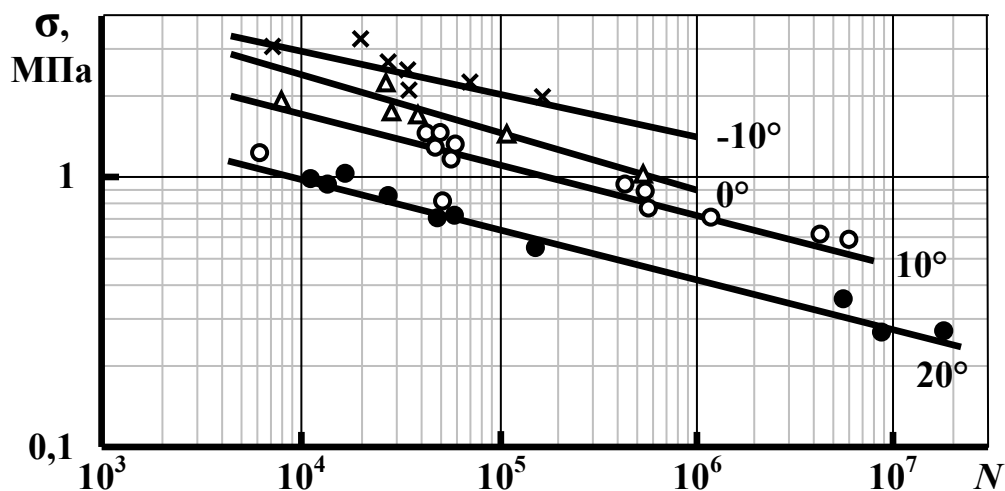


Рис. 7.17. Кривые циклической усталости асфальтобетона при разных температурах (Ж. Бонно, Франция)

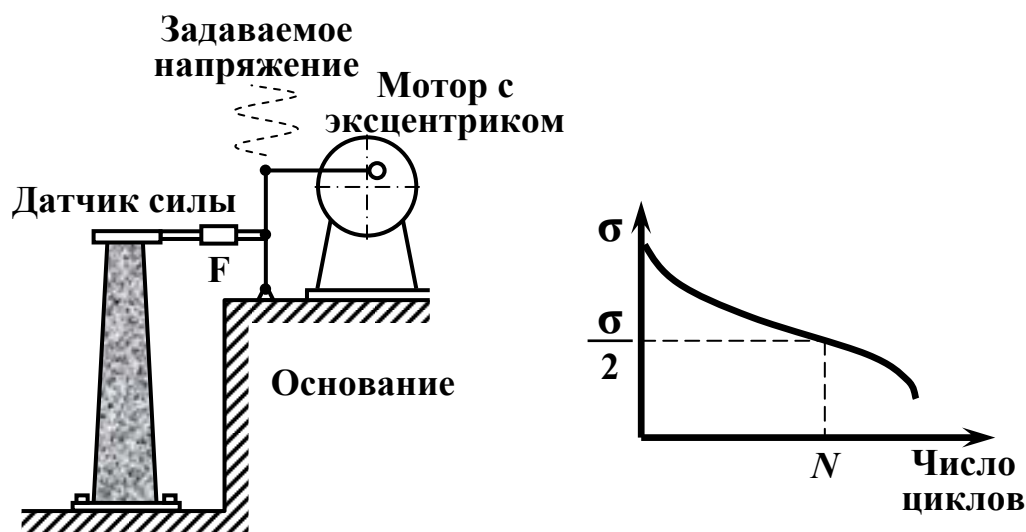


Рис. 7.18. Схема прибора для испытания на циклическую усталость (Франция)

Отличительной особенностью усталостных испытаний является большой разброс получаемых результатов, что вызывает необходимость испытания большого количества (до 5) образцов для получения достоверного среднего. Принимая во внимание, что испытание одного образца при малых напряжениях может продолжаться до 4 суток без перерыва, осуществление такого эксперимента представ-

ляется очень проблематичным. В случае же приостановки испытаний и отдыха образца в нем могут восстанавливаться разрушенные связи, а показатель усталости – увеличиваться почти в 10 раз.

Данные, полученные французскими исследователями, свидетельствуют о том, что циклическая усталость ускоряется (количество циклов уменьшается) при повышении пористости от 10 до 14 % в 1,2–1,4 раза; использовании окатанного песка в количестве 10 % в 2 раза; увеличении отношения П/Б сверх 2,0 до 2,6 – в 7 раз (недостаток битума); уменьшении содержания битума на 0,5 % по сравнению с оптимальным в 10,7 раз; замене известнякового щебня на силикатный в 4 раза.

Результаты испытаний на усталостную выносливость при всей своей сложности имеют большое теоретическое и практическое значение, поскольку с большой разрешающей способностью позволяют предсказывать надежность конструктивных слоев из разных видов и разного качества асфальтобетонов.

Согласно Т. Доану при испытаниях с постоянной амплитудой (10^{-4}) деформаций (10^{-4}) при температуре 10 °С количество циклов до разрушения (отвечающего снижению напряжения до $0,5 \sigma_p$) уменьшается: при переходе от асфальтобетона типа Б к асфальтобетону типа А в 2,7 раза; при переходе от асфальтобетона на БМП с 8 % SBS к асфальтобетону на чистом битуме 60/70 соответственно в 2,14. Слабая чувствительность этого вида испытания к модификации битумов полимерами, а также данные по повышению усталостной выносливости при повышении температуры свидетельствуют о том, что предпочтительным является схема определения усталостной выносливости асфальтобетонов при постоянных амплитудах напряжений или статической усталости при постоянных действующих напряжениях.

7.4. Статическая усталость асфальтобетона

При испытании асфальтобетона на ползучесть при постоянном напряжении в нем накапливаются разрушения, способствующие развитию деформации (рис. 7.19). При малых временах действия и малых нагрузках асфальтобетон работает в области обратимых деформаций. С ростом величины постоянно действующей нагрузки на кривой ползучести выделяется три участка деформирования: 1 – условно-мгновенной деформации; 2 – течения с постоянной ско-

ростью; 3 – лавинного разрушения асфальтобетона. Время от момента нагружения до наступления лавинного разрушения можно назвать временем жизненного цикла (ВЖЦ) асфальтобетона. Длительность этого времени связана с напряжениями, вызываемыми нагрузками. Чем больше напряжение, тем меньше ВЖЦ.

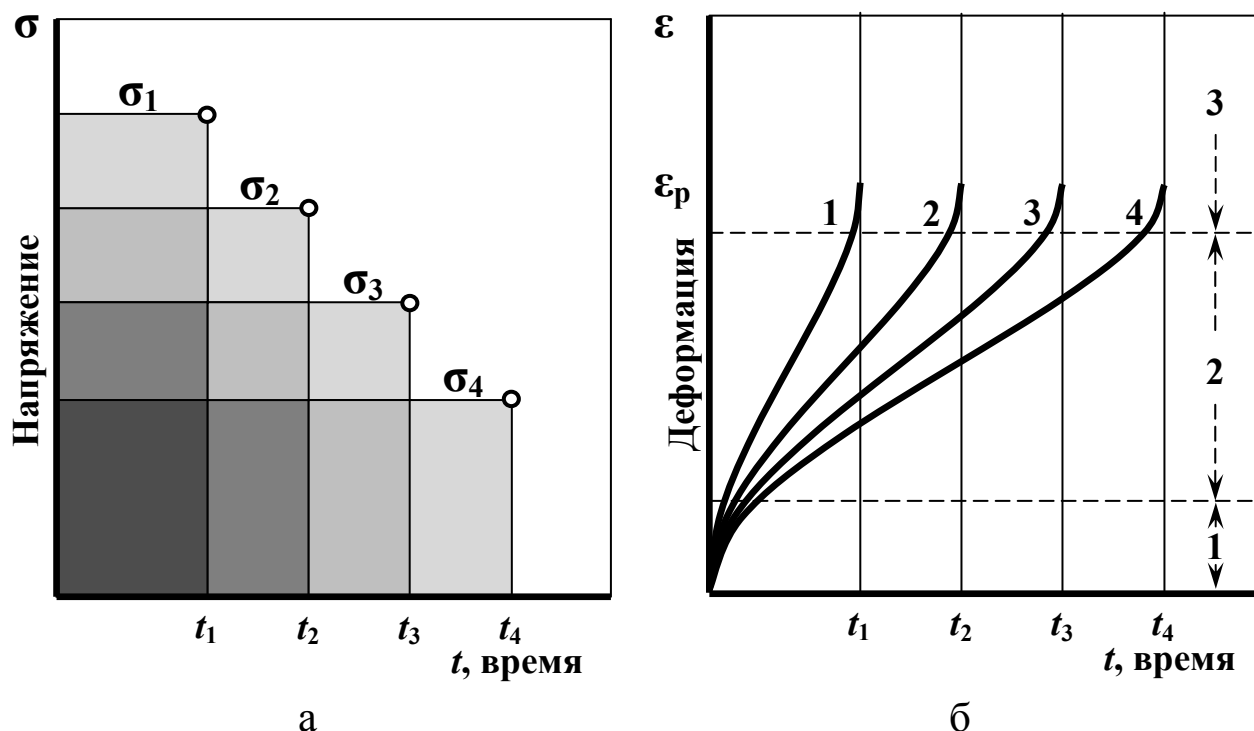


Рис. 7.19. Схема испытаний при постоянных напряжениях ($\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 > \sigma_4$) (а) и характер развития деформаций до разрушения (ϵ_p) за время $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ (б)

Время жизненного цикла ($t_{\text{ВЖЦ}}$) описывается степенным уравнением, подобным тому, которое описывает циклическую усталость

$$t_{\text{ВЖЦ}} = B \cdot \sigma^{-b}, \quad (7.4)$$

где B и b – постоянные;

σ – напряжение при сдвиге, растяжении или изгибе.

В то же время это уравнение подобно степенному уравнению Н.Н. Иванова. В нем коэффициент b имеет такой же физический смысл, как и коэффициент пластичности. Испытания могут выполняться при различных напряженных состояниях, сдвиге, растяжении, изгибе.

Типичные зависимости ВЖЦ от напряжения при сдвиге приведены на рис. 7.20. При температуре 50 °С для асфальтобетонов с исполь-

зованием битумов разных марок при одном и том же напряжении 0,03 МПа время жизненного цикла асфальтобетона на битуме с пенетрацией $78 \times 0,1$ мм равно 640 с, а асфальтобетона на битуме с пенетрацией $185 \times 0,1$ мм – 56 с, т.е. ВЖЦ уменьшается в 11 раз. При переходе от температуры испытаний $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ к температуре $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ ВЖЦ уменьшается в 1900 раз, в то время как прочность на сдвиг при этом отличается не более чем в 3 раза. Таким образом, ВЖЦ при статической усталости так же, как и количество циклов при циклической усталости, является во много раз более чувствительным к изменению условий испытания или состава асфальтобетона, чем его прочность.

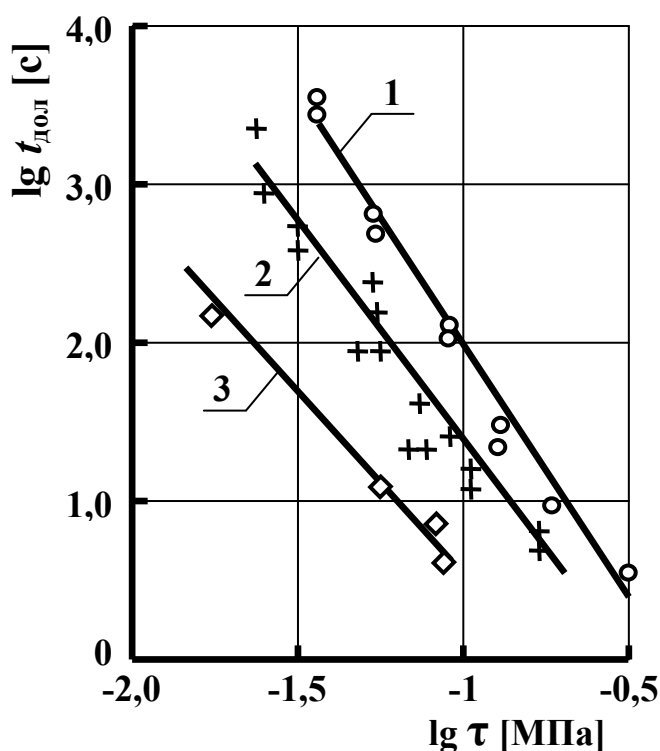


Рис. 7.20. Долговременная прочность асфальтобетона при сдвиге и $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ на битумах разной вязкости: 1 – $\Pi_{25} = 30 \times 0,1$ мм; 2 – $\Pi_{25} = 78 \times 0,1$ мм; 3 – $\Pi_{25} = 185 \times 0,1$ мм

Но огромная разница ВЖЦ связана тем, что одно и то же напряжение (σ_d) при разных температурах или для асфальтобетонов на разных по вязкости битумах приводит к разным уровням напряженного состояния асфальтобетонов, характеризующимся отношением этого напряжения (σ_d) к прочности асфальтобетона ($R_{\text{изг}}$). Например, действующее напряжение изгиба 0,7 МПа составляет 0,35 от предела прочности асфальтобетона на битуме БНД 130/200 (2,0 МПа) и быстро разрушает его (за 300 с). В случае асфальто-

бетона на битуме БНД 40/60 с прочностью на изгиб (2,8 МПа) оно составит всего 0,25 от разрушения, и такой асфальтобетон разрушается за 132000 с. Соотношение между ВЖЦ составляет 329 раз.

В то же время очевидно, что асфальтобетон на маловязком битуме не может быть использован на дороге с тяжелым и интенсивным грузовым движением. Каждый тип и вид асфальтобетона предназначен для определенных условий работы дорожной одежды. Поэтому целесообразней сравнивать ВЖЦ различных асфальтобетонов при сопоставимых уровнях напряженного состояния, т.е. при равном отношении напряжения (σ_d), действующего в асфальтобетоне при испытании под постоянной нагрузкой к пределу прочности ($R_{изг}$) асфальтобетона при одной и той же схеме напряженного состояния. В таком случае различие времен жизненного цикла разных асфальтобетонов существенно уменьшается и объективнее (достовернее) отражает потенциальную долговечность разных асфальтобетонов. Например, при $\sigma_d/R_{изг} = 0,2$ соотношение между временами жизни асфальтобетона на битуме с пенетрацией $43 \times 0,1$ мм (120800 с) и асфальтобетона на битуме с пенетрацией $160 \times 0,1$ мм (19300 с) составляет 6,3. Величину отношения $\sigma_d/R_{изг}$ целесообразно принимать невысокой, не более 0,2, поскольку при этом более существенно различие во временах жизни разных асфальтобетонов (рис. 7.21).

Такой уровень напряженного состояния, согласно действующим нормам расчета и конструирования дорожных одежд, близок к состоянию, в котором асфальтобетон при фиксированных скоростях или частоте деформирования и расчетных температурах 10–20 °С работает в области линейной вязкоупругости, что и является залогом его большой долговечности при работе в дорожном покрытии.

Асфальтобетон в дорожном покрытии подвергается не только действию нагрузок и температуры, но одновременно и действию жидких агрессивных сред, таких как вода, растворы хлоридов, используемые для борьбы с гололедом, растворы кислот из-за кислотных дождей, горюче-смазочные жидкости и многие другие. Одновременное механическое и физико-химическое воздействие приводит к снижению ВЖЦ асфальтобетона, сокращению сроков его эксплуатации в дороге. Особенности разрушения в условиях воздействия двух факторов иллюстрируются зависимостями, приведенными на рис. 7.22–7.23. Из них следует, что в воздушной среде ВЖЦ асфальтобетона наибольшее.

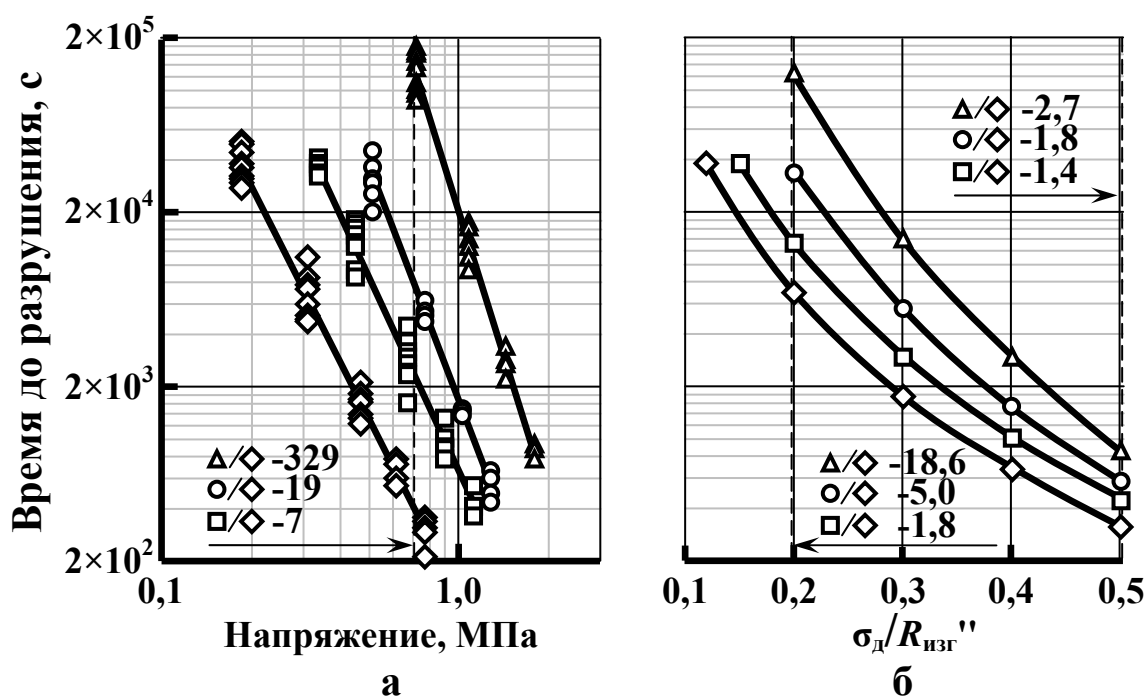


Рис. 7.21. Долговременная прочность асфальтобетона типа Г при изгибе на битумах различной пенетрации при заданных напряжениях (а) и уровнях напряженного состояния (б) при 22 °С: Δ – Б (43); $\circ$ – Б (64); $\square$ – Б (103); $\diamond$ – Б (160)

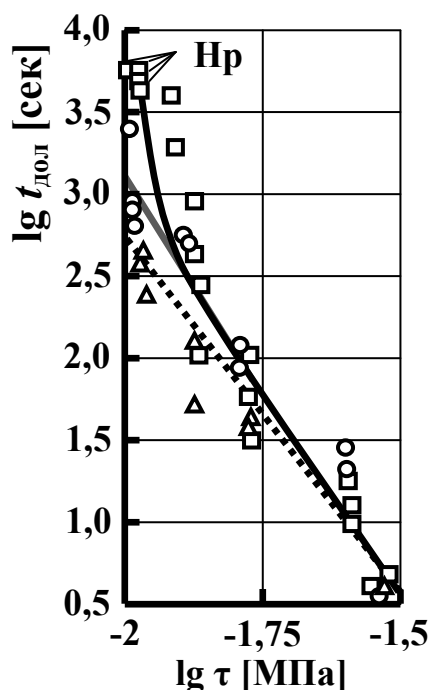


Рис. 7.22. Долговременная прочность асфальтобетона холодного типа:
 $\square$ – испытания на воздухе;
 $\circ$ – в воде; $\triangle$ – в керосине;
 Нр – образцы не разрушились

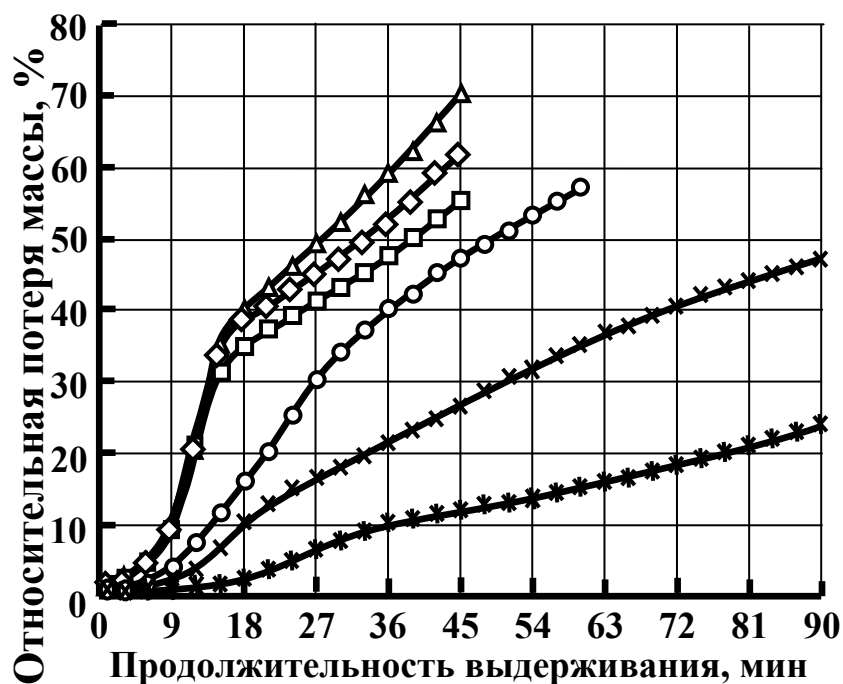


Рис. 7.23. Скорость растворения битумов и БМП в дизельном топливе при 22 °С:
 $\square$ – Б (64); $\diamond$ – Б (103); Δ – Б (160);
 $\circ$ – Б₆₄^{10MP} (102); $\times$ – Б₁₆₀^{3П} (107); $\ast$ – Б₁₆₀^{6П} (66)
 (по данным Р.А. Хамада)

Жидкая среда ускоряет разрушение. При этом сущность механизма разрушения определяется видом среды. В случае воды, а также водных растворов электролитов и кислот основным является отслоение пленки битумного вяжущего от поверхности каменного материала. Такие жидкости проникают к границе между пленкой битума и поверхностью каменных материалов разными путями. Наиболее простой из них заключается в проникании среды в дефекты битумной пленки, представляющие собой нарушения ее сплошности из-за некачественного перемешивания. Разрывы пленки могут образовываться при некачественном уплотнении ввиду чрезмерной для данной смеси нагрузки на укатываемый слой, создаваемой катком. В меньшей мере этому способствует коррозия (разъедание) пленки вяжущего при ее химическом взаимодействии со средой.

После попадания на границу раздела фаз вода или водный раствор химических веществ, который хорошо смачивает минеральную подложку, проникает под пленку вяжущего и отслаивает ее (часть 1, раздел 5). Непосредственным результатом этого являются шелушение и выкрашивание покрытия – отслоение мелких и крупных зерен от слоя асфальтобетона (рис. 2.1). В случае же проникания среды в массу асфальтобетона, в нем образуется множество дефектов, которые снижают его прочность и модули упругости, ослабляют покрытие и снижают долговечность дорожной одежды.

Действие среды тем разрушительнее, чем выше ее смачивающая способность (меньше краевые углы смачивания средой поверхности минеральных материалов) и чем меньше адгезия вяжущего к ней. Вклад среды в разрушение асфальтобетона тем больше, чем меньше скорость его деформирования или меньше скорость развития в нем трещин под нагрузкой. Это связано с соотношением скорости проникания среды и скорости развития трещин в асфальтобетоне. Если среда быстро смачивает поверхность минеральных материалов, она успевает достичь устья трещин и ускоряет их развитие.

Свидетельством этого являются зависимости времени жизни асфальтобетона в воде, водном растворе серной кислоты и поверхностно-активного вещества (рис. 7.24). При малых напряжениях вклад среды в снижение ВЖЦ асфальтобетонов очень велик. Больше того, среда и без нагружения может разрушить асфальтобетон, хотя для этого необходимо продолжительное время. Примером этого являются разрушения асфальтобетона в местах скопления воды, не

подверженных действию транспорта. При больших нагрузках или скоростях деформирования трещины и разрушения развиваются стремительно, а среда практически не участвует в разрушении, и ВЖЦ в среде и на воздухе практически одинаково.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ), резко понижая поверхностное натяжение воды, ускоряют активное смачивание поверхности каменных материалов и битума и процесс разрушения. Это может быть проиллюстрировано такими данными: ВЖЦ асфальтобетона типа Б на битуме БНД 40/60 при напряжении 0,5 МПа на воздухе равно $2,7 \times 10^5$ с, в воде – $1,8 \times 10^5$ с, в водном растворе (0,05 %) ПАВ – $0,6 \times 10^5$ с, т.е. по сравнению с воздухом в средах оно уменьшилось соответственно в 1,5 и 4,5 раза.

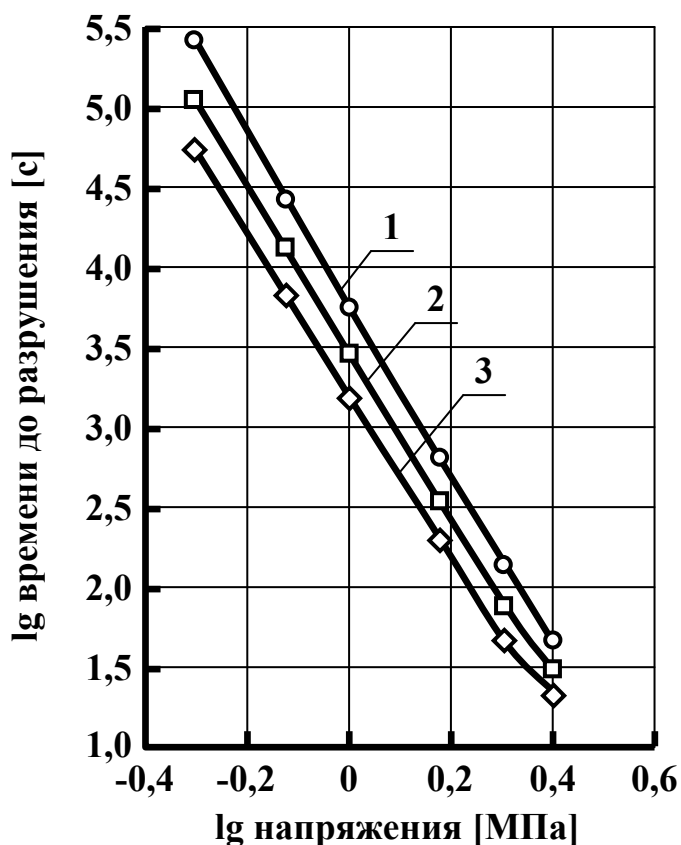


Рис. 7.24. Зависимость времени до разрушения асфальтобетона (тип Б) с 4,0 % битума БНД 40/60 от напряжения при температуре 21 °С в средах: 1 – воздух (○); 2 – 5 % водный раствор NaCl (□); 3 – 0,05 % водный раствор ПАВ ОП-10 (◇) (по данным С.В. Ефремова)

В случае попадания топлива масел и других горюче-смазочных жидкостей на асфальтобетонное покрытие, что в лаборатории имитируется разрушением в среде, механизм действия среды заключается в

разжижении битума. Это сопровождается уменьшением его вязкости, когезии и неспособностью битумных пленок быть клеем, связывающим отдельные минеральные зерна в единое целое – монолит. Этот процесс развивается очень быстро, поскольку битум относится к неполярным системам, он близок по составу, поверхностному натяжению и плотности к горюче-смазочным жидкостям. Воздействие таких жидкостей проявляется даже при относительно малых временах испытаний. При малых напряжениях ВЖЦ сокращается до недопустимо низкого уровня. В этом можно убедиться, наблюдая за самопроизвольным разрыхлением асфальтобетонного покрытия на стоянках, когда на него попадает горюче-смазочный материал (ГСМ). Опыты по растворению асфальтовяжущего вещества, в котором в качестве вяжущего использованы битумы с пенетрацией $160 \times 0,1$ мм, $103 \times 0,1$ мм и $64 \times 0,1$ мм, показали (рис. 7.23), что за 45 минут количество растворившегося в зимнем дизельном топливе битума составило 70 %, 61 %, 55 %. Чем выше пенетрация битума, тем скорее он растворяется в органической жидкости, поскольку менее вязкие битумы содержат больше, чем высоковязкие, легкорастворимых в ГСМ масел и меньше более устойчивых к растворению в них смол и асфальтенов.

8. СТАРЕНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА И ЕГО ПОВТОРНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ

8.1. Особенности старения асфальтобетона

Все дорожные материалы, содержащие битумные вяжущие, в процессе службы в дорожной конструкции изменяют свои свойства. В определенные сроки для разных видов асфальтобетонов в зависимости от климатических, транспортных условий и места дорожной одежды эти эксплуатационные свойства изменяются настолько, что дальнейшее их сохранение, как правило, в верхних слоях дорожной одежды ни по техническим, ни по экономическим (стоимость перевозок по плохим дорогам резко возрастает), ни по условиям безопасности движения становится невозможным. Покрытие разделяется на отдельные блоки по схеме, приведенной на рис. 8.1.

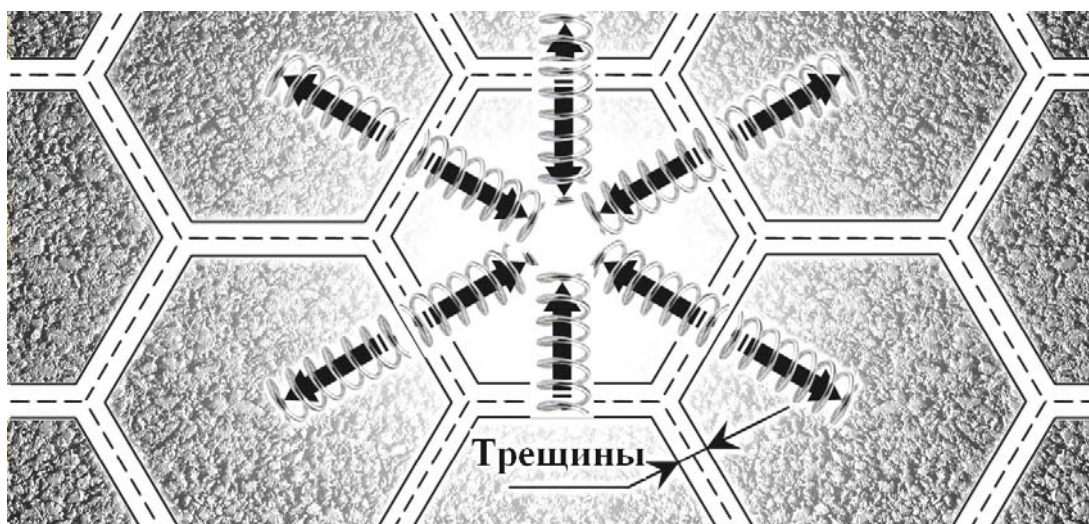


Рис. 8.1. Схема образования трещин и отдельных блоков старения (стрелка – внутренние напряжения); ---- – состояние поверхности до старения; ——— – состояние поверхности после старения

Необратимое ухудшение свойств асфальтобетона в покрытии в первую очередь связано со старением в нем битумного вяжущего. Сущность процессов старения битума сводится к двум основным механизмам, заключающимся в медленно текущей окислительной полимеризации составляющих битум компонентов и испарении низкомолекулярных углеводородов из битума, находящегося в межзерновом пространстве в структурированном и объемном состоянии.

Приведенные в табл. 8.1 данные свидетельствуют о том, что битумы типа «гель» являются быстростареющими. Уже на технологическом этапе после 3 часов выдерживания в тонком слое при температуре 160 °С они могут достичь такого уровня старения, которому отвечает содержание асфальтенов, близкое 36–38 %. В результате битум становится хрупким при температуре 25 °С, тогда как исходный битум до старения имел температуру хрупкости, близкую к минус 30 °С. Наименее подвержены старению битумы со структурой типа «золь». В подобное состояние они переходят после термостатирования в течение 19 часов (т.е. за время в шесть раз более длительное). Промежуточной склонностью к старению характеризуются битумы типа «золь-гель», время накопления в них указанного содержания асфальтенов примерно 11 часов.

При этом старение происходит главным образом за счет уменьшения содержания парафиновых, малоциклических углеводородов и петролейно-бензольных смол. Вследствие этого нарастает содержание твердых спиртобензольных смол (температура хрупкости около + 22 °С) и, преимущественно, асфальтенов.

Таблица 8.1

**Изменение группового состава и времени достижения
хрупкого состояния битумов трех структурных типов
после выдерживания в тонком слое при температуре 160 °С
(по данным А.С. Колбановской)**

Тип битума	Время выдерживания до охрупчивания (*), часы	Содержание групп веществ, % по массе				
		масел	смол		всего смол	асфальтенов
			петролейно-бензольных	спирто-бензольных		
«гель»	0	51,6	14,8	5,1	19,9	27,9
	3*	42,8	7,1	10,0	17,1	38,6
	16	35,2	4,6	11,9	16,5	46,8
«золь»	0	51,0	24,4	12,9	37,3	12,3
	8	42,0	1,0	23,4	24,4	33,5
	19*	40,5	3,8	18,4	22,2	37,6
	30	35,9	6,1	16,2	22,3	41,2
«золь-гель»	0	48	14,6	16,7	31,3	21,7
	11*	42,8	2,1	19,5	21,6	36,2

Примечание: * время, отвечающее накоплению в битуме 36–38 % асфальтенов.

По данным американских исследователей после семи лет работы асфальтобетонного покрытия в дорожной одежде свойства входящего в него битума изменились следующим образом: пенетрация при 25 °С уменьшилась от $65 \times 0,1$ мм до $24 \times 0,1$ мм; температура размягчения выросла от 50 °С до 60 °С, растяжимость при 25 °С снизилась от 117 см до 5 см. Это хорошо согласуется с результатами французских ученых, показавших, что битумы достигают критического уровня старения, когда их пенетрация приближается к $20 \times 0,1$ мм, а температура размягчения – к 75 °С.

Таким образом, процессы старения приводят к переходу масел в смолы, а смол в асфальтены, что выражается в повышении твердости битума (растет его пенетрация) вплоть до хрупкого состояния и уменьшении его деформативности во времени. Интенсивность процессов перехода обусловлена интенсивностью факторов окружающей среды: температуры воздуха, ультрафиолетового облучения, света и воды.

Кроме того, с самого начала смешения битума с каменными материалами и на протяжении длительного времени нахождения асфальтобетона в дорожном покрытии происходит фильтрация (просачивание) битумных масел в поры каменных материалов (рис. 4.3 и 8.2), что также изменяет групповой состав битума у поверхности каменного материала, уменьшает содержание масел в битумных пленках, охрупчивает их. Вследствие этих процессов увеличивается плотность битумных пленок, в них возникают внутренние напряжения, что сопровождается развитием трещин, разделяющих сплошное асфальтобетонное покрытие на отдельные многоугольные плиты неправильной формы (рис. 2.1).

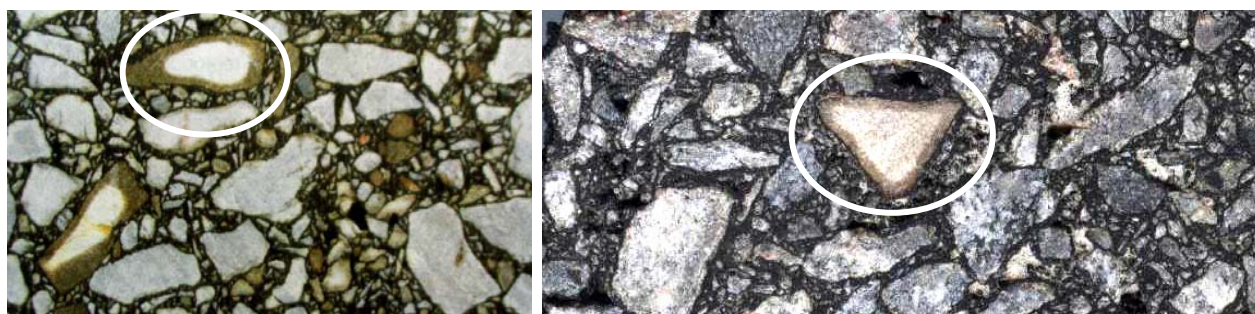


Рис. 8.2. Фильтрация битумных масел в поры каменных материалов (слева – образец М. Шаппа, Франция; справа – ХНАДУ)

Степень старения зависит от состава и структуры асфальтобетонов. В большей степени стареют асфальтобетоны на маловязких битумах и битумах со структурой типа «гель», содержащих много масел, а также пористые асфальтобетоны, имеющие большую площадь контакта воздуха с внутренней поверхностью битумных пленок. Более устойчивы к старению асфальтобетоны с малой остаточной пористостью, асфальтополимербетоны, битумные масла которых в значительной степени поглощаются полимерами при их набухании во время производства БМП.

В процессе старения битумные пленки внутри асфальтобетона становятся более гидрофильными (улучшается их смачивание водой), что способствует прониканию воды в поры асфальтобетона, в результате понижается водо- и морозостойкость асфальтобетона, ускоряется шелушение и выкрашивание асфальтобетонного покрытия.

Повышение устойчивости асфальтобетона к старению достигается применением смолистых битумов со структурой типа «золь»; использованием битумов, модифицированных полимерами, и битумов с добавками антистарителей; применением плотных каменных материалов и асфальтобетонов с высокой плотностью (низкой остаточной пористостью).

8.2. Регенерация* асфальтобетонных смесей

Разрушение асфальтобетонных покрытий вследствие старения и разрушающего действия механических нагрузок вызывает необходимость восстановления дорожной одежды. Долгое время главным способом устранения разрушений являлось перекрытие старых слоев новым асфальтобетоном. Однако это привело к появлению ряда проблем. В больших городах регулярное наращивание новых слоев сопровождалось поднятием покрытия и бордюров на более высокую отметку.

Кроме того, наращивание новых слоев приводило к большим финансовым затратам из-за резкого повышения цен на нефть и соответственно битума, к необходимости использования огромных объемов каменных материалов (щебня и песка, минерального

* Регенерация – превращение отработанных материалов (в частности асфальтобетона) в исходные для повторного их использования.

порошка). В свою очередь это сопровождалось экологическими последствиями, приводящими к истощению невозобновляемых источников сырья, ухудшению экологической безопасности из-за увеличивающихся объемов выбросов углеродного газа (CO_2 – «углеродный след») в окружающую среду и непомерному расходу энергоресурсов.

Это привело к разработке ресурсосберегающих и энергосберегающих технологий. К настоящему времени разработано множество технологий повторного использования (рециклирования) и возобновления (регенерации) асфальтобетонных материалов. Но принципиально разными являются две технологии: восстановление асфальтобетонного слоя на дороге холодным или горячим способом и регенерация горячим или холодным способом старых асфальтобетонных смесей на асфальтобетонном заводе.

В излагаемом курсе рассматривается технология регенерации асфальтобетонных смесей на асфальтобетонных заводах, поскольку технология рециклирования (переработка асфальтобетона на дороге) является составной частью курса «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог».

Технология регенерации в асфальтобетонных смесителях на АБЗ (рис. 8.3) включает несколько стадий: изъятие асфальтобетона из постаревшего разрушенного слоя преимущественно фрезерованием (реже изъятие асфальтового лома, полученного вскрытием асфальтового слоя пневмо- или гидромолотами, захватно-клевковыми ковшами); транспортирование фрезата к месту переработки и его складирование; обновление смеси путем ее разогрева и смешения либо с чистым битумом, либо с новой смесью в соотношениях, обеспечивающих требуемое качество возобновляемой смеси в соответствии с новой областью ее применения. Транспортирование переработанной смеси к месту, укладка ее традиционным способом в слой основания или покрытия и уплотнение.

Для получения обновленной смеси чаще всего используют смешение регенерируемого материала с необходимыми для корректирования его гранулометрического состава и свойств новыми минеральными материалами, битумом, пластификатором или же новыми асфальтобетонными смесями.

Решение о выборе вида регенерации принимается на основе предварительного изучения качества смеси и асфальтобетона из изымаемого слоя. Для этого необходимо установить качество минеральных материалов, входящих в него, и гранулометрический

состав минеральной части, количество и свойства постаревшего битума (пенетрацию и температуру размягчения).

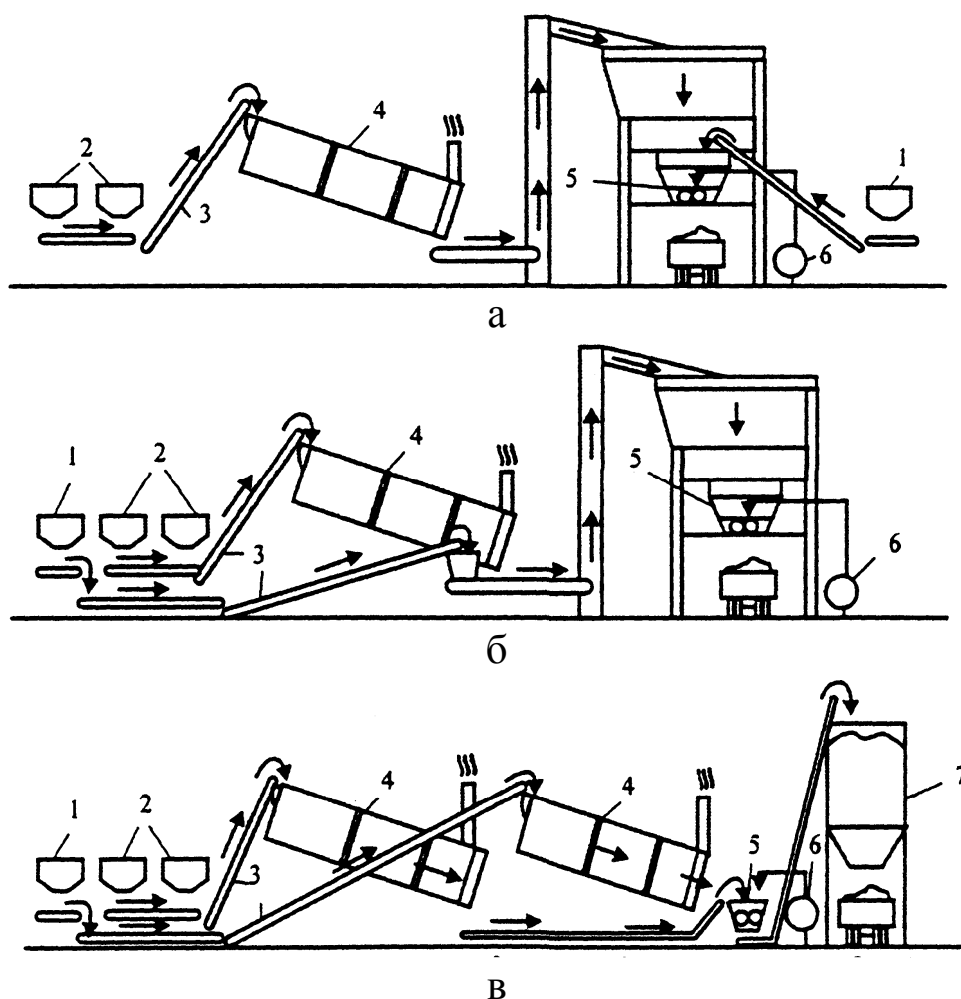


Рис. 8.3. Регенерация асфальтобетона в смесителях периодического действия: а – с подачей старого асфальтобетона непосредственно в смеситель; б – с подачей старого асфальтобетона в минеральные материалы, прошедшие через сушильный барабан; в – с использованием сдвоенного сушильного барабана (по данным «Справочная энциклопедия дорожника. Том. 1» Под ред. А.П. Васильева): 1 – старый асфальтобетон; 2 – новые минеральные материалы; 3 – транспортер; 4 – сушильный барабан; 5 – смеситель; 6 – битум; 7 – накопительный бункер

На основе этих данных решают вопрос о пригодности старого асфальтобетона для получения того или иного типа и вида регенерированного асфальтобетона. При этом чем более ответственной является область его применения (категория дороги, верхний, нижний слой покрытия или верхний слой основания), тем меньшее количество старого асфальтобетона может быть введено в новую

смесь. В западноевропейской практике в случае смесей для верхнего слоя допускается добавлять 10 % старой смеси, для нижнего слоя – 20 %, для слоя основания – 40 %.

Проверка правильности принятого соотношения смеси из покрытия и новой смеси осуществляется по результатам лабораторных испытаний, а также пробными производственными замесами. Получаемый в результате асфальтобетон должен соответствовать требованиям, предъявляемым к обычному асфальтобетону предполагаемого вида и типа с учетом условий его работы в слое дорожной одежды.

По нормам ЕС, если находящаяся на складе фрезерованная смесь является неоднородной (по природе и качеству каменных материалов и битума), то она не может быть использована для получения смесей, предназначенных для верхнего слоя покрытия, а в новые смеси нижнего слоя покрытия она может быть введена в количестве, не превышающем 10 %.

Большое содержание старой смеси (30–65 %) в регенерируемой смеси допускается тогда, когда старая смесь однородна, поступает из одного источника и имеет практически постоянный, хорошо известный состав. Обычно такие смеси поступают с участков дорог большой протяженности. По таким участкам имеются сведения о конструкции и паспортные данные на использованные на них асфальтобетонные смеси. Кроме того, старые смеси проверяют на соответствие стандартным требованиям к новым смесям. Особое внимание уделяют степени старения вяжущего, после определения его свойств корректируют его вязкость, определяют количество вяжущего, которое необходимо вводить при смешении старой и новой смесей.

Для регенерации используют обычные асфальто-смесительные установки, дооборудованные специальными линиями подачи фрезата или измельченного асфальтобетона в сушильный барабан смесителя циклического действия или прямо в барабан-смеситель непрерывного действия. При этом содержание вновь вводимого вяжущего корректируется с учетом его содержания в старой смеси. При производстве регенерируемых смесей необходим строгий контроль качества минеральных составляющих и вяжущего, температурных режимов нагрева смеси, точности дозирования, гранулометрического состава и содержания вяжущего в регенерируемых смесях, условий их укладки и уплотнения смесей.

Регенерация смесей на заводе приводит в экологическом плане к экономии природных ресурсов и сокращению транспортных перевозок. В технологическом аспекте она дает возможность получить достаточно качественные смеси. В случае малого содержания фрезата (10–15 %) регенерированная смесь является гомогенной в такой же степени, как и новая, ее укладка и уплотнение аналогичны традиционным, битумное вяжущее в процессе приготовления смесей не стареет. В энергетическом отношении экономия энергоресурсов тем большая, чем больше содержание фрезата в рециклируемой смеси и меньше дальность ее перевозки к месту укладки.

Проблема повторного использования состаренного асфальтобетона в Западной Европе и США относится к 60-м годам XX столетия. Всемирное распространение нашло оборудование немецкой фирмы Vitrgen, обеспечивающее регенерацию на месте 1 км покрытия за смену. В настоящее время, когда в Западной Европе практически создана автотранспортная сеть, важнейшей задачей является поддержание ее высоких эксплуатационных свойств и регенерация асфальтобетонов в различных ее вариантах.

Именно регенерация была в центре внимания двух последних Конгрессов «Евроасфальт – Евробитум» в г. Стамбуле (2012) и г. Праге (2016). На них обсуждались вопросы омоложения асфальтобетонов, качества пластификаторов, применение биодобавок растительного происхождения, модифицированной резиновой крошки, очищенных отработанных масел, применение для этих целей эмульсий и вспененных битумов. Особое внимание уделено производству и использованию смесителей двумя сушильными барабанами, с целью устранения перегрева новых добавляемых смесей и уменьшение вопросов CO₂ в атмосферу.

9. РАЗНОВИДНОСТИ СМЕСЕЙ И БЕТОНОВ НА БИТУМНЫХ ВЯЖУЩИХ

По технологическим признакам, составу и применяемому битумному вяжущему асфальтобетоны подразделяются на множество разновидностей, классическими из них являются литые, горячие и холодные асфальтобетонные смеси. Принципиальные их отличия относятся к технологии укладки и уплотнения в покрытии. В то же время технология приготовления этих смесей практически одинакова. Она состоит в перемешивании нагретых до определенных температур каменных материалов и битумных вяжущих. Горячие асфальтобетонные смеси выгружают в транспортные средства, доставляют к месту укладки, выгружают в асфальтоукладчик, распределяют по нижнему слою и уплотняют. По мере уплотнения асфальтобетонная смесь становится асфальтобетоном, а после остывания до температуры окружающего воздуха – асфальтобетонным покрытием.

Холодные асфальтобетонные смеси приготавливают при повышенных, но существенно меньших, чем принятых для горячих асфальтобетонных смесей, температурах, затем их охлаждают, хранят длительное время на складах и расходуют по мере производственной необходимости. Таким образом, смеси транспортируют к месту укладки, укладывают и уплотняют при температуре окружающего воздуха. Свойства асфальтобетона в покрытии формируются в течение определенного промежутка времени.

Литые асфальтобетонные смеси, как и две предыдущие, приготавливают в горячем состоянии. Температура нагрева каменных материалов и вяжущих в этом случае гораздо выше, чем в случае горячих асфальтобетонных смесей. После их доставки к месту укладки специальными *асфальтовозами* их распределяют (разливают) по поверхности нижнего слоя, выравнивают (выглаживают) специальными приспособлениями. Выложенная в слой смесь остывает и сразу после этого становится асфальтобетонным покрытием.

Для того чтобы получить технологически различающиеся асфальтобетонные смеси, в них используют различные по свойствам вяжущие, что сказывается на свойствах асфальтобетона, асфальтобетонных покрытий и влиянии этих технологий на окружающую среду. Необходимость в таких разновидностях асфальтобетонов обусловлена конструктивными особенностями дорожной одежды, техноло-

гией и условиями устройства покрытий, экологической и энергетической целесообразностью.

9.1. Холодные асфальтобетонные смеси и асфальтобетон

Холодные асфальтобетонные смеси – это смеси, включающие в себя жидкие битумы марок СГ 70/130, СГ 130/200 и МГ (МГО) 70/130, МГ (МГО) 130/200, перемешанные при температуре от 80 °С до 110 °С (см. часть 1, раздел 7.2) и способные храниться длительное (4–8 месяцев) в штабелях, оставаясь рыхлыми. Эти смеси укладывают в слои дорожных одежд при температуре окружающего воздуха весной больше 5 °С, а осенью больше 10 °С, что связано с условиями формирования структуры и свойств асфальтобетона в процессе эксплуатации, более благоприятными весной и менее – осенью. Холодные смеси и асфальтобетоны применяют в районах с теплым и преимущественно сухим климатом для устройства слоев дорожных одежд низких (III и IV) категорий, а также для их ремонта, выравнивания поверхности под укладку верхнего слоя.

Принципиальной особенностью холодных асфальтобетонных смесей является их способность оставаться в рыхлом состоянии, что обеспечивает возможность их загрузки в транспортные средства, укладки и распределения ровным слоем в процессе применения. Эта способность оценивается по показателю *слеживаемости*. Показатель слеживаемости определяют числом ударов груза массой по конусу (рис. 9.1), погруженному в отверстие цилиндрического образца, после которых последний разрушается на части. Чем меньше число ударов (стандартом допускается не более 10), тем меньше слеживаемость и тем более удобообрабатываема смесь. Давление, под которым уплотняется образец, предназначенный для испытания на слеживаемость, в некоторой мере соответствует давлению, которому подвергается смесь (ее нижние слои) при хранении в штабелях.

В странах ЕС для характеристики этого технологического свойства используется прибор, имитирующий отвал грейдера, которым смесь распределяется по нижележащему слою. Показателем слеживаемости является сопротивление, которое смесь оказывает перемещению микроотвала (рис. 9.2).

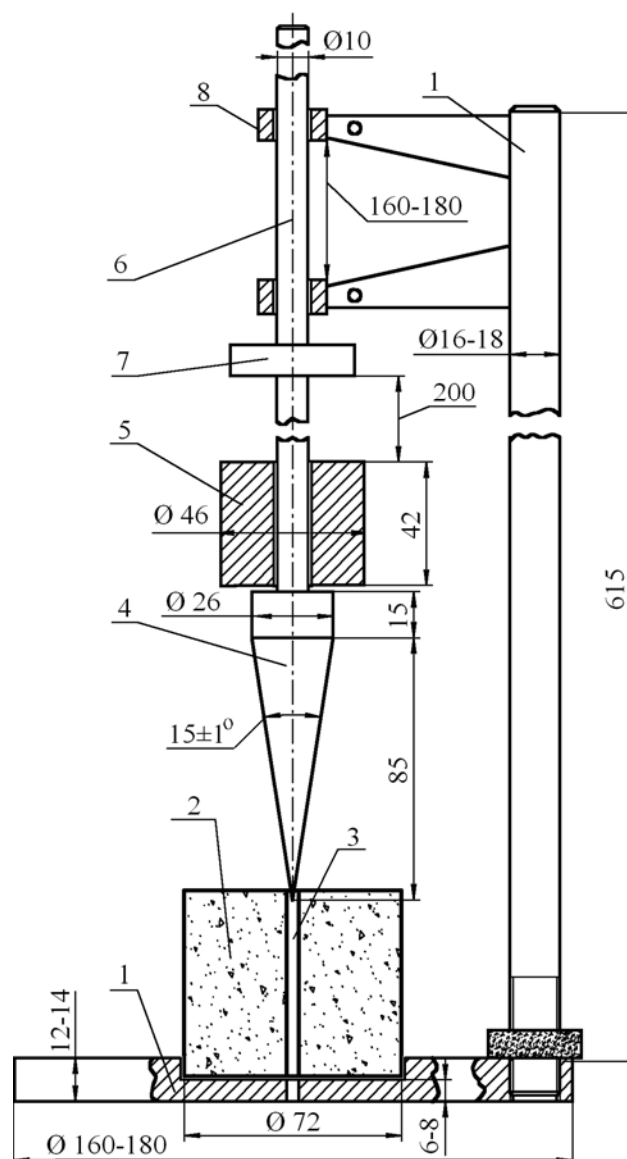


Рис. 9.1. Определение слеживаемости холодной асфальтобетонной смеси: 1 – подставка для образца; 2 – образец; 3 – отверстие образца; 4 – конусный наконечник; 5 – цилиндрический груз; 6 – штанга; 7 – упорное кольцо; 8 – направляющая втулка

Обеспечение нужного уровня удобообрабатываемости смеси достигается прежде всего использованием маловязких битумов классов СГ и МГ (МГО), которые при температуре, близкой $20\text{ }^{\circ}\text{C}$, характеризуются очень низкой когезией и вязкостью. Так, когезия вязких битумов с пенетрацией от $40 \times 0,1\text{ мм}$ до $200 \times 0,1\text{ мм}$ изменяется от $0,25\text{ МПа}$ до $0,05\text{ МПа}$, т.е. в 5 раз, а когезия жидких битумов с условной вязкостью S_{60}^5 от 60 с до 163 с изменяется от $2 \times 10^{-5}\text{ МПа}$ до $1 \times 10^{-3}\text{ МПа}$, т.е. в 50 раз. Температура, отвечающая $0,5\text{ Па} \times \text{с}$, необходимая для хорошего покрытия жидкими битумами минеральных составляющих асфальтобетонной смеси, находится в

пределах 70 – 80 °С, т.е. она на 70 °С ниже, чем битума марки БНД 40/60, и на 50 °С ниже, чем битума марки БНД 130/200.



Рис. 9.2. Определение слеживаемости холодной асфальтобетонной смеси по методу фирмы «Nynas»

Низкая когезия битума в пленках, разделяющих минеральные зерна смеси, является приоритетным фактором обеспечения пониженного значения показателя слеживаемости. Однако этого оказывается недостаточно. Оптимальное содержание битума в асфальтобетоне, определяемое по максимальному значению прочности, обеспечивается при толщинах пленок, способных к самослипанию (аутогезии). Эта способность называется аутогезией, в отличие от адгезии, которая характеризует прилипание (сцепление) битума к поверхности каменного материала. Чтобы предупредить аутогезию, необходимо уменьшить толщину битумной пленки, что сопровождается ее упрочнением и снижением способности к аутогезии.

Понизить слеживаемость холодных асфальтобетонных смесей также можно технологическими приемами: резким водным охлаждением после перемешивания смеси; обработкой поверхности перемешанной смеси водными растворами антиаутогезионных добавок (например, водными растворами FeCl_3 , известковым молоком, растворами мыл, эмульсиями); снижением высоты штабеля (менее 2 м), в котором хранится смесь; периодическим ее перелопачиванием (рис. 9.3).

Использование в холодных смесях маловязких (низкокогезионных) битумов приводит к тому, что на первой стадии своего жизненного цикла в покрытии асфальтобетон является малопрочным. Он набирает прочность во времени по мере испарения из жидкого битума разжижителя или легколетучих масел битума (в случае МГО).



Рис. 9.3. Хранение холодной асфальтобетонной смеси в герметичной упаковке на складе

Время набора прочности тем меньше, чем меньше вязкость битума и, главное, чем более летуч используемый для получения жидкого битума разжижитель. Следовательно, асфальтобетоны на среднегустеющем битуме упрочняются быстрее, чем на медленногустеющем. Именно низкая прочность асфальтобетона из-за применения в нем жидкого битума является причиной его применения на слабонагруженных (по интенсивности движения и нагрузке) дорогах низких категорий.

Таким образом, существует противоречие между проявлением влияния некоторых факторов на смесь и на асфальтобетон. Факторы, способствующие уменьшению слеживаемости (маловязкие битумы, пониженное их содержание), ухудшают технические свойства холодного асфальтобетона: уменьшают его прочность, водостойчивость из-за низкой адгезии таких битумов и слабой пленки на поверхности минеральных зерен. Оба эти фактора приводят к повышению остаточной пористости асфальтобетона и его водонасыщению (табл. 9.1). Кроме того, уменьшение содержания битума для достижения максимально равномерного обволакивания тонкой пленкой поверхности каменных материалов требует большего времени перемешивания смеси. Достоинством холодных асфальтобетонных смесей является возможность транспортировки на большие расстояния. Этому способствует использование для приготовления смесей медленногустеющих битумов класса МГ, испарение легких фракций из которых происходит гораздо медленнее, чем из разжиженных битумов класса СГ (часть I, рис. 7.11).

Гранулометрические составы минеральной части асфальтобетонных смесей типов Б, В, Г и Д близки к принятым для горячих смесей. В них допускается несколько большее (2–4 %) содержание зерен минерального порошка мельче 0,071 мм. Для холодных смесей не рекомендуется использование составов типа А, поскольку они не позволяют обеспечивать необходимую прочность и водостойкость.

Особенности жидких битумов, заключающиеся в изменении их состава и свойств во времени, привели к необходимости ввести дополнительные требования к прочности и водостойкости после прогрева образцов асфальтобетона при температуре 90 °С в течение 2 часов. Предполагается, что результаты этих испытаний позволяют предсказать улучшение свойств асфальтобетона во времени, после завершения процесса формирования свойств входящего в него жидкого битума.

Качество холодных асфальтобетонов определяется по традиционным показателям, нормируемым для горячих смесей. Из требований, представленных в табл. 9.1, и длительного опыта производственного применения холодных асфальтобетонов следует, что они более пористы и имеют большее водонасыщение, чем асфальтобетоны из горячих смесей, из-за меньшего содержания в них менее когезионно прочного битума (по причине их меньшей вязкости и снижения расхода битума из условия предупреждения слеживаемости смесей); менее прочны при 20 °С, и 50 °С, (по тем же причинам); менее водостойки из-за низкого сцепления в водной среде жидкого битума с поверхностью каменных материалов и меньшего, чем оптимальное, его содержания, что приводит к выкрашиванию и шелушению покрытий, а также образованию на них выбоин.

Достоинствами холодных асфальтобетонных смесей является их способность храниться длительное время на складах, что обеспечивает возможность использования их в любое время, в пределах допускаемых температур окружающего воздуха и на больших удалениях от АБЗ. Холодные асфальтобетоны более трещиностойки в зимнее время года из-за низкой температуры хрупкости входящих в них жидких битумов (около минус 20–30 °С). Холодные асфальтобетонные смеси менее энергоемки (табл. 9.2), чем горячие (расход топлива для их приготовления в 1,3 раза меньше), и менее экологически опасны (выбросов в атмосферу CO₂ в 1,4 раза меньше).

**Требования к физико-механическим свойствам асфальтобетона
из холодной смеси (извлечение из ДСТУ Б В.2.7-119)**

Наименование показателей качества для асфальтобетонов разных типов	Норма для асфальтобетонов марок	
	I	II
Пористость минерального остова, % по объему, не больше, для асфальтобетонов типа		
Б	18	18
В	20	20
Г	21	–
Д	–	21
Остаточная пористость, % по объему, асфальтобетонов всех типов	6–10	6–10
Водонасыщение до прогрева, % по объему, не больше	9	9
Набухание, % по объему, не больше	1,2	2,0
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 20 °С, до прогрева не меньше, % для асфальтобетонов		
Б, В	1,5	1,3
Г	1,7	–
Д	–	1,2
После прогрева:		
Б, В	1,8	1,6
Г	2,0	–
Д	–	1,5
Коэффициент водостойкости до прогрева, не меньше	0,85	0,75
Коэффициент водоустойчивости после прогрева, не меньше	0,90	0,85
Коэффициент долговременной водоустойчивости до прогрева, не меньше	0,70	0,60
Коэффициент долговременной водоустойчивости после прогрева, не меньше	0,85	0,75

Улучшение качества холодного асфальтобетона возможно за счет повышения вязкости при обеспечении специальными физико-химическими способами необходимого уровня слеживаемости применяемых битумов; увеличения содержания в смесях минерального порошка (особенно активированного) и применения поверхностно-активных веществ (ПАВ), которые позволяют снизить температуру смеси (нагрева каменных материалов и битума на 10–15 °С); использования щебня из карбонатных горных пород.

Таблица 9.2

**Нагрев составляющих при производстве и уплотнении
холодных асфальтобетонных смесей (извлечение из ДСТУ Б В.27-119)**

Марка и класс битума	Температура, °С			
	битума, подаваемого в смеситель	минеральных материалов на выходе из сушильного барабана	асфальтобетонной смеси при выгрузке из мешалки	в начале уплотнения
МГ 130/200 МГО 130/200	90–110	125–145	100–120	ниже 90 °С до температуры окружающего воздуха
СГ 130/200	80–105	115–140	90–115	– // –
МГ 70/130 МГО 70/130	80–90	115–125	90–100	– // –
СГ 70/130	75–90	110–125	85–100	– // –

9.2. Холодные асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны на битумных эмульсиях

Асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны, в которых в качестве вяжущего использованы битумные или битумо-полимерные эмульсии, являются материалами,готавливаемыми по полной холодной технологии. В отличие от классических холодных асфальтобетонных смесей смешение минеральных составляющих с эмульсионным вяжущим осуществляют при температуре окружающего воздуха, смесь транспортируют к месту укладки и уплотняют.

Такая холодная технология возможна из-за того, что даже самые вязкие битумные эмульсии более текучи при температуре 20 °С, чем самые маловязкие жидкие битумы при температуре 60 °С. Условную вязкость эмульсий определяют по времени истечения такого, как и в случае жидких битумов, объема – 50 см³. Но диаметр отверстия вискозиметра, используемого в случае эмульсий, равен 3 мм или 4 мм. Время истечения (условная вязкость) жидкого битума не может быть меньше 40 с, а эмульсии (при меньшем диаметре отверстия (4 мм)) должно быть не больше 20 с. При одинаковых диаметрах отверстия различие в вязкости становится еще большим.

Таким образом, качественное смешение эмульсии с минеральными материалами осуществляется без осложнений (оно длится около 30 с). Эмульсионные асфальтобетонные смеси приготавливают в мешалках принудительного действия, в которых нет нагревательных и пылеулавливающих систем. Благодаря этому эмульсионная технология асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов является наиболее экологически чистой (практическое отсутствие пыли и CO_2) и энергетически наиболее выгодной.

В то же время другие технологические стадии применения таких смесей вызывают необходимость абсолютного строгого выполнения требуемых технологических параметров. Это связано с тем, что эмульсии являются неоднородными (негомогенными) системами, поскольку состоят из полярной воды и неполярного битума, и склонны к расслоению в процессе хранения, транспортировки, а после объединения с каменными материалами к распаду, т.е. отделению воды от битума. Если распад протекает очень быстро, то смесь может потерять свою удобоукладываемость на стадии ее транспортировки к месту укладки, в процессе укладки или до завершения процесса уплотнения. Это приведет к невозможности получения качественного асфальтобетонного слоя. Если же эмульсия медленно распадается, то удлиняется срок набора прочности и плотности асфальтобетона. Такие особенности эмульсионных технологий могут усиливаться составом асфальтобетонных смесей, например, повышенным содержанием минерального порошка, способствующего из-за своей большой удельной поверхности ускорению распада, и температурой окружающего воздуха. Рекомендуемая температура укладки эмульсионных смесей – не ниже 10 °С. Кроме того, асфальтобетон на эмульсиях должен обладать достаточно высокой остаточной пористостью, чтобы обеспечить условия испарения выделившейся из эмульсии воды.

Асфальтобетонные эмульсионные смеси можно хранить в штабелях, как обычные холодные смеси, в течение 2–7 суток, а в герметичной упаковке – 3–6 месяцев. Высота штабеля не должна превышать 2 м, чтобы обеспечить условия «вызревания» смеси. В летний период смесь может храниться на открытых площадках, а в осенне–зимний – в закрытых складах или в штабелях под навесом. Способность к хранению регулируется содержанием эмульгатора в эмульсии, рН водного раствора эмульгатора, дисперсностью капель битума, вязкостью использованного битума. В этом отношении пред-

почтительны битумы марок БНД 130/200. В то же время повышение пенетрации битума приводит к ухудшению физико-механических свойств асфальтобетона.

Состав эмульсионных смесей обычно включает 30–60 % щебня с размером зерен 10–15 мм, меньше 10 % минерального порошка и 4,5–6 % битума. Они могут быть песчаными. По физико-механическим свойствам эмульсионные асфальтобетоны уступают горячим: их прочность при 20 °С должна быть не ниже 1,2–1,5 МПа, тогда как асфальтобетонов из горячих смесей – не менее 2,6 МПа, а из холодных смесей до их прогрева – не меньше 1,5 МПа; водонасыщение не выше 5 %; коэффициент длительной водоустойчивости не ниже 0,7, тогда как у асфальтобетонов из горячих смесей для нижних слоев не ниже 0,8, а асфальтобетонов из холодных смесей (до прогрева) – не ниже 0,7. Такой уровень показателей физико-механических свойств определяет область применения эмульсионных смесей. Обычно это ремонт черных слоев дорожных одежд и устройство слоев покрытия на дорогах низких категорий.

В странах ЕС, особенно в западноевропейских, для устройства верхних слоев покрытия в качестве холодных асфальтобетонов используют нескладируемые или складируемые на короткий промежуток времени смеси на чисто битумных или битумополимерных эмульсиях.

Этот асфальтобетон имеет ряд отличий от асфальтобетона из горячих смесей. Из-за преимущественного распада эмульсии на зернах минерального порошка смешение составляющих должно быть интенсивным, чтобы предупредить сегрегацию, создать гомогенную пленку вяжущего и обеспечить требуемые механические свойства. Смесь должна обладать хорошей удобоукладываемостью для обеспечения ее распределения в покрытие равномерным слоем и качественного уплотнения. Это обеспечивается за счет контроля содержания воды и скорости распада. Асфальтобетон на эмульсии медленно набирает свойства, в то же время он должен быть достаточно прочным, чтобы обеспечить минимальные сроки открытия движения.

Для приготовления смесей применяют высокопрочный, труднополимируемый щебень крупностью до 14 мм. Содержание в смеси битума (марок 50/70–70/100) обычно на 0,2–0,3 % ниже, чем в горячих смесях. Толщина верхнего слоя покрытия из таких смесей

принимается равной 3–5 см. Укладку смесей при температуре выше 10 °С производят асфальтоукладчиком, а уплотнение в случае тонких слоев – гладко-барабанными виброкатками и звеном из пневмокатка и гладко-барабанного виброкатка в случае слоев толщиной 5 см. Движение открывают сразу после укатки, предварительно распределив по поверхности слоя асфальтобетона тонкий слой песка. Поверхность слоя из такого асфальтобетона обладает хорошим сцеплением с колесом автомобиля. Он применяется для дорог под легкое и среднее движение.

9.3. Литые асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны

Литые асфальтобетонные смеси – это смеси, обладающие способностью самоуплотняться без использования уплотняющих средств. После охлаждения при температуре окружающего воздуха они становятся монолитным асфальтобетоном. В истории дорожных битумных технологий литой асфальтобетон является первым, который использован для устройства тротуаров и покрытий проезжей части городских улиц. Это относится к эпохе, предшествующей получению искусственных битумов и механизированного уплотнения асфальтобетонных смесей (Часть 1, раздел 1). Простейшие технологии производства асфальтобетонных смесей сводились к смешению разогретого природного битума (асфальта) или асфальта, содержащего минеральную часть, и пластификатора (природного масла) с природным песком и гравием.

Современные литые асфальтобетонные смеси имеют специальные составы и включают такие составляющие, которые позволяют при соответствующей технологии распределять их по нижнему слою, выравнивать и после остывания получать ровную поверхность и прочный верхний слой покрытия (рис. 9.4).

Литые асфальтобетоны применяют для устройства тротуаров, верхних слоев покрытий городских и магистральных дорог, искусственных сооружений (мосты), участков покрытий, расположенных в труднодоступных для уплотняющих средств местах (тоннели), для ремонта покрытий.



Рис. 9.4. Укладка литой асфальтобетонной смеси

Способность литых асфальтобетонных смесей самоуплотняться обеспечивается, прежде всего, повышенным содержанием в них минерального порошка (до 25 % зерен мельче 0,071 мм) и битума (до 8–10 %), т.е. большим содержанием асфальтовяжущего вещества. При этом отношение в них зерен порошка мельче 0,071 мм к битуму (МП/Б) составляет около 2,7. Поскольку в литой асфальтобетонной смеси такого асфальтовяжущего больше 30 % по массе, а в обычной горячей асфальтобетонной смеси его около 15 %, то литая смесь также становится текучей, подобно мастике. Однако это технологическое достоинство оборачивается недостатком при работе покрытия из такой смеси при высоких летних температурах, достигающих 50–60 °С. На покрытии могут формироваться пластические деформации, волны, наплывы, гребенка, колеи. Чтобы исключить этот недостаток, в литых асфальтобетонах используют высоковязкие битумы с пенетрацией от 20 до $50 \times 0,1$ мм, а также битумы, модифицированные полимерами и другими добавками.

Битумы с таким диапазоном пенетрации достигают необходимой для обеспечения качественного перемешивания смесей вязкости (не более $0,5 \text{ Па} \times \text{с}$) при очень высоких температурах до 220 °С. Необходимость производить смешение асфальтобетонных смесей при высоких температурах и большое содержание в них асфальтовяжущего вещества обуславливает первую технологическую особен-

ность, заключающуюся в обязательности высокотемпературного режима перемешивания минеральной составляющей с вяжущим. Это сопровождается большим расходом энергоресурсов.

Кроме того, большое содержание асфальтовяжущего вещества затрудняет процесс перемешивания, и его необходимо производить в течение нескольких минут (около 3–5 мин), что понижает производительность смесительных установок, а также приводит к существенным энергозатратам.

Большое содержание битума и асфальтовяжущего вещества может привести к сегрегации (расслоению) смеси в процессе ее транспортировки и укладки. В связи с этим для перевозки литых асфальтобетонных смесей используют транспортные средства, снабженные мешалками и термостатами для предупреждения потери температуры и удобоукладываемости смеси.

В отличие от обычных асфальтобетонных смесей, для приготовления которых используют, как правило, холодный минеральный порошок, в случае литых смесей для предупреждения стекания битума с зерен каменных материалов целесообразно его нагревать, что усложняет технологию, повышает энергозатраты, приводит к необходимости соблюдения особого режима пылеулавливания. При соблюдении всех особенностей состава и технологии приготовления смесей к месту укладки можно доставить мастикообразную смесь, растекающуюся по заранее подготовленному нижнему асфальтобетонному слою.

В процессе укладки литых асфальтобетонных смесей на увлажненный нижний слой на поверхности асфальтобетона могут образовываться воздушные пузырьки, которые необходимо механически устранять.

Из литых смесей формируется гладкая и скользкая поверхность, что ухудшает безопасность движения из-за низкого сцепления колеса автомобиля с покрытием. Для устранения этого недостатка в слой литого асфальтобетона утапливают черный, обработанный битумом щебень или рифлят его специальными катками, цилиндры которых имеют рифленую поверхность.

Для оценки качества литого асфальтобетона используют как стандартные так и специальные показатели свойств. Специальным испытанием является определение глубины вдавливания штампа в квадратный (с размерами сторон $100 \times 100 \times 50$ мм) или цилиндрический образец (диаметром 100 мм и высотой 50 мм). На метал-

лический штамп диаметром 2,52 см (площадь 5 см²) передается нагрузка, равная 52,5 кг, которая удерживается в течение 30 мин при температуре 40 °С. Для предупреждения развития на покрытии пластических деформаций глубина погружения штампа должна быть в пределах 1–3,5 мм. Ее нормативное значение зависит от области их применения.

Литой асфальтобетон отличается высокой плотностью. Его остаточная пористость не превышает 1,5 %, водонасыщение 1 % по объему, прочность на сжатие при 50 °С должна быть не меньше 0,8 МПа, что существенно меньше, чем норма для обычного горячего асфальтобетона (более 1,1–1,2 МПа). Это связано с тем, что содержание в литом асфальтобетоне битума больше оптимального, определяемого по максимуму прочности асфальтобетона (рис. 9.5). Такое количество битума почти полностью заполняет поры (их до 20 %) минерального остова.

Минеральная часть литых асфальтобетонных смесей, применяемых в Украине, отличается большим содержанием зерен щебня и минерального порошка (табл. 9.3).

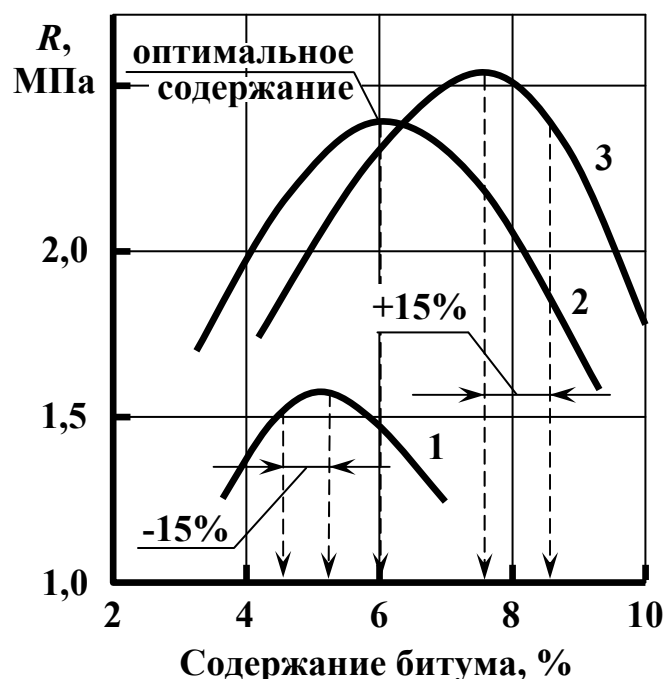


Рис. 9.5. Зависимость прочности при 20 °С холодного (1), горячего (2) и литого (3) асфальтобетона от содержания битума

Достоинствами литых асфальтобетонов являются их низкая водопроницаемость, высокая водостойкость, устойчивость к старе-

нию, износостойкость, повышенная усталостная прочность и долговечность. Именно благодаря этому литой асфальтобетон долгие годы был ведущим материалом покрытий нежестких дорожных одежд высших категорий в ФРГ. Однако их подверженность пластическим деформациям в жаркое время года под всевозрастающим по нагрузке и интенсивности транспортным воздействием, приводящим к развитию колейности, заставила дорожников этой страны отказаться от него в пользу щебеночно-мастичных смесей. Необходимость использования в литом асфальтобетоне высоковязкого битума может приводить к образованию температурных трещин в зимнее время года в районах с холодным климатом. Кроме того, литые асфальтобетоны требуют большого расхода дорогостоящего битума и минерального порошка, больших энергетических затрат, что сопровождается самым большим по сравнению с другими асфальтобетонными покрытиями выбросом в атмосферу парниковых газов.

Литые асфальтобетоны, рекомендуемые к применению в Украине, должны отвечать требованиям, приведенным в табл. 9.4.

Таблица 9.3

**Гранулометрические составы минеральной части литых смесей
(Извлечение из СОУ 42.1-37641918:2013)**

Вид смеси по крупности, мм	Содержание зерен, %, на ситах с размером отверстий, мм									
	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071	<0,071
15	0-10	5-25	40-55	45-66	50-70	57-72	63-80	70-84	74-85	15-26
10		0-20	35-50	42-62	52-68	59-73	65-78	70-84	74-85	15-26
песчаная			0-10	10-25	33-50	55-71	68-77	75-82	77-85	15-23

Таблица 9.4

**Требования к физико-механическим свойствам литых
асфальтобетонов на основе битумных вяжущих
с пенетрацией (40-60)×0,1 мм (Извлечение из СОУ 42.13764918)**

Наименование показателей	Значение показателя
1	2
Пористость минерального остова, % по объему, менее	20
Остаточная пористость, % по объему, менее	2,0
Водонасыщение, % по объему, менее	0,5
Предел прочности при температуре, 0 °С, МПа, в пределах	2,5–6,5
Глубина вдавливания штампа при температуре 40 °С после 30 мин нагружения, мм, менее	1,0–3,5

1	2
Прирост глубины вдавливания штампа при температуре 40 °С после 30 мин нагружения, менее	0,5
Глубина колеи после 3×10^4 проходов колеса с нагрузкой 57,5 кН при температуре 50 °С, мм, менее	4
Отношение содержания зерен минерального порошка размером менее 0,071 мм к массе битума (МП/Б) в пределах	2,38–3,20

Испытанный в ХНАДУ венгерский литой асфальтобетон крупностью 10 мм с содержанием щебня 50 %, смеси природного и искусственного песка – 27 %, минерального порошка 23 % и битума 35/50 ($P_{25} = 43 \times 0,1$ мм, $T_p = 54$ °С, растяжимость при 25 °С – 62 см, температура хрупкости минус 10 °С) имел водонасыщение по объему – 0,4 %, объемную массу – 2470 кг/см³, набухание – 0,05 %, прочность на сжатие при 20 °С – 4,8 МПа. Модули упругости при частоте 0,5 Гц и температуре минус 20 °С, 0 °С, 20 °С, 40 °С соответственно равнялись $15,8 \times 10^3$ МПа, $12,6 \times 10^3$ МПа, $7,9 \times 10^3$ МПа, $2,0 \times 10^3$ МПа, $0,5 \times 10^3$ МПа, температура механического стеклования – минус 5 °С. Для аналогичного асфальтобетона типа Б на битуме БНД 40/60 при тех же условиях испытания модуль упругости равнялся: $7,8 \times 10^3$ МПа, $3,9 \times 10^3$ МПа, $1,2 \times 10^3$ МПа и $0,32 \times 10^3$ МПа. Температура механического стеклования – минус 12 °С.

Соотношение между свойствами горячих, холодных и литых асфальтобетонов иллюстрируют зависимости, представленные на рис. 9.5. Прежде всего очевидно, что оптимальное содержание битума в асфальтобетоне, при котором прочность максимальна, повышается с ростом его вязкости (снижением пенетрации). Наименьшее содержание отвечает холодному асфальтобетону на жидком битуме, а наибольшее – литому асфальтобетону. При этом соотношение показателя прочности холодного и горячего асфальтобетона достигает 1,6 раза, что хорошо согласуется с соотношением когезии вязких и жидких битумов. Различие в прочности горячего и литого асфальтобетона невелико (около 1,2 раза), поскольку различие когезии и пенетрации, применяемых в них битумов, незначительно.

Однако эти соотношения касаются оптимальных содержаний, отвечающих максимальной прочности, тогда как на практике лишь для горячих асфальтобетонов оптимальное содержание прочности является технологически приемлемым. В отношении холодных и ли-

тых асфальтобетонов рекомендуемое содержание битума на 10–15 % отличается от оптимального. В случае холодного асфальтобетона оно снижается из-за необходимости уменьшить слеживаемость смесей. А в случае литого асфальтобетона оно увеличивается в связи с необходимостью повысить текучесть смеси. В обоих случаях прочность снижается, но если для литого асфальтобетона это понижение компенсируется повышенной вязкостью (когезией битума), то для холодного асфальтобетона это сопровождается некомпенсируемым снижением и без того низкой прочности.

Соответственно водостойкость литого асфальтобетона повышается, а холодного – резко снижается, что выражается в интенсивном разрушении устроенного из него покрытия в виде шелушения, выкрашивания и выбоинообразования. Превышение содержания битума против оптимального сопровождается падением прочности литого асфальтобетона, особенно при 50 °С, что способствует формированию на покрытии пластических деформаций (волн, колеи, наплывов). Эти взаимосвязи между содержанием битума и физико-механическими свойствами трех разновидностей асфальтобетона приводят к заключению, что наиболее приемлемыми (оптимальными) для устройства асфальтобетонных покрытий являются горячие асфальтобетоны.

9.4. Литые асфальтобетоны, применяемые за рубежом

Литой асфальтобетон во Франции применяют для устройства пешеходных дорожек, покрытий под движение легковых автомобилей, для дорог с пониженной интенсивностью движения и стоянок, для покрытий под тяжелое движение.

В основу получения литых асфальтобетонов во Франции положено соотношение между количеством в смеси асфальтовяжущего вещества и минеральных составляющих, при котором обеспечивается текучесть смеси, водонепроницаемость покрытия и его сопротивление износу.

Кроме того, литой асфальтобетон, согласно французским требованиям, должен обладать еще рядом свойств: достаточной упругостью, чтобы сопротивляться динамическим транспортным воздействиям; деформативностью, чтобы выдерживать усадочные деформации и

предупреждать трещинообразование; способностью к релаксации напряжений, чтобы он мог адаптироваться к изменению температуры; устойчивостью к действию циклических нагрузжений, чтобы предотвратить усталостное разрушение; устойчивостью к старению; достаточной шероховатостью поверхности за счет подбора скелетной (минеральной) части или специальной ее обработки.

Литые асфальтобетонные смеси должны быть технологичными при ручной укладке, чтобы обеспечить возможность устраивать покрытие в местах, недоступных технологическому оборудованию (рис. 9.6). Кроме того, литой асфальтобетон может быть цветным за счет пигментации самого асфальтобетона или за счет специальной обработки поверхности втапливанием песка или более крупных частиц как природных, так и искусственных.



Рис. 9.6. Укладка литой асфальтобетонной смеси

Содержание вяжущего в литых асфальтобетонах назначают в зависимости от остаточной пористости минеральной части из расчета практически полного заполнения пор. Оно уточняется с учетом вида вяжущего, при этом отношение минерального порошка к битуму должно быть близким к 3. Принятое содержание вяжущего должно обеспечивать требуемую удобоукладываемость, уплотняемость смеси и сопротивление механическому воздействию, определяемое по вдавливанию пуансона в образец или покрытие. Значение показателя вдавливания нормируется в таком порядке: бетон, используемый для

тротуаров, – 2–8 мм; для покрытий дорог со слабым движением – 1–3 мм; для дорог с тяжелым движением – 0,5–1,5 мм.

Для тротуаров, игровых площадок, школьных дворов, садовых и парковых аллей, железнодорожных перронов, полов заводских цехов, междурельсового пространства трамвайных путей используют песчаный литой асфальтобетон с крупностью зерен 4–6 мм, содержанием битума марки 35/50 (пределы пенетрации) 8–10 %. Толщина укладываемого слоя должна быть в пределах 15–25 мм. Температура укладки – 190–240 °С. Горячая смесь разливается по подготовленной поверхности с положенной на нее крафт-бумагой. Движение открывается после остывания слоя.

Для дорожных покрытий под слабое движение и парковку укладывают литой асфальтобетон крупностью 6–10 мм с содержанием битума 25/35 или 35/50 (пределы пенетрации) в количестве 7–9 %. Толщина слоя принимается в пределах 25–30 мм, а температура укладки – 190–250 °С. Слой должен быть шероховатым и противоскользящим.

Литой асфальтобетон под тяжелое, сосредоточенное по одному следу движение автобусов и скоростных дорог укладывается асфальтоукладчиком слоем 25–40 мм при температуре 200–260 °С. Его крупность равна 10–14 мм, входящий в него битум в количестве 6,5–8,5 % может быть марок 25/35 или 35/50. В горячий слой втапливают обработанный битумом или чистый каменный материал. Для обеспечения морозостойкости он должен быть водонепроницаемым, и при этом иметь хорошую сдвигоустойчивость. В битумы для литого асфальтобетона допускается вводить измельченный природный асфальт в количестве до 6 % по массе. Укладка смесей в дождливую погоду запрещена.

В Германии литой асфальтобетон называют «гусасфальтом», или мастичным асфальтом. До разработки щебеночно-мастичных асфальтобетонов литой асфальтобетон был наиболее распространенным в Германии материалом для устройства верхних слоев покрытия городских дорог и даже автомагистралей. Литой асфальтобетон, применяемый в Германии, состоит из щебня, песка (природного и искусственного) и известнякового минерального порошка, принятых в таких количествах, чтобы остаточная пористость была очень низкой. Для этого в смеси с крупностью зерен 11 мм вводят 6,5–8,5 %

битума марки 20/30, а для смесей с крупностью зерен 5–8 мм – битум марки 50/70. При этом содержание зерен минерального порошка мельче 0,063 мм может быть в пределах 18–40 %, а зерен крупнее 2 мм 25–35 %.

Как правило, содержание окатанного песка в смеси ограничивается ввиду того, что такой песок уменьшает колеестойкость покрытия. В Германии для литого асфальтобетона практически не используют битумы, модифицированные полимерами, из-за необходимости обеспечения высоких технологических температур приготовления и укладки литых асфальтобетонных смесей на их основе.

Отношение минерального порошка к битуму в таких асфальтобетонах находится в пределах 3,4–4,0. Вдавливание штампа в кубический образец за 30 мин должно быть в пределах 1,0–5,0 мм.

Особенностью немецкой системы оценки качества литого асфальтобетона является то, что в них отсутствуют требования к его прочности. В то же время проводятся испытания по определению деформаций на сжатие при многократном нагружении, на колееобразование при 60 °С, по определению комплексного модуля упругости (он достигает 14×10^3 МПа при температуре 20 °С и частоте 20 Гц), по оценке усталостной прочности при изгибе, которая обычно очень высока ввиду большого содержания битума и отсутствия пор в асфальтобетоне.

Литые смеси приготавливают двумя способами: в мешалках большой емкости, в которых лопасти медленно вращаются со скоростью 2–12 об/мин в течение 4–6 часов или в быстрых мешалках, подобных тем, что используются для приготовления классических смесей, когда время смешения находится в пределах 1–2 мин. В обоих случаях смесь доставляют к месту укладки в оборудованных термостатом смесительных установках. Температура приготовления смесей близка к 250 °С. Минимально допустимая температура укладки равна 200 °С.

Распределение смесей по нижнему слою осуществляют установками, оборудованными выравнивающими скребками. Для устранения скользкости поверхности из литого асфальтобетона по ней распределяют горячий дробленый, предварительно обработанный битумом каменный материал с крупностью зерен 2–5 мм или 5–8 мм. Зерна этого материала вдавливают в слой с помощью катка, а его излишки выметают.

9.5. Литые холодные эмульсионно-битумные смеси на основе битумных или битумо-полимерных эмульсий

Такие смеси применяют во Франции, они могут быть песчаными с максимальной крупностью 6 мм и зернистыми крупностью до 10 мм. Они содержат мелкие песчаные зерна (0,08–0,2 мм), которые препятствуют расслоению смесей и позволяет регулировать скорость распада эмульсии. Кроме того, в них можно вводить цемент или гашеную известь в количестве не более 1–2 %, что повышает плотность и прочность асфальтобетона. Минеральную смесь предварительно увлажняют, чтобы предотвратить ее сегрегацию и улучшить ее смачиваемость эмульсией. Используемая для этого вода может содержать ПАВ.

Эмульсии, применяемые для холодных литых смесей, должны быть катионными, содержать полимерную добавку (1–4 %) и 60–65 % вязкого битума. Они должны быть стабильными в процессе приготовления смесей и их транспортировки и быстро распадаться после укладки. Наиболее применяемыми для эмульсий полимерами являются природные каучуковые латексы, СБС (стирол-бутадиен-стирол) или термопластичные полимеры типа ЭВА (этилен-винилацетат). Для направленного регулирования скорости распада эмульсии, особенно в летнее время, используют замедлители.

Предназначенную для устройства покрытия смесь изучают на стадии предварительных лабораторных исследований. Они включают оценку адгезионного взаимодействия эмульсии и принятых каменных материалов, удобоукладываемость смеси (по распылу конуса), скорость формирования когезионной прочности, чтобы предсказать сроки открытия движения (не позже 6–7 часов).

Для приготовления и укладки литых холодных эмульсионно-битумных смесей используют специальные машины (рис. 9.7), на которых смонтированы емкости для составляющих (минеральных материалов, воды, эмульсии, регуляторов распада, добавок ПАВ, цемента), дозаторы, смеситель червячного типа, разравниватель смеси (волокуша). Температура эмульсии обычно находится в пределах (30–60) °С. Каменные материалы предварительно увлажняются в смесителе. Приготовленную в машине смесь укладывают на выравненный нижний слой (не должно быть неровностей более 1 см).

Укладку смеси производят при температуре не ниже 7 °С в сухую погоду. В жаркое время нижний слой должен быть увлажнен. Движение открывают после распада эмульсии или по истечении 1 часа после распределения смеси. Перед открытием движения допускается доуплотнение. На взлетно-посадочных полосах аэродромов доуплотнение обязательно.

При оценке качества слоя из литой холодной смеси определяют шероховатость поверхности по методу песчаного пятна и коэффициент продольного сцепления с пневматиком при заданной скорости. Показатели физико-механических свойств слоев из литых холодных битумозэмульсионных смесей не нормируют. В то же время контролируют сопротивление развитию деформаций, сцепление с нижним слоем, сопротивление износу, шумопоглощение.

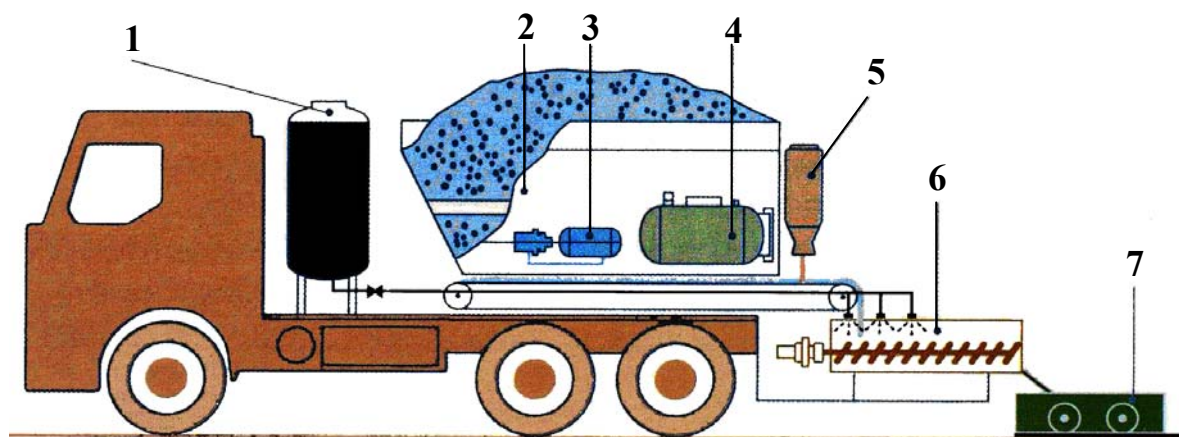


Рис. 9.7. Машина для приготовления и укладки литой холодной эмульсионно-битумной асфальтобетонной смеси (Франция): 1 – бак с битумной эмульсией; 2 – ёмкость с каменными материалами; 3 – водяной насос; 4 – ёмкость с добавками; 5 – ёмкость с цементом; 6 – смеситель; 7 – распределение смеси

Литые холодные битумозэмульсионные смеси используют для ухода на городских и сельских дорогах, автомагистралях, взлетно-посадочных полосах, для ремонта трещин, устройства покрытий крупных стоянок. Их применение не рекомендуется при интенсивности более 20000 автомобилей в сутки в одном направлении на слабых нижних слоях. При конструировании дорог слои из этих смесей в расчет не принимаются.

9.6. Асфальтобетоны из теплых асфальтобетонных смесей

Теплые асфальтобетонные смеси – это смеси традиционного состава, перемешивание и уплотнение которых осуществляют при пониженных температурах. Эта технологическая способность теплых асфальтобетонных смесей достигается применением битумов с пенетрацией более $130 \times 0,1$ мм либо введением в битум или в перемешиваемую смесь специальных органических или минеральных добавок.

Теплые асфальтобетонные смеси и бетон из них впервые разработаны в начале 60-х годов прошлого столетия на кафедре технологии дорожно-строительных материалов ХАДИ И.В. Королевым под руководством М.И. Волкова. Научная и практическая необходимость в таких смесях и асфальтобетонах была вызвана тем, что на огромной территории Советского Союза существовали регионы, которые по климатическим условиям были принципиально различны. На юге максимальная летняя температура достигала $45\text{--}48\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г. Ташкент, г. Ашхабад), на северо-востоке минимальная зимняя температура – минус $50\text{--}56\text{ }^{\circ}\text{C}$ (г. Тюмень, г. Красноярск). Соответственно в первых были низкими зимние температуры, а во вторых – летние температуры. Совершенно очевидно, что асфальтобетоны, применяемые в таких регионах, должны быть различными по технологическим и механическим свойствам. Теплые асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны были предназначены для районов с холодным климатом и коротким строительным сезоном. Применяемый в них маловязкий битум марок БНД 130/200 и БНД 200/300, а также жидкие битумы СГ 130/200 позволяли расширить сезон устройства покрытий из них до температуры минус $10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Температура перемешивания таких смесей отвечала диапазонам $110\text{--}130\text{ }^{\circ}\text{C}$ в случае битумов БНД 130/200 и БНД 200/300 и $80\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$ в случае жидкого битума СГ 130/200. Такие смеси можно было укладывать при температурах $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $70\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответственно. Одновременно решалась и задача обеспечения трещиноустойчивости асфальтобетонов на основе таких битумов, поскольку их температура хрупкости по сравнению с битумами для горячих смесей, существенно (на $10\text{--}20\text{ }^{\circ}\text{C}$) ниже.

Основным недостатком асфальтобетона из теплых смесей была низкая их прочность и сдвигоустойчивость при высоких температурах, поскольку их вязкость и когезия применяемых в них битумов даже при умеренной температуре (25 °С) в несколько раз ниже, чем наиболее вязкого битума марки БНД 40/60 (рис. 9.8). Необходимость отказа от применения теплых смесей в районах с жарким климатом была очевидной с самого начала их применения ввиду низкой сдвигоустойчивости и повышенного колееобразования на устраиваемых из них покрытиях. Такие асфальтобетоны не были включены в первый государственный стандарт Украины 2003 г. на асфальтобетоны, поскольку климатические условия работы асфальтобетонных покрытий в Украине существенно мягче, чем на северо-востоке России. До этого (в 2001 г.) из первого государственного стандарта Украины были исключены битумы марки БНД 200/300 как не обеспечивающие сопротивления асфальтобетонного покрытия колееобразованию летом. Понятие «теплый асфальтобетон» было исключено из государственного стандарта России в 1994 г. При этом российский стандарт сохранил возможность применения битумов марок БНД 130/200, БНД 200/300 и СГ 130/200 для приготовления асфальтобетонных смесей, применяемых в районах с особо холодным климатом.

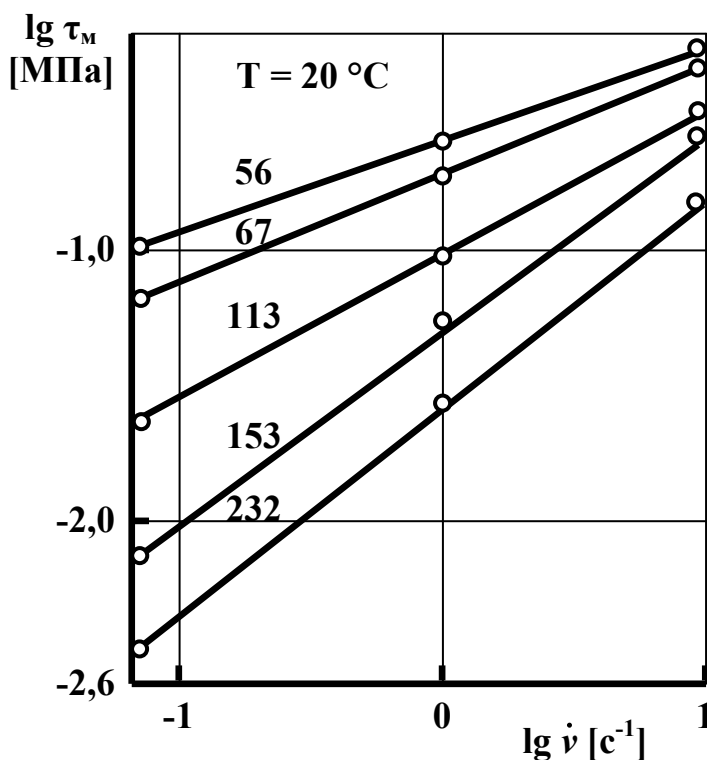


Рис. 9.8. Зависимость когезионной прочности (τ_m) битумов разных марок от скорости сдвига (ν). (Цифры у кривых – глубина проникания иглы при 25 °С в 0,1 мм)

Практически в это же время в битумных технологиях Западной Европы и США появляются не только термин, но и разнообразные «теплые» смеси. При этом необходимость разработки таких смесей была вызвана ухудшающейся экологической обстановкой во всем мире. Возрастающие объемы выпускаемой продукции и темпы развития промышленности сопровождались ростом энергозатрат (нефтепродукты, газ), что в свою очередь привело к выбросу в атмосферу различных газов, особенно CO_2 . Это сказывается на толщине «озонового» слоя и приводит к всемирному потеплению.

Учитывая это, международное сообщество столкнулось с необходимостью применения мероприятий по сокращению объемов потребляемых (невозобновляемых^{*}) ресурсов и уменьшению в технологических процессах углеродного следа. Эти обстоятельства и привели к расширению объемов регенерации асфальтобетонов, применению разнообразных холодных смесей (прежде всего эмульсионных) и разработке новых видов теплых смесей.

В соответствии с этим *современное понятие «теплые смеси»* и асфальтобетоны подразумевает такие из них, которые приготавливают и уплотняют при температурах существенно менее высоких, чем горячие смеси, и которые одновременно обеспечивают физико-механические свойства асфальтобетонов, не уступающие свойствам традиционных асфальтобетонов.

К исторически первым теплым смесям можно отнести смеси на вспененных битумах. Вспенивание битумов марок 60/90, 90/130 и осуществляют смешением в специальных аппаратах битума и 1–2 % воды, температура нагрева которых, соответственно, близка к 110 °С и 20 °С. Битум подается в мешалку в виде пены, которая хорошо покрывает естественно влажные каменные материалы, благодаря тому, что ее объем в 17 раз больше объема исходного битума. Полученные из таких смесей асфальтобетоны уступали асфальтобетонам из горячих смесей по физико-механическим свойствам.

Температура смеси на выходе снижается до 90–110 °С. Смесь можно транспортировать сразу к месту укладки или хранить в силосе – накопителе при этой температуре. После транспортирования смеси к месту укладки ее температура снижается до 70–80 °С. Считается, что использование этой технологии позволяет сэкономить около 30 %

^{*} Возобновляемые энергоресурсы – это энергия солнца, ветра, морских приливов и отливов, рек, подземных вод и др.

топлива и настолько же снизить выделение CO_2 (рис. 9.9). Хорошее уплотнение смесей при такой температуре обусловлено наличием в пленках битума воды в виде обратной эмульсии.

Усовершенствование этой технологии в Европе свелось к двухстадийному перемешиванию смеси в смесителе барабанного типа (рис. 9.10). Предварительно разогретые до температуры $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ щебень и песок подаются в смеситель и перемешиваются с 5 % битума, имеющего пенетрацию около $90\text{--}130 \times 0,1\text{ мм}$ при температуре $120\text{ }^{\circ}\text{C}$. Смесь перемещается по смесителю, затем в нее вводят около 2,5 % вспененного вязкого битума, после этого на заключительном этапе в нее вводят минеральный порошок.

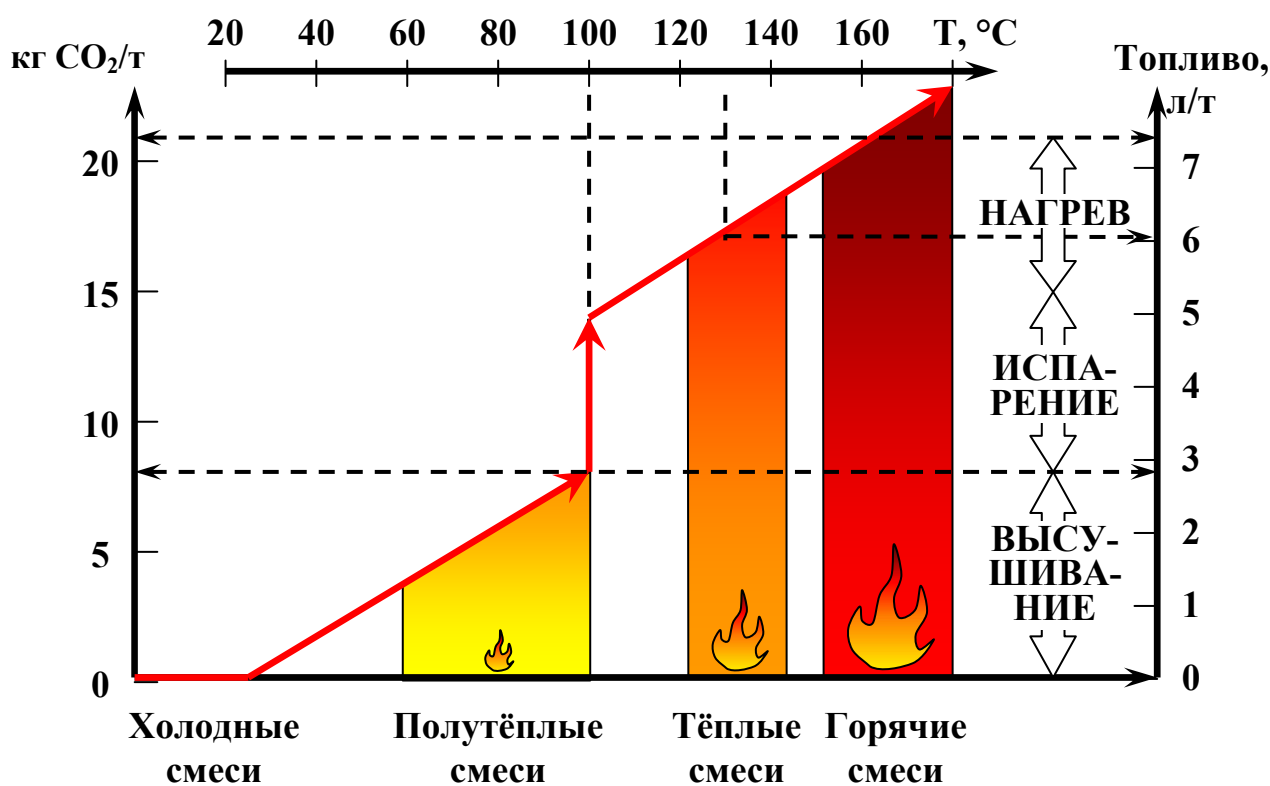


Рис. 9.9. Затраты топлива и выброс CO_2 при нагреве одной тонны влажных каменных материалов (по данным Ф. Оларда, Е. Бедюно, А. Ромие, Франция)

Положительное влияние воды в процессе перемешивания и уплотнения смесей также достигается введением в них *природного или искусственного материала* – *цеолита* – кристаллического алюмосиликата. Цеолит обладает высокой пористостью; поры крупностью в несколько микрон составляют в нем около 20 %. Цеолит активно поглощает воду при температуре окружающего воздуха и выделяет ее при повышенных ($85\text{--}100\text{ }^{\circ}\text{C}$) температурах. Добавку зерен цеолита

размером около 0,3 мм в количестве 0,3 % по массе вводят в смесь каменных материалов одновременно с битумом и перемешивают при температуре около 140 °С. Выделяющаяся из цеолита при смешении вода вспенивает битум, что облегчает его распределение на минеральных зернах и последующее уплотнение смесей. Асфальтобетон с цеолитовой добавкой по свойствам несколько уступает обычным асфальтобетонам. Это касается водостойкости и морозостойкости, что объясняется химическим (алюмосиликатным) составом цеолита и действием оставшейся в асфальтобетоне после уплотнения смеси воды. В то же время использование этой добавки позволяет снизить температуру смешения и уплотнения смеси, по сравнению с традиционными почти на 30 °С, а также уменьшить выделение в атмосферу вредных веществ в среднем на 20 %.

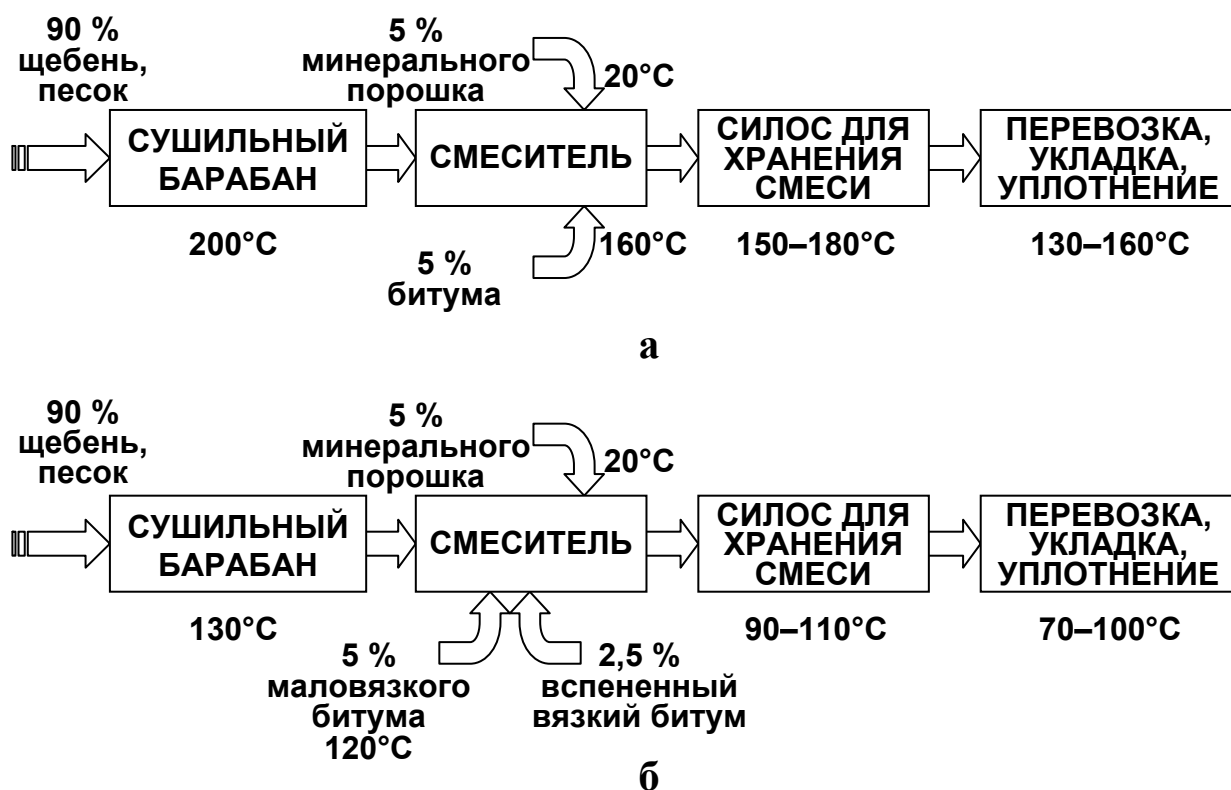


Рис. 9.10. Технологии приготовления горячей (а) и теплой (б) асфальтобетонной смеси (по данным Ф. Оларда)

Наиболее распространенные в настоящее время теплые смеси основываются на принципе направленного изменения свойств битума. Важнейшим из них является вязкость. В разделе 8 показано, что качественное перемешивание каменных материалов обеспечивается

битумом, вязкость которого должна быть близкой к $0,5 \text{ Па} \times \text{с}$ (в западноевропейских странах и США около $0,2 \text{ Па} \times \text{с}$). Битумные вяжущие разных марок достигают этого значения при различных температурах. Чем меньше пенетрация, тем более высокой должна быть эквивязкая температура, т.е. температура, отвечающая этой вязкости. В случае впервые используемых в Советском Союзе теплых смесей снижение эквивязкостной температуры достигалось использованием вязких битумов с пенетрацией, больше 130 мм, и даже жидких битумов с условной вязкостью $C_{60}^5 = 130 - 200 \text{ с}$. Но такой подход, как показано выше, не оправдал себя ввиду низкого качества получаемого асфальтобетона.

Для решения проблемы сохранения высоких показателей качества асфальтобетонов, получаемых при пониженных технологических температурах, необходимо изменить температурную зависимость вязкости таким образом, чтобы она при высоких технологических температурах была низкой, а при температуре окружающей среды – высокой.

В значительной мере это было достигнуто путем добавки в битум парафиновых восков. Эти воски при температуре окружающего воздуха твердообразны и гораздо тверже, чем для битумы марки БНД 40/60. С повышением температуры вязкость их резко падает, и после некоторой условной температуры плавления она становится меньше вязкости битума (рис. 5.7).

Таким образом, введение восков в битум приводит к тому, что при температурах, отвечающих работе битума в составе асфальтобетона в покрытии, они упрочняют битум, а при технологических температурах снижают его вязкость. Эквивязкая ($T_{0,5}$) температура для битумов, содержащих воски, ниже, чем для обычных битумов. Это же касается и эквивязкой температуры уплотнения, которая должна отвечать $0,8 - 1,0 \text{ Па} \times \text{с}$. Благодаря понижению этих критических температур битумных вяжущих, температуры перемешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей могут понижаться на $12 - 35 \text{ }^\circ\text{C}$.

Степень понижения этих температур зависит от вида добавки, ее количества и особенностей взаимодействия с битумом. Существует несколько повсеместно признанных добавок – восков, снижающих вязкость битумов при высоких температурах. Эти добавки более высокомолекулярны ($C_{40-115} \text{ H}_{82-232}$), чем парафины, содержащиеся в

битумах ($C_{22-45} H_{46-92}$), температура их плавления колеблется в пределах 90–102 °С. Обычно в битум вводят 1–3 % воска. Чем выше пенетрация исходного битума, тем большее количество добавки необходимо в него ввести, чтобы достичь необходимого снижения технологических температур.

Верхний предел содержания добавки в битуме ограничивается 3–4 %, поскольку избыток парафинового воска может образовать в битуме собственную кристаллическую структуру, что приведет к повышению температуры хрупкости битума и понижению трещиностойкости асфальтобетонов зимой. При температуре окружающего воздуха высокомолекулярные воски становятся хрупкими.

Опыт дорожников США, по свидетельству профессора Б.С. Радовского, указывает на то, что большое содержание парафинового воска и низкая температура уплотнения могут привести к снижению водоустойчивости асфальтобетонов. В США применение парафиновых восков считается эффективным, если технологическая температура снижается на 30–40 °С, что уменьшает расход топлива на 20–33 %. Но при этом необходимо строго контролировать возможность изменения свойств асфальтобетона в сторону ухудшения трещиностойкости, водо- и морозостойкости. Технологии применения теплых смесей являются наиболее динамично развивающимися. В США объем их применения достигает 50 %, а в Европе 7–10 % от общего объема асфальтобетонных смесей.

10. АСФАЛЬТОПОЛИМЕРБЕТОННЫЕ СМЕСИ И АСФАЛЬТОПОЛИМЕРБЕТОНЫ

К концу 80-х годов прошлого столетия возможности традиционных асфальтобетонов в обеспечении несущей способности дорог высших категорий с интенсивностью до сотен тысяч автомобилей в сутки и нагрузками на ось более 11 т были практически исчерпаны, и появилась необходимость в новом материале, который бы отличался от традиционных не каким-нибудь отдельным своим свойством, например водоустойчивостью за счет применения ПАВ, сдвигоустойчивостью за счет применения высоковязких битумов и большого содержания щебня, а всем комплексом требуемых показателей качества.

При этом стала очевидной необходимость принципиального изменения свойств битума и получения нового вяжущего. Таким вяжущим стал битум, модифицированный полимером (БМП), который описан в первой части этого учебника. Отличительными свойствами БМП являются повышенная когезия и вязкость при высоких температурах, пониженная трещиностойкость при низких температурах, повышенная устойчивость к старению, повышенное сцепление с минеральной подложкой при достаточном содержании в нем полимера.

В то же время обретение вяжущим таких достоинств сопровождается и негативными последствиями, заключающимися в усложнении технологических режимов его применения, увеличении стоимости и увеличении отрицательного воздействия на окружающую среду. Это касается создания дополнительных технологических линий для производства БМП, создания специальных полимеров, совместимых с битумом, особых условий хранения БМП, а также повышения температур на всех этапах его производственного применения и стоимости БМП по сравнению с обычным битумом.

В разделе «Реологические свойства асфальтобетонов» показана прямая их зависимость от реологических свойств битумов. Этот постулат подтверждается и в отношении асфальтополимербетона. *Асфальтополимербетон* – монолит, состоящий из традиционной смеси минеральных материалов и битума, модифицированного различным содержанием полимера. В настоящем разделе раскрывается сущность асфальтополимербетонов на основе битума, модифицированного

блоксополимером стирол-бутадиен-стирол (СБС), представителем которого является и дивинил-стирольный термоэластопласт (ДСТ).

Первое в Украине промышленное применение асфальтополимербетона на основе ДСТ для устройства верхнего слоя покрытия на ортотропной плите Северного моста в г. Киеве осуществлено разработчиком БМП, родоначальником этого вяжущего в Советском Союзе – Л.М. Гохманом. В тяжелых эксплуатационных условиях под интенсивными динамическими нагрузками покрытие прослужило 12 лет вместо 6, выдерживаемых обычным асфальтобетоном.

В настоящее время в нашей стране по экономическим и технологическим причинам распространен асфальтополимербетон, в котором содержится 2,5–3,5 % СБС. В разделе, посвященном БМП, экспериментально показана высокая эффективность битумов, модифицированных большим содержанием полимера. В странах ЕС для наиболее грузонапряженных дорог все чаще используют БМП с 5–7 % полимера. Аргументом в пользу такого подхода служат технико-экономические расчеты, доказывающие экономическую его эффективность за счет продления срока службы, меньших затрат на ремонт и большей несущей способности дорожных одежд.

Для производства асфальтополимербетонов используют преимущественно гранулометрические составы с повышенным содержанием щебня. Битум модифицируют либо на специальных базах, либо в установках, смонтированных непосредственно на асфальтобетонных заводах (АБЗ) по технологии, описанной в I части, раздел 12. Битумоплавильные котлы, в которых хранится БМП, для предупреждения его расслаивания оборудованы специальными мешалками. Для этой цели используется также многократная обратная перекачка БМП.

Температурный режим введения БМП в мешалки асфальто-смесителя определяют по той же схеме, что и чистых битумов разных марок (часть I, раздел 12). Температурная зависимость вязкости чистого битума располагается в области самых низких вязкостей, выше нее располагается зависимость для БМП, состоящая из битума и 3 % СБС, а еще выше – из битума и 6 % СБС (рис. 10.1).

В соответствии с этим температуры, отвечающие вязкости $0,5 \text{ Па} \times \text{с}$, при каждом увеличении содержания полимера на 3 % увеличиваются на 15–20 °С. Таким образом, температура нагрева смеси с 6 % СБС почти на 40 °С выше, чем чистого битума БНД 60/90, и доходит до 185 °С.

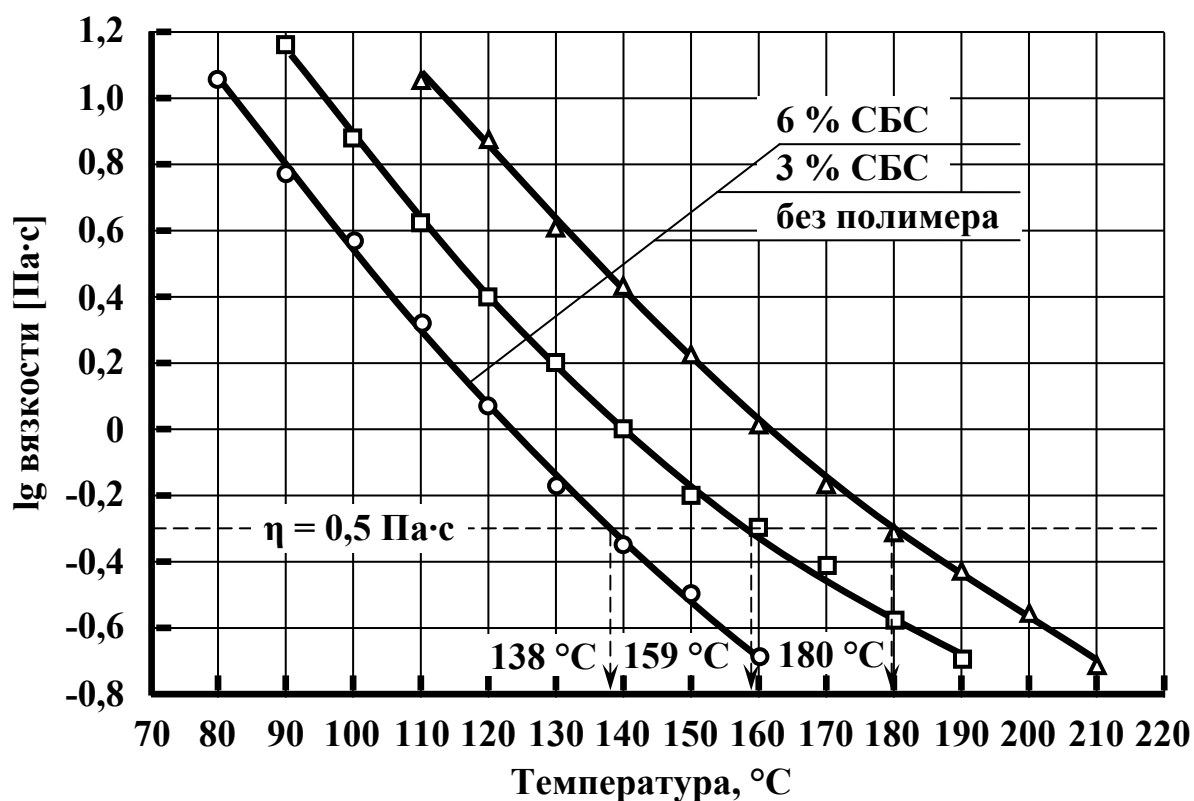


Рис. 10.1. Влияние концентрации полимера на температурные зависимости вязкости БНД 130/200 немодифицированного (○); модифицированного 3 (□) и 6 (Δ) % СБС 1101

Температурные зависимости краевого угла смачивания, так же как температурные зависимости чистых битумов, смещаются в область более высоких температур с увеличением содержания полимера (рис. 10.2). Как и в случае битумов, температура, отвечающая углу смачивания, равного 15° , при введении ПАВ снижается практически до уровня исходного битума. Итак, за счет ПАВ достигается эффект снижения энергоемкости, температуры перемешивания асфальтополимербетонных смесей.

Введение полимера в чистый битум переводит его в марку с меньшим диапазоном пенетрации. Так, модификация 3 % СБС битума БНД 90/130 переводит его в марку БМП 60/90, а БНД 60/90 – в марку БМП 40/60. Следовательно, оптимальное содержание БМП в асфальтополимере по сравнению с исходным битумом, как и в случае перехода от менее вязкого битума к более вязкому, должно возрасти из-за большей толщины структурированного в асфальтобетоне слоя более вязкого вяжущего.

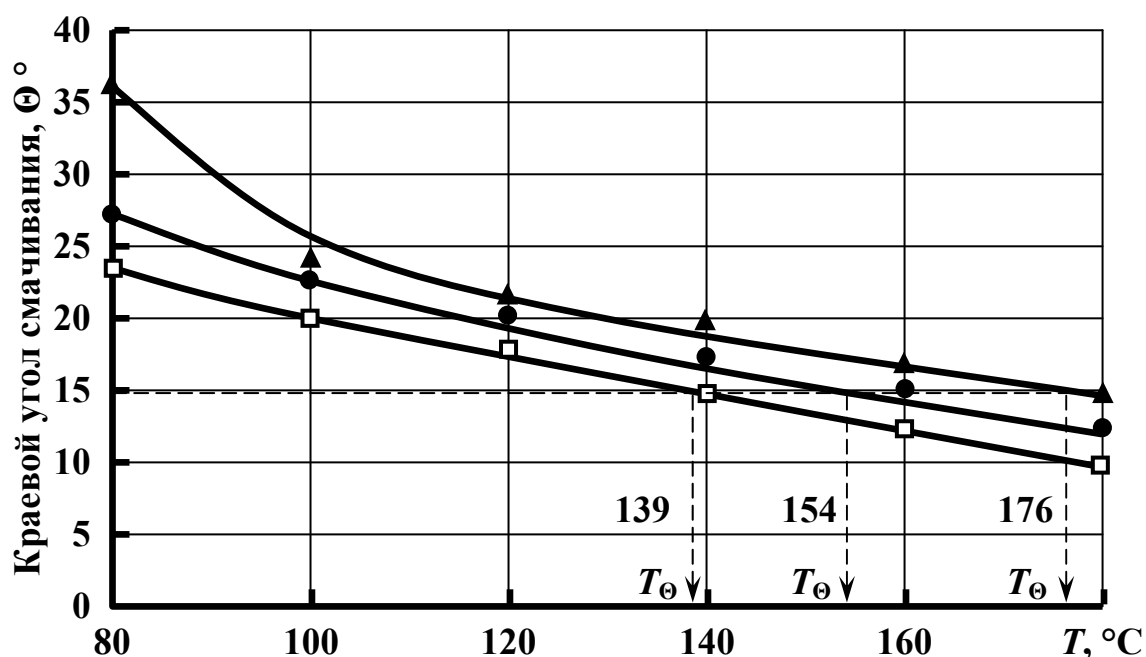


Рис. 10.2. Влияние ПАВ на значения краевого угла смачивания:
 $\square$ – БНД 40/60; $\blacktriangle$ – БНД 40/60 + 3 % SBS; $\bullet$ – БНД 40/60 + 3 % SBS + 0,7 % ПАВ

Это четко просматривается для зависимостей прочности на сдвиг при 50 °С асфальтобетонов и асфальтополимербетонов на исходном и модифицированном 3 % полимера битуме (рис.10.3). При переходе от битума марки БНД 130/200 к битуму марки БНД 40/60 оптимальное содержание битума, отвечающее максимуму прочности, увеличивается от 4,4 % до 5,2 %. В случае БМП оптимум, соответственно, смещается от 4,8 % до 5,4 %. В первом случае приращение содержания битума составляет 0,8 %, а во втором – на 0,6 %. Но при этом приращение содержания БМП для каждой марки битума после введения в него 3 % СБС растет в среднем на 0,4 %. Этот перерасход БМП компенсируется существенным ростом прочности на сдвиг в среднем от 1,4 раза для пары БНД 40/60 и БМП на его основе до 1,6 раза для пары БНД 130/200 и БМП на его основе, что является залогом повышения колеестойкости асфальтополимербетона.

Последовательное увеличение содержания полимера в битуме от 3 % до 6 %, а затем до 10 % приводит к очень большому увеличению сопротивления сдвига (рис. 10.4). Оно, соответственно, растет от 0,14 МПа до 0,23 МПа, 0,26 МПа и 0,35 МПа, т.е. в 1,6; 1,85 и 2,5 раза. Уже при 6 % СБС достигается небывалое для

асфальтобетона на любом чистом дорожном битуме сопротивление асфальтобетона сдвигу при 50 °С. Однако при этом необходимо, чтобы содержание БМП по мере увеличения в нем СБС увеличилось по сравнению с исходным битумом БНД 90/130 последовательно на 0,4 %; 1,3 % и 2,0 %. В то же время оценить потенциальную способность полимера повысить прочность асфальтополимербетона можно только при условии введения в него оптимального содержания вяжущего.

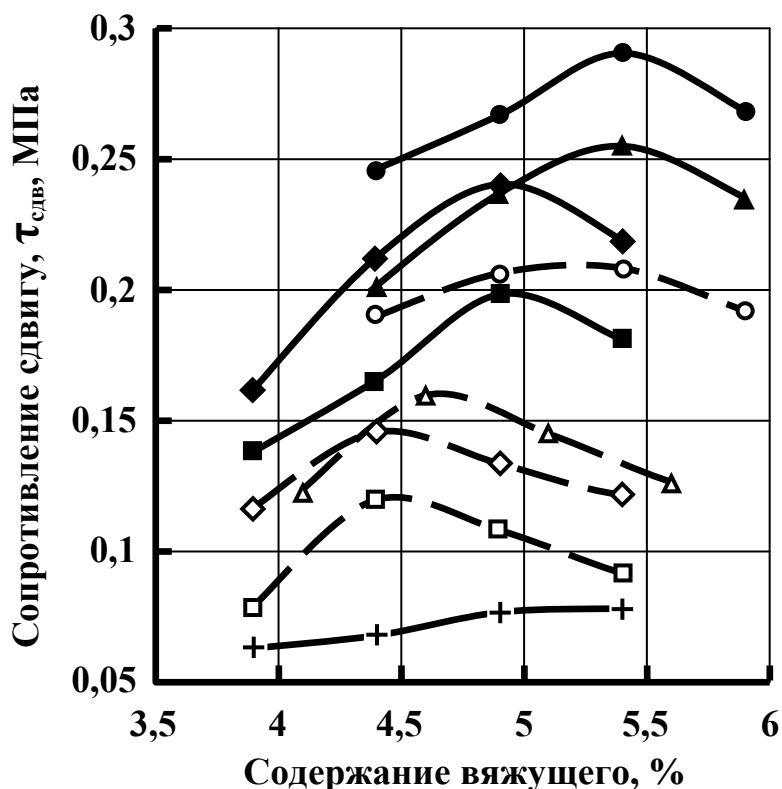


Рис. 10.3. Зависимости между сдвигоустойчивостью асфальтобетона и содержанием битумного вяжущего (битумы и битумополимеры) разной вязкости: битумы с пенетрацией (— — —) $\circ$ — 53×0,1 мм; $\triangle$ — 75×0,1 мм; $\diamond$ — 96×0,1 мм; $\square$ — 145×0,1 мм и соответственно битумополимеры (—) с 3 % SBS

Больше того, асфальтополимербетон на БМП с 6 % СБС при содержании БМП, равном 5 %, оптимальном для асфальтополимербетона на БМП с 3 % СБС, может оказаться менее прочным (рис. 10.4, кривые 2 и 3). При гораздо большей стоимости 1 т битума с 10 % полимера, по сравнению с чистым битумом, увеличение его расхода почти на 25 % делает его в настоящее время практически

недоступным для дорожной отрасли. Следует также учитывать необходимость нагрева такого БМП практически до 200 °С. Кроме того, уплотнение асфальтополимербетонной смеси на таком БМП также должно вестись при очень высокой температуре, которую трудно обеспечить из-за потерь температуры при погрузке, транспортировании, выгрузке в асфальтоукладчик, уплотнении и распределении в слой покрытия.

Влияние модификации битума полимерами вообще и СБС в частности на трещиностойкость изучено недостаточно. В странах ЕС это обусловлено более мягким климатом, при котором трещиностойкость асфальтобетона не является проблемой, а в Украине и России – отсутствием современных критериев, методов и приборов для объективной оценки этого свойства, на что обращалось внимание в разделе 7.

Литературные данные и результаты исследования реологических свойств асфальтобетонов, которым посвящен 7 раздел, свидетельствуют о том, что применение БМП с 3,0–3,5 % СБС не приводит к понижению температуры хрупкости асфальтополимербетона по отношению к асфальтобетону также, как и в случаях битумов и БМП с таким же содержанием полимера. Введение большего содержания полимера сопровождается ее снижением (рис. 7.10).

В Европе в настоящее время получило распространение определение трещиностойкости асфальтобетонов методом определения внутренних температурных напряжений в защемленном (для фиксации постоянного размера) образце. При охлаждении образца с определенной скоростью снижения температуры в нем, как и в вяжущем, нарастают температурные напряжения из-за достаточно большого коэффициента линейного сокращения. Параллельно с этим идет их релаксация (часть I, раздел 8). При низких температурах релаксационные процессы предельно замедляются, в результате чего микронапряжения нарастают, достигают максимума и затем снижаются из-за большого объема микроразрушений. В асфальтополимербетоне микроразрушения накапливаются в меньшей степени, чем в асфальтобетоне, поэтому он достигает максимума внутренних температурных напряжений при существенно более низкой температуре, чем асфальтобетон (рис. 10.4). Разница температур достижения максимума прочности для асфальтобетона и асфальто-

полимербетона на БМП с 9 % СБС составляет около 10 °С, а разница максимальных растягивающих напряжений близка к 1,6 МПа.

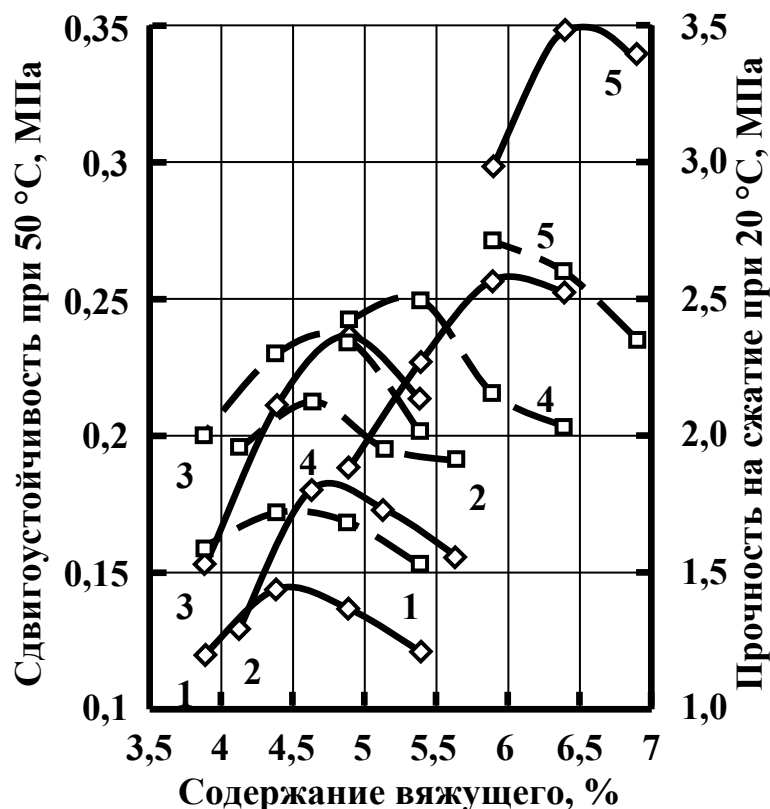


Рис. 10.4. Влияние концентрации полимера в модифицированном вяжущем и содержания модифицированных вяжущих на прочность асфальтобетона при сдвиге (◇) и сжатии (□): 1 – битум 90/130; 2 – битум 90/130 с 1,5 % СБС; 3 – битум 90/130 с 3,0 % СБС; 4 – битум 90/130 с 6,0 % СБС; 5 – битум 90/130 с 10,0 % СБС

В разделе 12 (часть I) было показано, что введение полимера в битум в небольшом количестве незначительно повышает сцепление битума с минеральной подложкой. Введение же 6 % СБС повышает сцепление БМП почти в 5 раз. При введении в битум 9 % полимера сцепление становится таким же, как и у битума с наиболее активными ПАВ.

В отношении водостойкости асфальтобетона полимер более эффективен. Уже 3 % СБС повышает коэффициент водостойкости от 0,73 до 0,78. Фактически это повышение близко к тому, которого достигают при введении ПАВ. Совместное же введение полимера и ПАВ приводит к сложению эффектов, и водостойкость асфальтополимербетона повышается до 0,82.

Повышение вязкости битума (понижение пенетрации от 130/200 до 40/60) приводит к повышению водостойкости и прочности асфальтобетона. Однако применение битума БНД 40/60 не решает задачу повышения трещиностойкости, а применение битума БНД 130/200 – сдвигоустойчивости. Кроме этого, остается не решенной задача повышения устойчивости асфальтобетона к его старению. Таким образом, производитель асфальтобетонных смесей может выбирать более приемлемый для него вариант: вводить в битум больше полимера и решать одновременно задачу усиления асфальтобетона или при меньшем содержании полимера вводить дополнительно ПАВ и целенаправленно повышать водостойкость асфальтобетона. Более полезный вариант необходимо принимать с учетом климатического района строительства дороги и ее категории.

Рекомендуемые стандартом показатели прочности на сжатие асфальтополимербетона с оптимальным содержанием битумов, модифицированных 3 %, 5 %, 7 % и 10 % полимера, гораздо менее чувствительны к содержанию полимера, чем показатели прочности на сдвиг (рис. 10.4). Если при 3 % СБС прочность на сдвиг увеличивается в 1,6 раза, то прочность на сжатие – в 1,35 раза, при 10 % полимера прочность на сдвиг растет в 2,5 раза, тогда как прочность на сжатие – в 1,2 раза. Поскольку испытание на сдвиг в большей степени воспроизводит воздействие касательных напряжения на асфальтобетон в покрытии, чем испытание на сжатие, можно предположить большую устойчивость асфальтополимербетонов в покрытии по сравнению с обычным асфальтополимербетоном, чем та, которая устанавливается по результатам стандартных испытаний.

Увеличение содержания БМП с увеличивающимся в нем количеством полимера, естественно, понижает водонасыщение и, следовательно, повышается длительная водостойкость асфальтобетона. Вторым фактором повышения водостойкости в случае БМП, как сказано выше, является лучшее сцепление БМП с минеральной подложкой, особенно тех, в которых большое содержание полимера. Хотя аналогичного понижения водонасыщения и роста водостойкости можно ожидать и при переходе от асфальтобетонов с большой пенетрацией к асфальтобетонам с низкой пенетрацией, приоритет все-таки следует отдавать асфальтополимербетону, поскольку с уменьшением пенетрации за счет большей глубины окисления битума температура хрупкости его повышается, а за счет увеличения содержания

полимера, наоборот, снижается. Так, стандартный битум с пенетрацией $68 \times 0,1$ мм имеет температуру хрупкости минус 15°C , а БМП с пенетрацией $74 \times 0,1$ мм, полученной за счет введения в битум с пенетрацией $200 \times 0,1$ мм 7 % полимера, имеет температуру хрупкости минус 39°C (по данным Л.М. Гохмана).

Введение в асфальтополимербетон оптимального содержания БМП с разным содержанием СБС приводит к существенному изменению значений его стандартных показателей. Повышению средней плотности сопутствует уменьшение водонасыщения. При этом рост средней плотности на $0,05 \text{ г/см}^3$ приводит к изменению водонасыщения на 2,5 %. Это означает, что водонасыщение является более чувствительной характеристикой пористости при изменении в асфальтобетоне содержания вяжущего, чем средняя плотность. Уменьшение водонасыщения является одним из важнейших факторов роста водостойкости асфальтобетонов любых типов и разновидностей. С увеличением содержания полимера от 0 % до 3 %, 5 %, 7 %, 10 % водонасыщение уменьшается от 3,0 %, 2,6 %, 1,7 %, 1,3 % и 0,5 % соответственно. Показатели прочности нарастают с затухающим темпом, практически до возможного максимума повышается коэффициент водостойкости от 0,8 до 0,98, прочность при 20°C увеличивается соответственно: 1,13, 1,8, 1,20 и 1,22, а прочность при 50°C в 1,35, 1,39, 1,53 раза.

Таким образом, применение асфальтополимербетонов с различным (в зависимости от его назначения) содержанием полимера в БМП позволяет по сравнению с обычным асфальтобетоном улучшать прочность, сдвигоустойчивость и устойчивость к старению, т.е. обеспечивать большую долговечность асфальтополимербетонного покрытия. При этом единоразовые затраты на устройство асфальтополимербетонных покрытий существенно больше, чем на устройство асфальтобетонных покрытий, но в долгосрочной перспективе они будут более выгодными ввиду уменьшения затрат на ремонт и на транспортные перевозки.

11. ВЫСОКОЩЕБЕНИСТЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОНЫ

11.1. Щебеночно-мастичные смеси и асфальтобетоны

Щебеночно-мастичные асфальтобетоны – это асфальтобетоны, свойства которых определяются минеральным остовом из зерен щебня и асфальтовязующим веществом, заполняющим пустоты между ними.

Щебеночно-мастичные асфальтобетоны (ЩМА) впервые разработаны и использованы в ФРГ в конце 60-х годов прошлого столетия. Необходимость в таких асфальтобетонах возникла в связи с тем, что применяемые до них литые асфальтобетоны для покрытий автомагистралей не могли обеспечить устойчивость покрытия к образованию пластических деформаций под действием тяжелых и интенсивных нагрузок в жаркое время года.

Главная особенность ЩМА состоит в том, что в их состав вводится 60–80 % зерен щебня и достаточно большое количество зерен минерального порошка от 8 до 15 % в пересчете на зерна мельче 0,071 мм. В разделе 4 было показано, что с ростом усредненного размера минерального зерна в смеси растет толщина пленки битума, необходимая для полного смачивания его поверхности, заполнения микронеровностей поверхности и покрытия выступающих граней. Это приводит к тому, что в щебеночно-мастичной смеси (ЩМАС) содержится очень много свободного битума, который при технологической температуре стекает с поверхности зерен и приводит к ее расслоению. Именно это обстоятельство в тех же 60-х годах стало препятствием для широкого производственного применения многощебенистых асфальтобетонов с содержанием щебня 50–65 %.

Решение проблемы стекаемости нашел немецкий исследователь Ж. Зишнер. Он предложил вводить в такие смеси *тонкодисперсные волокна*: вначале асбестовые (длиной до 2 мм и диаметром около 20–40 мкм), а затем синтетические (длиной до 10 мм и диаметром около 6 мкм). Такие волокна (рис. 11.1) обладают огромной удельной поверхностью (суммарная поверхность всех зерен или волокон,

отнесенная к единице их массы или объема) во много раз большей по сравнению с удельной поверхностью минерального порошка ($3 \times 10^3 \text{ см}^2/\text{г}$).



Рис. 11.1. Стабилизирующие добавки в гранулах для щебеночно-мастичного асфальтобетона: а – Виатоп; б – Стилобит; в – Топсел

Благодаря этому они адсорбируют (поглощают) объемный битум и предупреждают его стекание с поверхности крупных минеральных зерен при выгрузке из смесителя, хранении в накопительном бункере, транспортировании щебеночно-мастичной смеси к месту укладки. Содержание синтетических волокон обычно находится в пределах 0,2–0,5 % от массы минеральной части смеси. В Украине широко распространены волокна западных производителей (Топсел, Виатоп, Техноцел, Гасцел, Доланит АС и др.). Эти волокна часто называют *стабилизирующими добавками*.

Учитывая эту особенность состава щебеночно-мастичных смесей, главной задачей подбора его состава в лабораторных условиях является установление такого содержания битума и волокна, при которых показатель стекания не превосходил бы нормативные значения 0,2 % по массе. *Показатель стекания* определяется чаще всего по методу Шеленберга (рис. 11.2). Его суть заключается в том, что разогретую до максимальной технологической температуры 160–175 °С (в зависимости от марки принятого битума тем большей, чем меньше его глубина проникания иглы) щебеночно-мастичную смесь помещают в количестве 0,9–1,2 кг в предварительно взвешенный стакан. Стакан со смесью выдерживают в сушильном шкафу при указанных выше температурах в течение 60 ± 1 мин, затем его вынимают из шкафа и, перевернув стакан вверх дном, удаляют смесь, после чего его охлаждают в течение 10 мин и взвешивают с остатками вяжущего и смеси, прилипшей к его внутренней поверх-

ности. Затем зерна крупнее 1 мм отделяют экстрагированием и рассчитывают показатель стекания как процент по массе оставшегося на стенке стакана битума с зернами мельче 1 мм.

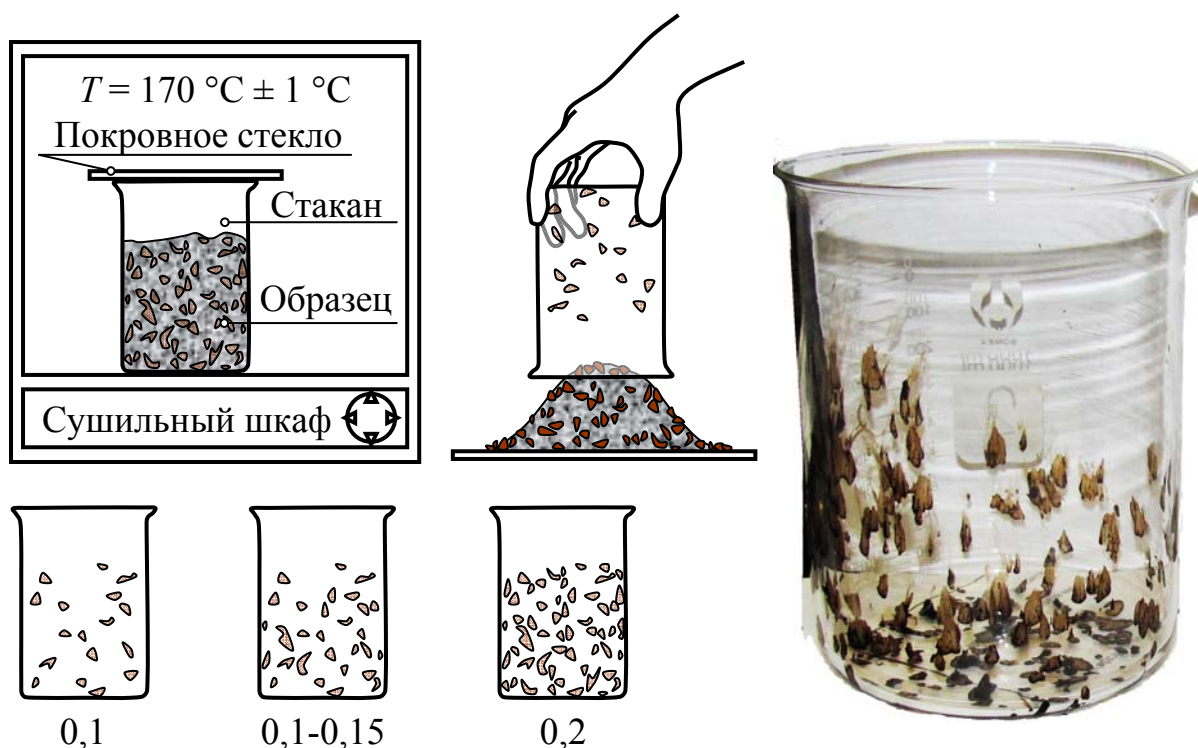


Рис. 11.2. Схема испытания смеси на стекание вяжущего

Гранулометрические составы ЩМА, согласно нормативным документам Украины и России, должны соответствовать приведенным в табл. 11.1.

По сравнению с обычными горячими асфальтобетонными смесями типа А в составе, например ЩМА-15, гораздо больше зерен размером 10–15 мм (40–60 % против 22–37 %) и зерен минерального порошка (9–14 % против 6–11 %), а также больше битума (6,0–7,0 % против 5,0–6,5 %). Коэффициент сбега фракций 10–15 мм и 5–10 мм в ЩМА равен 0,71, а асфальтобетона типа А – 0,49. Соответственно, упаковка этих зерен в случае ЩМА более плотная. Это иллюстрируется структурами традиционного асфальтобетона и ЩМА, приведенными на рис. 3.2. Для ЩМА рекомендуется применять битумы марок БНД 40/60, БНД 60/90, БНД 90/130 и битумы, модифицированные полимерами.

Таблица 11.1

Зерновые составы ЩМА

Вид ЩМА	Содержание зерен, % по массе, крупнее										Зерен мельче 0,071	Ориенти- ровочное содержа- ние битума, %
	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,071		
ЩМА-5				0–10	57–68	71–82	76–85	78–86	82–88	84–89	11–16	7,0–8,0
ЩМА-10			0–10	60–70	71–81	74–84	78–87	80–89	73–89	85–89	10–15	6,5–7,5
ЩМА-15		0–10	40–60	65–75	72–82	75–85	78–88	80–90	84–91	89–91	9–14	6,0–7,0
ЩМА-20	0–10	30–50	58–75	70–80	75–85	76–87	79–89	81–91	85–92	87–92	8–13	5,5–6,5
Тип А		0–5	22–37	55–65	59–72	66–80	73–88	80–91	86–94	89–95	6–11	5,0–6,5

Особенности состава и структуры сказываются на свойствах ЩМА. Нормируемые стандартами России и Украины значения показателей свойств принципиально не отличаются от технических требований к асфальтобетонам из обычных смесей в отношении пористости (1,5–4,5 %), водонасыщения (1,0–4,0 %), длительной водоустойчивости (0,75–0,90). В то же время нормированные значения показателя прочности на сжатие при 20 °С для ЩМА около 2,1 МПа, тогда для асфальтобетонов типа А, Б, В – 2,8 МПа, а при 50 °С около 0,65 МПа по сравнению с 1,2 МПа для обычного асфальтобетона, т.е. в первом случае прочность меньше в 1,3 раза, а во втором – почти в 2 раза. Принимая во внимание, что ЩМА предназначены для обеспечения устойчивости к развитию пластических деформаций летом, такие значения показателей могут показаться неоправданными. Тем не менее они отвечают действительности. Это объясняется тем, что большое содержание битума в ЩМА и, соответственно, относительно малое отношение минерального порошка к битуму, а также большая средняя толщина пленки битума в ЩМА (около 3,5 мкм) по сравнению с асфальтобетоном типа В (около 2 мкм) приводит к понижению его прочности.

В то же время в покрытии сдвигоустойчивость ЩМА выше, чем обычного асфальтобетона, поскольку в покрытии условия перемещения зерен щебня затруднены из-за бокового сопротивления в слое. Во время лабораторного испытания на сжатие при отсутствии бокового сопротивления эти зерна щебня легко перемещаются друг относительно друга, и образец разрушается при малом нормальном напряжении.

Отвечающие реальным условиям поведения асфальтобетона в покрытии показатели получают в результате испытания его на колееустойчивость, когда образец-плита закреплена в обойме и по ней перемещается металлическое колесо или пневмошина (рис. 11.3). В результате заданного количества проходов ($1 \times 10^4 - 3 \times 10^4$) при температуре 50 или 60 °С в плите образуется колея. Глубина этой колеи в плите из ЩМА гораздо меньше (около 3 мм), чем в плитах из асфальтобетонов типа В – в 3,5 раза, Б – в 2,8 раза, В – в 1,8 раза.

Кроме этого, к достоинствам ЩМА относятся высокая водоустойчивость, морозостойкость и устойчивость к старению из-за низкой остаточной пористости и большой толщины битумной

пленки; хорошее сцепление колеса автомобиля с поверхностью покрытия благодаря ее шероховатости. Это свойство ЩМА проявляется через несколько месяцев после начала эксплуатации покрытия, когда пленка битума, покрывающая зерна щебня, изнашивается.

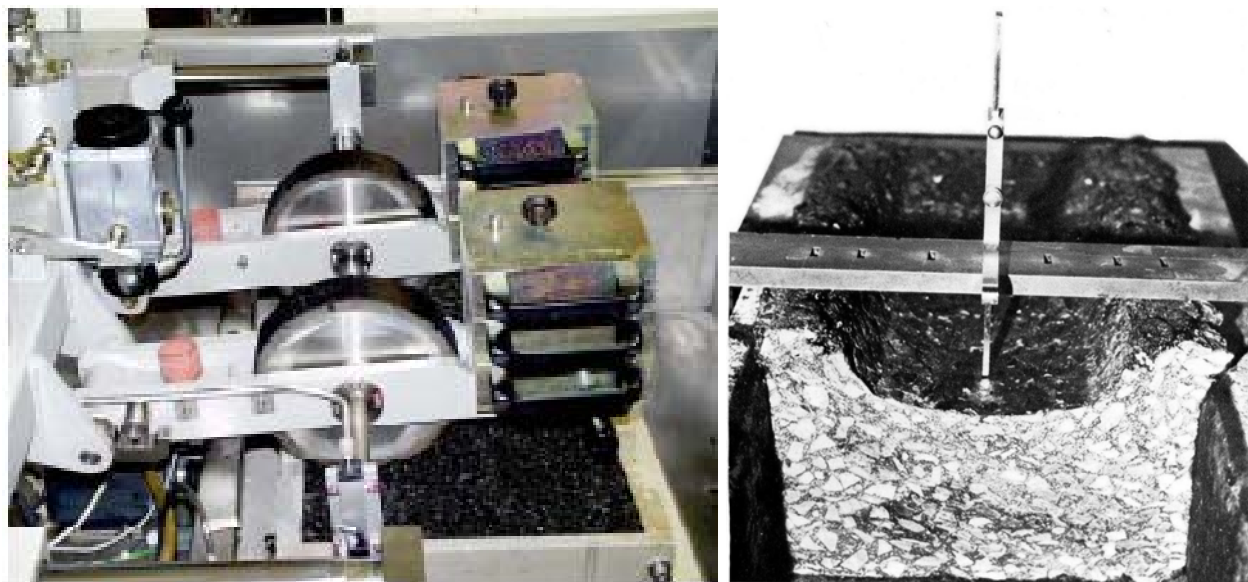


Рис. 11.3. Колеемер (малая модель) и измерение колеи (от колеемера с пневмоколесом – большой колеемер)

В то же время все эти достоинства могут быть обеспечены при использовании качественных материалов, прежде всего высокопрочного и труднополируемого щебня, а также щебня с зернами, близкими к кубовидной или тетраэдрной форме, при высокой точности дозирования составляющих в смесь и качественном ее уплотнении. В случае нарушения состава и технологии приготовления смесей поверхность покрытия из ЩМА может шелушиться, выкрашиваться или выпотевать.

В практике западноевропейских стран используют преимущественно мелкозернистые ЩМА (5–16 мм) для покрытий толщиной слоя от 1,5 см до 6 см. Уплотнение смесей в слое осуществляют металлическими катками. При этом доля уплотняющего воздействия асфальтоукладчика должна быть не менее 70–80 %. Для предупреждения выпотевания предлагается рассыпать по поверхности ЩМА искусственный, обработанный битумом песок крупностью 2–5 мм и прикатывать его катком. Расход такого песка от 0,5 до 1 кг/м². Лишний песок сметают. Для усиления сдвигоустойчивости

стремятся применять достаточно вязкий (с пенетрацией $40 \times 0,1$ мм) битум и битумы, модифицированные полимерами.

Исследователями ХНАДУ разработан высокопрочный ЩМА, в котором нет стабилизирующих волокон. Роль стабилизатора, предупреждающего стекание битума с поверхности крупных минеральных зерен, выполняет минеральный порошок, содержание которого в смеси минеральных материалов достигает в пересчете на зерна мельче $0,071$ мм максимально рекомендуемого стандартом (табл. 11.1) предела (от 13 до 16 %). Для устранения стекания содержание битума принимают таким, чтобы отношение порошка (зерен меньше $0,071$ мм) к битуму (МП/Б) было в пределах от 2,3 до 2,9 (рис. 11.4). Это отношение тем больше, чем больше в смеси, в пределах 11 до 15 % зерен мельче $0,071$ мм.

Эти отношения близки к тем, которые отвечают нерасплаивающимся асфальтобетонным смесям типа В. При этом за счет высокой степени структурирования битума достигается высокая (около $1,5$ МПа) прочность ЩМА на сжатие при 50 °С, существенно снижается расход битума (на 1,2–1,3 %), уменьшается (на 20 %) стоимость одной тонны ЩМАС.

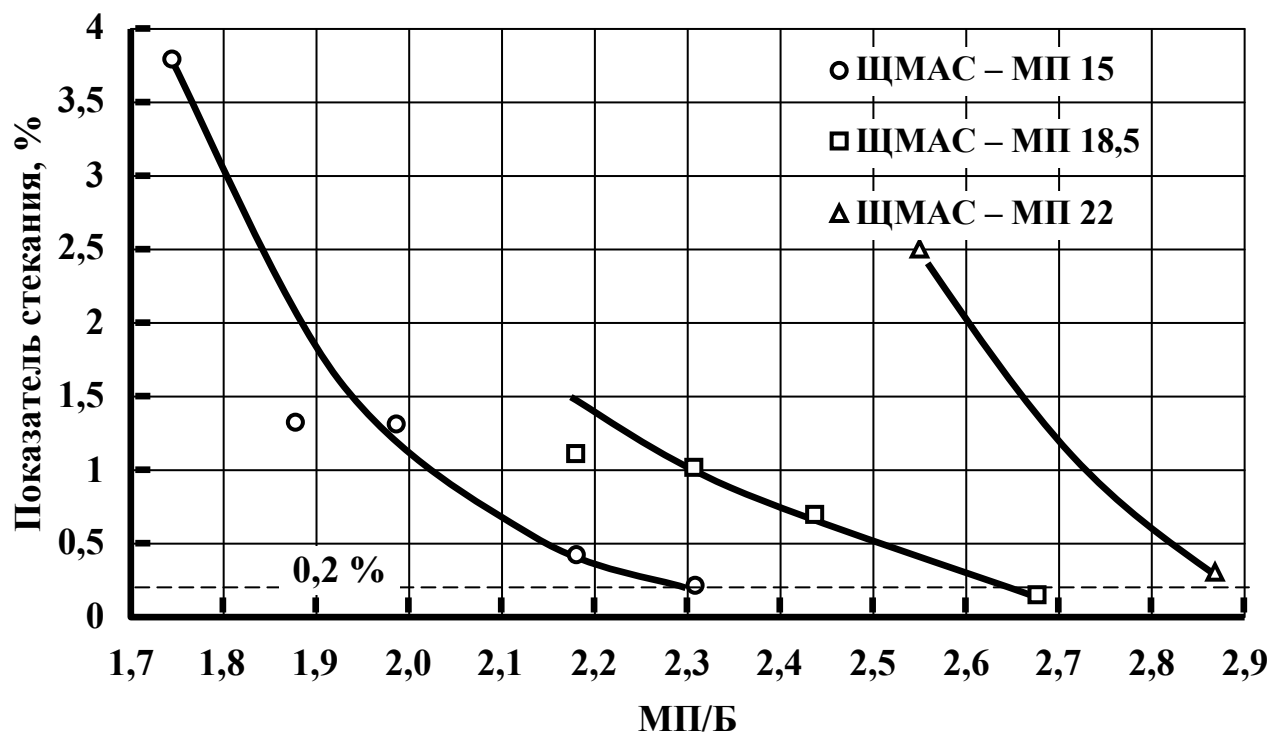


Рис. 11.4. Зависимость стекания от соотношения МП/Б для ЩМАС с 15 %, 18,5 % и 22 % минерального порошка

11.2. Дренирующий асфальтобетон

Дренирующий асфальтобетон – это асфальтобетон каркасного типа с очень большим количеством пустот между зернами щебня. В отличие от щебеночно-мастичного асфальтобетона поры его минерального остова не заполнены битумо-песчаным раствором и асфальтовязущим веществом. Это специальный асфальтобетон, предназначенный для отвода воды сквозь его пустоты с поверхности асфальтобетонного покрытия автомагистралей (рис. 11.5), что позволяет устранить скользкость покрытия ввиду возникающего на нем во время дождя эффекта «аквапланирования». Этот эффект заключается в образовании пленки воды между поверхностью покрытия и колесом автомобиля, что приводит к резкому снижению скользкости и безопасности движения. Вторичным эффектом, достигаемым в случае применения дренирующего асфальтобетона, является улучшение видимости за счет устранения водной завесы (тумана) от впереди идущих автомобилей.



Рис. 11.5. Дренирующий асфальтобетон

Для обеспечения таких функциональных свойств рекомендуются асфальтобетоны специального состава. Главной особенностью дренирующего асфальтобетона является его пористость, достигающая 20–30 %, что приводит к понижению его прочности на сжатие до 0,7 МПа при 50 °С, тогда как сдвигоустойчивость в покрытии очень высока. Она достигается за счет прочности самого щебенистого каркаса (высокое внутреннее трение, заклинка зерен щебня) и прочности вяжущего, склеивающего зерна. В связи с этим зерна щебня должны иметь «правильную» форму с отношением размеров граней, близким к 1. Щебень должен быть прочным и не подвергаться дроблению под действием уплотняющих и транспортных средств. Его зерна должны быть устойчивыми к износу и полированию поверхности, поскольку повышенная их полируемость может привести к повышению скользкости поверхности покрытия в сухом и мокром состоянии.

Из-за отсутствия в дренирующем асфальтобетоне склеивающего зерна щебня асфальтовяжущего вещества (структурированного тонкодисперсными зернами минерального порошка битума) (см. раздел 5), применяемое в нем битумное вяжущее должно иметь высокую адгезию (прочность прилипания битума к поверхности минеральных зерен) и когезионную прочность пленки. В связи с этим наиболее пригодным являются высоковязкие битумы с пенетрацией $38 - 50 \times 0,1$ мм (с широким интервалом пластичности) и битумы, модифицированные большим содержанием полимера, с пенетрацией $(25 - 55) \times 0,1$ мм.

Достоинствами дренирующего асфальтобетона также являются повышенная колеестойкость (сдвигоустойчивость), формирующаяся за счет каркасности его структуры (≈ 70 % щебня крупностью более 10 мм), и пониженное шумообразование (на 4–14 dB ниже, чем обычного асфальтобетона), обеспечиваемое исключением акустического эффекта (сирены) за счет выдавливания при высоких скоростях движения автомобиля воздуха, находящегося между протектором пневмоколеса и поверхностью покрытия, в поры асфальтобетона. Уровень шумообразования растет с увеличением крупности асфальтобетонов как обычных, так и дренирующих: от песчаного до крупнозернистого. Специальным техническим требованием, предъявляемым к дренирующему асфальтобетону, является водопроницаемость. Она должна быть выше $0,4 \text{ см}^3/\text{с}$.

Дренирующий асфальтобетон требует высокой культуры производства и ухода за ним. Поры такого асфальтобетона кальмируются (забиваются) пылью и мелкими минеральными частичками, что приводит к росту уровня шумообразования. Это требует их постоянной очистки специальными средствами. Наличие большого количества крупных пор способствует льдообразованию в них, приводящему к выкрашиванию зерен щебня. По этой же причине старение битумных вяжущих в теле дренирующего асфальтобетона протекает быстрее, чем в обычном плотном асфальтобетоне, остаточная пористость которого не превышает 5 %. В первые 3–6 месяцев эксплуатации покрытия из дренирующего асфальтобетона сцепление пневматика с поверхностью покрытия может быть недостаточно высоким, поскольку на поверхности зерен остается толстая битумная пленка. По мере износа такой пленки это эксплуатационное свойство улучшается.

Применение дренирующего асфальтобетона в верхних слоях покрытия сопряжено с необходимостью устройства специальных водоотводных и собирающих загрязненную выбросами двигателей автомобилей воду в специальные отстойники, что представляет собой технически и экономически сложную проблему. Для ухода зимой требуется большой расход солевых растворов, как правило, CaCl_2 . Снеговые отложения зимой могут свести на нет достоинства дренирующего асфальтобетона. Все это объясняет тот факт, что дренирующие асфальтобетоны используют на высокоскоростных, чаще всего платных, автомагистралях в регионах с коротким периодом отрицательных температур воздуха.

11.3. Асфальтобетоны для нижних слоев покрытий и оснований

Надежность нежесткой дорожной одежды и долговечность дорог обеспечивается толщиной и конструктивными свойствами асфальтобетонных слоев. Это соответствует концепции «вечных» дорог (по терминологии США или дорог «большой продолжительности жизни» в соответствии с европейской трактовкой), которая предусматривает, что дорожная одежда должна работать без капитального ремонта или реконструкции не менее 50 лет. При этом

замене с определенной цикличностью подлежит только верхний слой покрытия. Для обеспечения такой долговечности уровень напряжений и деформаций, которым подвергается на протяжении всего срока службы дорожная одежда, должен быть меньше, чем предельно допустимый, заложенный в проект. Это возможно, когда нижний слой покрытия и верхний базовый слой основания устроены из материалов высокой прочности, способных воспринимать без разрушения в виде трещин многомиллионные циклические нагрузки от проходящих транспортных средств и без накопления пластических деформаций. При этом чем больше толщина асфальтобетонных слоев, тем меньше возникающие в них растягивающие напряжения.

Эти принципы входят в противоречие с экономическим аспектом строительства. Общая толщина слоев римских дорог, созданных трудом рабов, достигала 120 см, а действующие на них нагрузки были во много раз меньше, чем их несущая способность. В результате некоторые римские дороги сохранились до нашего времени в первоизданном виде. На других же римских дорогах в средневековые были уложены щебеночные покрытия, обеспечивающие комфортность проезда гужевого (конной тягой) транспорта. В нынешних условиях такое соотношение качества и затрат на создание «вечных» дорог невозможно. Поиск оптимальных соотношений идет по пути применения инновационных технологий и использования новых материалов.

В связи с этим для нижних слоев покрытий и верхних слоев оснований применяют более качественные асфальтобетоны, чем прежде. Тем не менее они отличаются от материалов для верхнего слоя величинами многих показателей, что оправдывается их назначением и условиями работы в дорожной одежде. Стандарт на дорожные асфальтобетоны Украины предполагает применение для нижних слоев асфальтобетонов А1, Б1 непрерывной и прерывистой гранулометрии. Асфальтобетоны типа А1 отличаются от своих аналогов для верхних слоев покрытия большим содержанием крупного, до 40 мм щебня (45–65 % вместо 45–55 %), и меньшим содержанием зерен минерального порошка размером мельче 0,071 мм (4 – 10 % вместо 5–11 %); в случае смеси типа Б1 – отличаются увеличенным содержанием щебня (35–50 % вместо 35–45 %) и уменьшенным содержанием зерен мельче 0,071 мм (6–12 % против 8–14 %). При этом в зависимости от дорожно-климатической зоны и категории дороги такие асфальтобетоны могут быть I или II марки. Они также могут быть пористыми.

Для верхних слоев оснований рекомендуются применять пористые и высокопористые асфальтобетоны типов А-Б двух марок с прерывистой и непрерывной гранулометрией, крупно- и мелкозернистые с содержанием щебня 35–73 % и зерен минерального порошка 2–8 %.

Требования к каменным материалам пористых смесей I марки ниже, чем для плотных асфальтобетонов той же марки: 800 для щебня из изверженных метаморфических горных пород и металлургических шлаков; 600 для щебня из осадочных горных пород. Марки щебня того же происхождения для асфальтобетонных смесей II марки снижаются, соответственно, до 600 и 400. Снижаются также требования к морозостойкости щебня: до F 25 для асфальтобетонов I марки и F 15 для асфальтобетонов II марки; смягчаются требования к качеству минерального порошка. Все это связано с отличиями условий работы асфальтобетона в нижних слоях покрытия (отсутствием непосредственного контакта с колесами транспортных средств и внешней средой, меньшим увлажнением) и верхних слоях основания по нагрузкам и климатическим воздействиям.

В то же время физико-механические свойства асфальтобетонов для рассматриваемых слоев должны быть достаточно высокими. Так, водонасыщение плотных асфальтобетонов А1 и Б1 не должно превышать 4,0 % и 3,5 %, а коэффициент длительной водоустойчивости быть не меньше 0,82–0,87 для первой марки и не меньше 0,80–0,85 для второй марки этих асфальтобетонов. В случае пористых и высокопористых асфальтобетонов физико-механические свойства должны отвечать требованиям, представленным в табл. 11.2.

Таблица 11.2

**Физико-механические свойства пористых
и высокопористых асфальтобетонов**

Наименование показателей качества для асфальтобетонов	Норма для асфальтобетонов марок	
	I	II
1	2	3
Пористость минерального остова, % по объему, для асфальтобетонов:		
– пористого, не больше;	23	23
– высокопористого, не больше	24	24

1	2	3
Остаточная пористость, % по объему, асфальтобетона:		
– пористого, не больше;	10	10
– высокопористого, не больше	15	15
Прочность при сжатии, МПа, при 20 °С:		
– пористого, не меньше;	1,8	1,5
– высокопористого, не меньше	1,4	1,2
Коэффициент длительной водостойкости не менее	0,85	0,75
Водонасыщение, % по объему, в пределах:		
– пористого;	4-10	4-10
– высокопористого	меньше 15	меньше 15

Стандарт Республики Беларусь предъявляет еще более высокие требования к таким асфальтобетонам. Они сводятся к следующему: водонасыщение по объему 3–10 %, набухание по объему – 1–2 %, предел прочности при 50 °С, 0,8–1,1 МПа, предел прочности при сдвиге при 20 °С в пределах 2,5–2,7 МПа.

Повышенные требования к асфальтобетонам нижних конструктивных слоев нежестких дорожных одежд могут существенно повысить долговечность дорог при непрерывно возрастающих грузонапряженности и интенсивности движения.

12. АСФАЛЬТОЦЕМЕНТНЫЕ БЕТОНЫ

Асфальтоцементные бетоны – это бетоны, обладающие коагуляционными (битумными) и кристаллизационными (цементными) связями, в которых первые обеспечивают достаточные деформативные свойства покрытия зимой, а вторые – устойчивость покрытия к развитию в жаркое время года пластических деформаций.

12.1. Эмульсионно-цементные бетоны

Для образования кристаллизационных связей в бетоне необходима вода затворения. Следовательно, наиболее простым и обоснованным является способ получения таких бетонов при использовании в них в качестве органического вяжущего битумных эмульсий. В процессе распада эмульсий образуются битумные пленки на минеральных частицах, и происходит гидратация клинкерных минералов с последующим образованием цементного камня.

Задача технолога состоит в том, чтобы подобрать такое соотношение этих вяжущих, которое обеспечивало бы максимальное соответствие свойств бетона климатическим и транспортным условиям эксплуатации. По теории Э.А. Казарновской, при незначительном содержании цемента межзерновое пространство практически полностью заполнено асфальтовяжущим веществом, в которое вкраплены пространственные новообразования цементного камня. Эти новообразования могут связывать отдельные мелкие минеральные частицы или сосредоточиваться на крупных минеральных зернах. Преобладающими в этом случае являются коагуляционные связи, образуемые битумными пленками. Тем не менее прочность при 50 °С асфальтобетона повышается в 2–3 раза.

В случае преобладающего содержания цемента в бетоне образуется кристаллизационная структура прочного цементного камня с отдельными вкраплениями битумных капель, которые почти не влияют на прочностные свойства бетона, но сохраняют его деформативную способность практически на уровне, близком к деформативности обычного асфальтобетона.

Для получения бетонов с преобладающим объемом битумных пленок используют концентрированные эмульсии (50–60 % битума). Оптимальное количество цемента в этом случае отвечает 4 – 6 % от массы минеральной части асфальтобетона. Асфальтоцементобетон на эмульсии по сравнению с обычным асфальтобетоном на основе эмульсий отличается повышенной прочностью на сжатие (до 2,5 МПа) и сдвиг (0,9 МПа против 0,5 МПа) при 50 °С. Водостойчивость таких бетонов при длительном водонасыщении очень высока ввиду протекания в них во времени процессов гидратации, сопровождающихся образованием кристаллизационных связей и упрочнением.

Для приготовления асфальтоцементобетонных смесей на эмульсиях используют обычное оборудование. При этом из минерального порошка и цемента предварительно готовят смесь, которую вводят в мешалку. Использование асфальтоцементобетонных смесей способствует охране труда и окружающей среды, поскольку резко снижается пылеобразование и исключается нагрев каменных материалов.

12.2. Асфальтоцементобетоны

Кроме эмульсионно-цементного способа получения асфальтоцементобетонов существует способ введения битума во влажную смесь минеральных материалов, содержащую цемент в количестве 5 – 10 % от массы минеральной части. Согласно разработанной Н.А. Горнаевым и А.В. Потаповым технологии обеспечения эффективности этого способа, используемый битум должен быть марок БНД 130/200 или БНД 200/300, поскольку в такой битум легче проникает вода, в результате чего он становится пористым, вытягивается в нити, а затем в процессе перемешивания разрывается на капли диаметром около 400–500 мкм.

Оптимальное соотношение битума к цементу в таких смесях близко к 0,4–0,8. Твердение цементного камня в таких асфальтобетонах продолжается в течение 2–3 месяцев. Рациональными считаются составы, содержащие от 3–8 % цемента; 5,0–8,5 % битума и 5–11 % воды. Температура нагрева битума, вводимого в смесь, находится в пределах 120–150 °С. Асфальтоцементобетон, полученный по такой технологии, имеет водонасыщение до 7 %; прочность на сжатие при 20 °С и 50 °С соответственно 2,5 МПа и 1,5 МПа;

коэффициент длительной водостойкости не менее 0,6. По техническим показателям такие асфальтоцементобетоны могут применяться для устройства покрытий на дорогах III категории, а также для устройства оснований на дорогах не выше II категории.

Разработанная в Беларуси В.А. Веренько и В.К. Шумчиком технология получения асфальтоцементобетонов основана на том, что цемент вводится в минеральную часть асфальтобетона вместо минерального порошка и смешивается с ней до однородного распределения зерен цемента, после чего в нее вводят битум, а затем воду или сначала воду, а потом битум. При этом зерна цемента выступают в качестве твердого эмульгатора и способствуют образованию обратной эмульсии (вода в битуме). Эта эмульсия медленно распадается, и зерна цемента вступают в реакции гидратации, создавая наряду с битумными пленками систему кристаллизационных связей. Таким образом на поверхности зерен песка и щебня образуются «мозаичные» пленки, когда чередуются участки, покрытые битумом, с участками, покрытыми гидратными новообразованиями (продуктами гидратации цемента), твердение которых продолжается до тех пор, пока в смеси есть вода. В результате в асфальтоцементобетоне формируется две параллельных структуры: коагуляционная (прослойка битума между минеральными зернами) и кристаллизационная с жесткими связями продуктов гидратации клинкерных минералов (рис. 12.1).



Рис. 12.1. Макроструктура асфальтобетона, пропитанного цементным тестом

Процессы образования кристаллизационных связей протекают быстрее (на 2–3 часа) в случае введения воды в минеральную смесь до ввода битума, чем в случае введения ее после битума (на 3–6 часов) по сравнению с твердением собственно цементного теста. Меняя порядок введения компонентов и соотношение между битумом, цементом и водой, можно направленно регулировать свойства получаемого бетона в сторону повышения его прочности или деформативности. Такие бетоны могут быть типов А, Б, В и Г. Содержание цемента в них варьируется от 8 до 13 %. В зависимости от назначения оптимальное отношение цемента к битуму находится в пределах 1,7–2,5 (рис. 12.2).

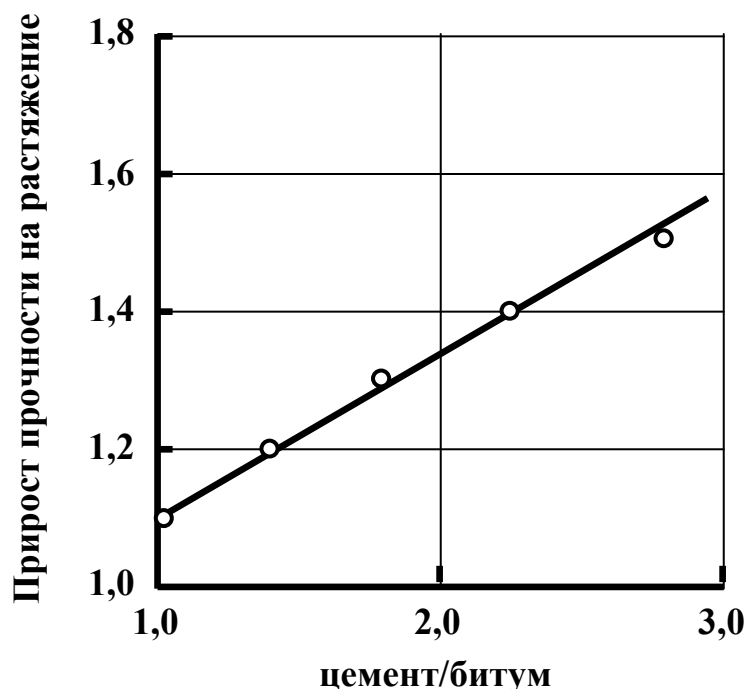


Рис. 12.2. Зависимость прироста прочности асфальтоцементобетона от соотношения цемента к битуму

В качестве вяжущих используют битумы с пенетрацией в пределах $100\text{--}180 \times 0,1$ мм. Чем более вязок битум и чем его больше, тем менее интенсивен процесс гидратации цемента. Применяют такие асфальтобетоны на межгородских дорогах и в городах для устройства покрытий городских улиц. При этом для проезжей части прочность на сжатие при $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ нормируется в пределах от 1,4–1,8 МПа, а для участков торможения от 1,8–2,8 МПа. Для нижних слоев

покрытия эта прочность должна быть в пределах 1,2–1,5 МПа. Эти значения прочности существенно выше тех, которые предусмотрены для обычных горячих асфальтобетонов (табл. 1.1). Асфальтоцементобетон обладает очень высокой сдвигоустойчивостью в летний период за счет наличия в нем цемента и достаточной (на уровне обычных асфальтобетонов) трещиностойкостью зимой. Кроме того, они обладают высокой водо- и морозостойкостью.

В западноевропейской практике основная цель применения асфальтоцементобетонных смесей сводится к технологической простоте, снижению энергорасходов и нагрузки на окружающую среду. В связи с этим наибольшим вниманием пользуются холодные асфальтоцементобетонные смеси на эмульсии.

Основными требованиями, предъявляемыми к ним, являются устойчивость к трещинообразованию и усталостная прочность. Кроме того, они должны быть достаточно плотными и водонепроницаемыми. Разработанная во Франции технология является двухстадийной: мелкие минеральные материалы (мельче 2 мм) обрабатываются битумным и гидравлическим вяжущими, а минеральные материалы крупнее 2 мм обрабатываются битумом. Это обусловлено фактом большего вклада в прочность асфальтобетона микроструктурной составляющей (асфальтовяжущего вещества и мелкой растворной части).

Смесь может содержать 32–38 % фракции мельче 0,2 мм; 14–24 % фракции 2–6,3 мм; 37–51 % фракции 6,3–10,0 мм. Содержание цемента около 2,5 %, а воды 6,4–7,4 % от массы минеральной части. Наиболее приемлемой по плотности и прочности считают смесь с умеренным содержанием щебня. Прочность активно нарастает в первые 14 дней. Чтобы покрыть битумом фракцию с размерами зерен крупностью 2–10 мм, теоретически необходимо около 1 % битума, но, учитывая необходимость качественного смешения и уплотнения этих фракций, количество битума с пенетрацией около $160 - 220 \times 0,1$ мм поднимают до 3,5 %. Количество воды назначают, ориентируясь на ее содержание в эмульсионно-минеральных смесях. Главная задача подбора состава состоит в обеспечении компромисса между прочностью и деформативностью асфальтоцементобетона.

Для приготовления смеси необходимо 2 конвейера. Один из них для смешения в течение 30 с фракции 2–10 мм с эмульсией. Второй

конвейер подает в смеситель предварительно приготовленную в отдельной мешалке смесь, состоящую из зерен мельче 2 мм, эмульсии и цемента. Обе составляющие перемешивают еще 15 с.

Образцы асфальтоцементобетона, взятого из покрытия, на одной из дорог Франции, имели остаточную пористость от 7,8 до 8,1 %, прочность на сжатие при 18 °С по Дюрьезу 5,4 МПа. Поведение таких асфальтобетонов на дороге лучше, чем холодных эмульсионных смесей. Эти показатели близки к тем, что характерны для асфальтобетонов из горячих смесей, но стоимость их ниже, а экологическая безопасность выше.

13. ЦВЕТНЫЕ АСФАЛЬТОПОЛИМЕРБЕТОНЫ И ТЕРМОПЛАСТБЕТОНЫ

Цветные бетоны на органических вяжущих – это бетоны, обладающие цветом, который им передают специальные вяжущие, пигменты и каменные материалы.

Цветные дорожные покрытия применяют в городах, где в эстетических, архитектурных и функциональных целях можно устраивать цветные тротуары, площади, аллеи, игровые площадки, велосипедные дорожки, пешеходные переходы, остановки безопасности, покрытия в туннелях.

Первые попытки получить цветные асфальтобетоны относятся к 30-м годам прошлого столетия. Чтобы придать асфальтобетону на традиционном битуме относительно выразительный красный цвет, в него добавляли более 20 % минерального пигмента. Естественно, это было экономически невыгодно и технически недооправдано, поскольку под влиянием пигмента битум активно окислялся, и асфальтобетон быстро становился хрупким.

В 50-е годы прошлого столетия В.О. Гельмер предложил гораздо более простой, хотя и технологически трудно воспроизводимый способ получения цветной поверхности покрытия, заключающийся в том, что в состав асфальтобетона вводили большое количество цветного щебня, который после износа битумной пленки придавал покрытию свой цвет.

Большими «энтузиастами» цветных асфальтобетонов были О.В. Хазинская и профессор Г.К. Сюньи. Они предлагали специальные вяжущие, как правило, синтетические или деасфальтизированные битумы, т.е. битумы, в которых мало асфальтенов, придающих им черный цвет.

К концу прошлого столетия в мире были освоены надежные технологии производства горячих и цветных термопластбетонов. В основу выбора вяжущих для цветных асфальто- и термопластбетонов положена их оптическая плотность и светопропускаемость в тонком слое. Эти показатели вяжущих можно определить для растворов вяжущих определенной концентрации в бензоле (табл. 13.1).

**Оптические свойства составляющих битума и компонентов
термопластичных вяжущих для цветных бетонов**

Объект	Концентрация, %	Длина волны, нм	Оптическая плотность	Светопрое- пускание, %
Асфальтены	0,2	814	1,222	6
Петролейно-бензольные смолы	0,2	814	0,041	91
Спиртобензольные смолы	0,2	814	0,201	63
Масла битума	0,2	814	0,009	98
Битум БНД 40/60	0,2	814	0,481	33
Гудрон	0,2	814	0,208	61,9
Нефтеполимерная смола	0,2	814	0,005	98,8
Индустриальное масло И-40А	0,2	814	0,002	99,5

Приведенные в табл. 13.1 данные для двухпроцентных растворов битумов, их составляющих, гудрона, нефтеполимерной смолы и индустриального масла показывают, что наименьшей светопропускаемостью обладают асфальтены, за ними следуют чистый битум, гудрон, спиртобензольные смолы, петролейнобензольные смолы, битумные масла, нефтеполимерная смола и индустриальное масло. Это распределение по светопропусканию хорошо согласуется с их техническими свойствами, приведенными в части I, раздел 7.3. Самыми прозрачными являются битумные масла, имеющие, по данным Л.М. Гохмана, самые низкие температуры размягчения ($22\text{ }^{\circ}\text{C}$) и хрупкости ($-43\text{ }^{\circ}\text{C}$), за ними следуют менее прозрачные с более высокими температурами размягчения и хрупкости петролейнобензольные ($T_p = 37\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $T_x = -41\text{ }^{\circ}\text{C}$) и спиртобензольные смолы ($T_p = 73\text{ }^{\circ}\text{C}$ $T_{xp} = -22\text{ }^{\circ}\text{C}$). Из этих данных также следует, что светопропускаемость гудрона в 1,9 раза выше, чем битума. С учетом того, что даже битумы окрашиваются окисью железа (Fe_2O_3), цветные асфальтобетоны на основе окрашиваемого пигментом гудрона широко применялись в начале этого века на многих улицах и аллеях г. Харькова.

В то же время более перспективной является мальтеновая фракция (смесь смол и масел) битумов. Комбинируя соотношения групп углеводородов битума, можно регулировать светопроница-

емость вяжущего для цветного асфальтобетона и его свойства. Во Франции осуществляется выпуск 15 разновидностей окрашиваемых битумных вяжущих марок 20/30, 35/50, 50/70 и 70/100. Их слабой стороной является достаточно высокая температура хрупкости – от минус 2 до минус 15 °С. В то же время они достаточно устойчивы к старению – их остаточная пенетрация не меньше 80 %. Обе эти особенности обусловлены высоким содержанием в них смол.

В качестве пигментов для цветных асфальтобетонов и термопластбетонов в обязательном порядке используют устойчивые во времени по окраске природные пигменты: красные – железный сурик, зеленые – окись хрома, желтые – крон желтый и даже голубые – железная лазурь (берлинская лазурь).

Более яркими по окраске, чем цветные асфальтобетоны, являются бетоны на термопластичных синтетических смолах (кумароновые, инден-кумароновые, стиролоинденные, нефтеполимерные), обладающие гораздо большей светопропускаемостью, чем гудрон (98,8 % против 61,9 %). Высокая их светопропускаемость является основанием для существенного уменьшения расхода пигментов (до 1,2–1,5 %) от массы каменных материалов по сравнению с цветным асфальтобетоном (около 3 %). Более того, при использовании синтетических смол можно получить цветные смеси, не используя пигменты. В этом случае цвет термопластбетона обеспечивается цветом принятых каменных материалов.

В естественном виде синтетические смолы, как правило, находятся в твердом и даже хрупком состоянии. Чтобы перевести эти смолы в вязкотекучее состояние при технологических температурах, в них вводят хорошо совмещающиеся с ними пластификаторы. Для придания пластифицированным синтетическим смолам необходимых технических свойств кафедрой ТДСМ ХНАДУ предложено совмещать их с полимерами, предпочтительно термоэластопластами типа СБС. Обычно используют вяжущие с пенетрацией от 90 до $130 \times 0,1$ мм. При оптимальном содержании компонентов они обладают техническими свойствами, приведенными в табл. 13.2 (по данным С.В. Оксака).

По значениям температуры размягчения приведенные вяжущие не уступают, а по значениям температуры хрупкости и устойчивости к старению существенно превосходят вяжущие, применяемые во Франции. Они также превосходят нефтяные дорожные битумы с близкой пенетрацией. Особенно это касается температуры хрупкости, растяжимости и устойчивости к старению.

Таблица 13.2

Технические свойства смолополимерных вяжущих

Состав вяжущего	Пенетрация при 25 °С, 0,1 мм	Температуры, °С		Растяжимость при 25 °С, см	Эластичность при 25 °С, %	После старения	
		размягчения	хрупкости			ΔT_p , °С	остаточная пенетрация, %
С (70) Пл (30) Пм (6)	127	48	-16	>100	83	0,2	81
С (70) Пл (30) Пм (9)	62	56	-18	>100	92	0,4	98
С (68) Пл (32) Пм (6)	171	43	-17	>100	84	0,1	92
С (68) Пл (32) Пм (9)	76	55	-20	>100	93	0,2	99
С (65) Пл (35) Пм (9)	105	52	-26	>100	94	0,1	99

Примечание: С – смола, Пл – пластификатор, Пм – полимер.

Разработанные в ХНДУ цветные термопластбетоны типа Г на вяжущих С(68) Пл(32) Пм(6) и С(68) Пл (32) Пм(9)) по своим физико-механическим свойствам (табл.13.3) в полной мере отвечают требованиям, предъявляемым к асфальтобетонам из горячих асфальтобетонных смесей. Опыт более чем пятнадцатилетней службы в реальных условиях доказал их долговечность.

Таблица 13.3

Физико-механические свойства цветных термопластбетонов

Состав вяжущего	Вяжущее, %	Пигмент, %	Водонасыщение, %	Прочность, МПа при °С			Коэффициент длительной водостойчивости
				20	50	0	
С (68) Пл (32) Пм (6)	7,2	2	1,7	4,4	1,2	9,1	0,90
С (68) Пл (32) Пм (9)	7,8	2	0,5	4,7	1,5	8,9	0,92

Технология приготовления цветных асфальтополимербетонных и термопластбетонных смесей принципиально не отличается от технологии приготовления черных асфальтополимербетонных смесей. Специальным требованием является чистота применяемого оборудования на всех технологических стадиях: при подготовке, хранении и транспортировке вяжущего; при перемешивании смесей; их транспортировании, укладке и уплотнении.

Кроме горячих цветных асфальтополимерных и термопластбетонных смесей в настоящее время используют холодные смеси на маловязких вяжущих и на битумных эмульсиях.

Особенности состава, качества составляющих (соответствие цвета каменных материалов цвету пигмента), использование специальных вяжущих и пигментов, усложнение технологии производства, укладки и уплотнения приводят к повышению стоимости цветных асфальтополимербетонов и особенно термопластбетонов по сравнению с обычными черными асфальтобетонами, что в нынешних экономических условиях препятствует их широкому распространению.

С развитием экономики следует ожидать резкого повышения спроса на цветные асфальтополимербетоны и смолополимербетоны, эстетическое и техническое их значение для больших городов не подлежит сомнению, о чем свидетельствует опыт многих западноевропейских городов.

В странах ЕС используются несколько видов цветных смесей на основе органических дорожных вяжущих. Первыми были смеси на чистом битуме с применением в качестве пигмента в большом количестве оксида железа (около 5 % по массе), который придает смеси бурый цвет. При этом каменные материалы должны иметь розовый или красный цвет, который проявляется после износа слоя вяжущего. Большое распространение имеют цветные смеси на битумах с малым содержанием асфальтенов. Аналогом их являются разработанные в ХНАДУ смеси, в которых в качестве базового вяжущего используются гудроны (часть I). В последнее десятилетие все больше применяются смеси на «синтетическом» вяжущем. Как правило, это различные смолы с «медовым» цветом. При этом яркая окраска достигается при малом содержании пигментов разных цветов (охра – жёлтая, хром – зеленый, кобальт – синий, титан – белый). Самым дешевым является красный пигмент, поэтому смеси на его основе применяют в больших объемах для покрытия велосипедных дорожек. Обычно толщина цветных слоев близка к 2,5 см. Все большее распространение получают цветные холодные смеси на эмульсиях. Эффективным в отношении безопасности движения в темное время являются мерцающие под действием света фар асфальтобетоны. Эффект серебристого мерцания обеспечивается введением при перемешивании смеси стеклянных зеркальных частиц.

14. АСФАЛЬТОБЕТОННЫЕ СМЕСИ: ИХ ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА И ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ*

Проблема защиты окружающей среды привлекает внимание мировой общественности уже много десятилетий. Но только в 1992 г. была подписана Рамочная конвенция ООН в отношении изменения климата на планете. А в 1997 году в Киото (Япония) был подписан протокол, в соответствии с которым страны берут на себя обязанность сокращать выбросы парниковых газов в период с 2008–2012 гг. в среднем на 5,2 % по сравнению с 1990 г. Страны ЕС обязались сократить объемы выбросов на 8 %, США – 7 %, Япония на 6 %. К настоящему времени протокол ратифицировала 191 страна (рис. 14.1). Такая солидарность мирового сообщества свидетельствует о всеобщей ответственности за судьбы будущих поколений.



Рис. 14.1. Эмблемы Киотского протокола и Парижской конференции по экологии

Основным газом, приводящим к потеплению, является двуокись углерода. Протокол предусматривает различные механизмы решения проблемы. Вне этого не остается ни одного промышленного производства, выпускающего продукцию с использованием топливных технологий. Непосредственное отношение к проблеме охраны

* Раздел написан по материалам отчета Технического Комитета AIPCR-PIARC по нежестким дорогам «Экологические и санитарные аспекты применения асфальтобетонных смесей»; перевод В.А. Золотарева и В.Н. Зинченко.

окружающей среды имеет и дорожная отрасль со своими асфальто-битумными технологиями.

Когда эта книга была передана в издательство, в декабре 2015 года, в Париже проходила «Конференция по проблемам глобальных изменений климата» COP21. Как отметил Генеральный секретарь ООН Пан Гу Мун, переговоры на ней были самыми сложными в его жизни. Эта сложность обусловлена тем, что в проблеме потепления его переплетаются политические, региональные, экономические, социальные интересы 195 стран-участниц. Все хотят, чтобы экологическая катастрофа не произошла, но каждая страна стремилась к минимуму расходов на ее предупреждение – договориться было очень трудно. Масштабы расходов зависят от того, каким будет допускаемый уровень потепления. Экологически полезно удерживать уровень потепления не больше 2 °С до 2100 г. Именно этот уровень и внесен в Парижский договор, который пришел на смену Киотскому протоколу и который начнет действовать с 2020 года. Четыре года потребуются для подготовки стран-участниц, подписания и ратификации (утверждения) договора. На реализацию поставленной цели в развивающихся странах ежегодно будет расходоваться 100 млрд долларов, которые выделяют страны-лидеры экономического развития.

В рейтинге экологической безопасности в 2015 г. Украина заняла 46-е место. Она отстает в развитии возобновляемых источников энергии (ветровой, солнечной, водной) по уровню энергосбережения расходов на единицу внутреннего валового продукта, недостаточно заботится о сохранении климата и окружающей среды. Согласно Договору Украина взяла на себя обязательство до 2030 года не превышать более чем на 60 % выбросов парниковых газов по отношению к базовому 1990 г.

Принятое соглашение основывается на принципе полного отказа от ископаемого топлива и стопроцентного перехода на возобновляемую энергию. Это станет возможно, когда энергия возобновляемых источников станет дешевле, чем энергия, получаемая от ископаемых источников. Этому будет способствовать решение 20 самых богатых стран мира о снятии государственных субсидий для пользователей и производителей ископаемого топлива.

14.1. Асфальтобетонные смеси и окружающая среда

На разных стадиях жизненного цикла асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны оказывают влияние на окружающую среду. К этим стадиям относятся добыча сырьевых материалов и производство из них компонентов асфальтобетона (битумов, щебня, песка, минерального порошка, добавок); приготовление смесей; транспортирование их к месту производства работ; уплотнение смесей и устройство асфальтобетонного покрытия; уход и эксплуатация покрытия на протяжении срока службы; старение и разрушение покрытия; повторное использование асфальтобетона.

Производство асфальтобетонных смесей включает процессы высушивания и нагрева материалов; перемешивание нагретых материалов и горячего битума. К этому также относятся разгрузка и хранение битума и минеральных материалов; хранение асфальтобетонных смесей в бункерах-накопителях и на складах (в случае холодных смесей).

На стадиях, предшествующих смешению битума с каменными материалами, характерным очагом вредного воздействия на окружающую среду является пыль, выделяющаяся при высушивании и нагреве каменных материалов. Пылевыведение также возможно при хранении минеральных материалов на складах в сухую и ветреную погоду, при перевозке, погрузке и выгрузке, транспортировании этих материалов конвейерными транспортерами и другими способами перемещения. Выделяемая пыль состоит из частичек размером около 10 мкм. Эта пыль оказывает вредное воздействие на дыхательные пути. В пылевидном состоянии могут находиться и углеводородные частицы вяжущего, продукты сгорания топлива.

Для предупреждения выделения пыли используют пылеулавливающие установки (циклоны), влажные газоочистители, рукавные фильтры. Собранная пыль может быть использована на АБЗ путем возвращения ее в технологическую систему в качестве минерального порошка. Участки пылеобразования и пылевыведения должны надежно укрываться.

В разных странах существуют требования по ограничению пылевыведения, нормируемые в мг/м³ воздуха: Австрия – 20, Бельгия – 50, Дания 20–40, Германия – 150, Италия – 20, Японии – 200–500,

Нидерланды – 10–30, Испания – 200, Швеция – 20, Швейцария – 50, Канада – 120.

При производстве асфальтобетона образуются органические (СОК – суммарные органические компоненты) и неорганические газы (диоксид серы – SO_2 , окислы азота – NO_x , окись углерода – CO , диоксид углерода – CO_2).

Диоксид серы может образовываться при использовании в качестве топлива на АБЗ мазута или бурого угля, она является составляющей кислотных дождей. Окись азота образуется при работе форсунки сушильного барабана, NO_x способствует образованию смога и «кислотных дождей». Выбросы этих газов на АБЗ обычно не превышают предельно допустимых значений. Образование CO связано с неполным сгоранием топлива.

Выделение органических соединений вызывается нагревом каменных материалов в сушильных барабанах, а также нагревом битума и старого асфальтобетона при его регенерации. Органические соединения влияют на содержание озона в атмосфере и усиливают действие солнечного излучения, образуют в атмосфере «озоновые дыры». Выброс этих соединений усиливается при перегреве. Признаком перегрева является образование голубого дыма при нагреве битума и фрезеровании асфальтобетонного покрытия.

Особо опасными являются выделения *полициклических ароматических углеводородов (ПАУ)*. На современных АБЗ выделение органических соединений не превышает 150 мг/Нм^3 . Допускаемые предельные газовые выделения в разных странах колеблются в широких пределах. Например в Дании, Нидерландах выделение SO_2 не должно превышать $(135–180) \text{ мг/Нм}^3$, в Испании – 1700 мг/Нм^3 , Франции – 3400 мг/Нм^3 , Португалии – 5300 мг/Нм^3 .

Выделение NO_x , в мг/Нм^3 не должно превышать в Дании, Нидерландах и Швейцарии – 180–250, в Испании – 575, Франции – 500, Португалии – 1500. Что касается ПАУ, то нет единой системы их нормирования: в Канаде их должно быть меньше $0,2 \text{ мг/Нм}^3$, во Франции менее $0,50 \text{ г/час}$, Нидерландах, Германии и Италии – $0,1 \text{ мг/Нм}^3$, Швеции – $0,1 \text{ мг/Нм}^3$.

Нормируемый Европейской Ассоциацией производителей асфальтобетонных смесей (ЕАРА) уровень выброса твердых частиц составляет $20–100 \text{ мг/Нм}^3$, SO_2 – 500 мг/Нм^3 , NO_x – 500 мг/Нм^3 .

14.2. Вредные для человека выбросы при производстве асфальтобетонных смесей

Признаком вредных выбросов являются запахи, которые количественно трудно измерить. Источником специфического запаха на АБЗ является битум. Он возникает при выгрузке битума в битумохранилища; при заполнении битумоплавильных котлов; при обезвоживании и выдерживании битума в битумоплавильных котлах; при выгрузке асфальтобетонных смесей в скиповые ковши, автосамосвалы; при перегрузке смеси во время подачи в асфальтоукладчик и укладке их асфальтоукладчиком. Запах сопутствует и регенерации асфальтобетона на месте производства работ и на АБЗ. Снижение уровня запаха достигается использованием местной вентиляции и высоких труб.

Источником загрязнения на АБЗ также являются сточные воды, попадающие в грунтовые воды. Для их уменьшения целесообразно предупреждать контакт и перемешивание каменных материалов с осадками, поскольку в некоторых минеральных материалах, шлаках и других вторичных продуктах производства имеются вещества (включения), содержание которых в грунтовых водах и почве должно быть ограничено; обеспечивать отвод жидких осадков; предупреждать утечку охлаждающих жидкостей; утилизировать цистерны для хранения горючих растворителей и различных добавок после их выхода из строя; транспортировать составляющие асфальтобетона средствами, обеспеченными укрывающими тентами.

В соответствии с мировой тенденцией по защите окружающей среды, отраженной в Киотских соглашениях, ЕАРА приняла документ, который предусматривает эффективное удовлетворение требований охраны природы в дорожной индустрии. В частности, разработаны рекомендации по предельным выбросам: твердых частиц – не более 20/100 мг/Нм³; SO₂ – 500 мг/Нм³; NO_x – 500 мг/Нм³. В США принят «Закон о чистом воздухе». Выбросы, связанные с производством асфальтобетонных смесей, приведены в соответствие с этим законом. В США нормируют предельно допустимое годовое количество для каждого отдельного производства. В соответствии с этим в США предельные выбросы SO₂, NO_x, углерода и свинца не должны превышать 100 т/год каждого. Удельный вес выбросов АБЗ в США невелик, поскольку, несмотря на большие

объемы производства, время работы АБЗ в год не превышает 1000 часов (125 смен). За год АБЗ выбрасывают полициклических ароматических углеводородов около 0,1 т. Выбросы АБЗ США не превышают 0,1 % всех стационарных источников в стране.

На второй стадии асфальтовых технологий – укладке и уплотнении асфальтобетонных смесей вредные испарения (дымы) включают неорганическую часть (пыль минеральных материалов) и органические вещества, выделяющиеся из битума. Последние содержат ПАУ. Наиболее вредными для человека являются ПАУ, которые содержат 4 и более колец (табл.14.1).

Таблица 14.1

Содержание полициклических ароматических углеводородов в вяжущих

Наименование ПАУ	Содержание ПАУ (мг/кг) в	
	битуме	дегте
Пирен	0,2–4,9	24–50
Бензо(α) пирен	0,2–5,1	10–450
Перилен	0,4–9,7	2650
Антрацен	0,35–5,3	1700
Коронен	0,1–4,0	700

В таблице приведены данные по содержанию ПАУ в битумах и дегтях. Содержание вредных ПАУ в дегтях в сотни раз больше, чем в битуме. В связи с этим дегти – продукты перегонки каменного угля, ранее широко применяемые для производства дегтебетона, в настоящее время запрещены. Работа с дегтями приводила к возникновению широкого спектра различных заболеваний, самым опасным из которых был рак.

В результате лабораторных исследований, выполненных «Центром международных исследований по раковым заболеваниям» под эгидой «Всемирной организации здоровья», было сделано заключение, что битум (группа 3) не является канцерогенным для человека; экстракты, парокрекингвые и окисленные битумы (группа 2) могут быть канцерогенными для человека; каменноугольный деготь (группа 1) – опасно канцерогенен для человека. Наиболее подверженными действию паров битума являются рабочие-гидроизоляционщики и дорожные рабочие, непосредственно контактирующие с парами битумов.

Специальные исследования, направленные на установление опасности заболеваний дорожных рабочих раком легких, выполненные с участием 15 стран ЕС, привели к заключению, что наибольшее воздействие асфальтобетонных испарений (около $1,5 \text{ мг/м}^3$) испытывают машинисты асфальтоукладчиков; регулировщики толщины слоя ($0,9 \text{ мг/м}^3$); разнорабочие, разравнивающие слой ($0,8 \text{ мг/м}^3$), и машинисты катков ($0,8 \text{ мг/м}^3$).

Главным способом уменьшить такое воздействия является снижение технологической температуры смешения, укладки и уплотнения асфальтобетонной смеси. Возрастание температуры на каждые 12°C приводит к увеличению выбросов в 2 раза. Это находится в прямой взаимосвязи с уровнем расхода топлива и выбросов CO_2 в атмосферу. Все это стало мощным толчком для развития энерго- и ресурсосберегающих, санитарно- и природоохранных технологий, к которым относятся теплые, холодные и эмульсионные технологии (рис. 9.9).

Исследования в области охраны здоровья рабочих на асфальтобетонном производстве продолжают. Наметившиеся в этих исследованиях тенденции свидетельствуют о том, что асфальтобетонные смеси, полученные по современным технологиям, не оказывают вредного канцерогенного воздействия на здоровье дорожных рабочих.

В то же время необходимо строго проверять безопасность множества отходов, которые могут применяться в дорожных конструкциях, поскольку некоторые из них могут оказаться опасными. Это касается использования новых сырьевых материалов, не прошедших соответствующую проверку, отработанных масел, различных разжижителей, зол-уноса от сжигания мусора, резиновой крошки из изношенных шин и даже старого регенерируемого асфальтобетона.

Оценка эффекта от замены традиционных составляющих новыми или альтернативными должна быть комплексной, чтобы, решая проблемы ресурсосбережения, не создавать новую опасность в отношении здоровья человека и охраны окружающей среды.

Примером ошибочного подхода к проблеме использования отходов является решение об обязательном включении 20 % резины промышленных шин в горячие асфальтобетонные смеси и последующий затем двухлетний мораторий на применение резиновой крошки в асфальтобетонных смесях в США. Исследования, выпол-

ненные в Нидерландах, показали возможность повторного использования старого асфальтобетона с резиновой крошкой, если ее содержание не превышает 8–10 % от общей массы асфальтобетонной смеси.

Опасным для здоровья человека является повышенный *уровень шума*. Источниками шума на АБЗ являются форсунки, сушильные барабаны, воздухоборники, грохоты, вентиляторы, конвейеры, транспортеры и вспомогательное оборудование, в частности, мельницы цехов по производству минерального порошка, дробилки дополнительного дробления щебня. Понижают уровень шума шумопоглотители и различные экраны, преимущественно около асфальто-смесительных установок. Нормируемый уровень шума в разных странах колеблется в пределах от 30 до 70 дБ(А)*. Требования к шумообразованию в дневное и ночное время изменяются в пределах 10–15 дБ(А).

В Европейском Союзе с 2007 г. действует Регламент по регистрации, оценке, разрешению и ограничению химических веществ (REACH). Этот Регламент распространяется не только на химические вещества, используемые в производственных процессах, но и на выпускаемую продукцию. Под контроль REACH попадают практически все дорожные материалы. Особенно это касается битумных вяжущих, которые до последнего времени считались токсично не опасными. Но требования REACH по обеспечению безопасности систематически пересматриваются в сторону их ужесточения. Вполне вероятно, что эти ужесточения могут распространиться на технологии получения и применения дорожных битумов.

* 1 дБ(А) – уровень звукового давления, двадцать десятичных логарифмов отношения которого к условному порогу давления (равному $0,0002 \text{ Н/м}^2$), принимаемому за нулевой уровень, равно 1 дБ(А).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изложенная здесь вторая часть учебника «Дорожные битумные вяжущие и дорожные асфальтобетоны» посвящена самым распространённым в мире и элитным дорожным материалам – бетонам на битумных вяжущих.

В качестве методологической основы изложения принят принцип взаимосвязи состава, структуры и состояния асфальтобетонов с их свойствами. Для обоснования этой взаимосвязи были использованы классические положения коллоидной химии, физико-химической механики, физико-химии и механики полимеров, а также реологии подобных по природе материалов. Представленный в учебнике анализ свойств асфальтобетонов имеет принципиальное значение, поскольку при высоких летних температурах он является вязкопластичной системой, а при низких зимних температурах – упруго-хрупкой. Более того, к асфальтобетонам применим принцип температурно-временной аналогии, согласно которому одни и те же значения реологических показателей могут быть получены при разных сочетаниях времени (или частоты) деформирования (или нагружения) и температуры.

Усвоение изложенных в учебнике сведений, методов, принципов и закономерностей изменения свойств асфальтобетонов под действием различных внутренних (структурных), внешних (транспортное воздействие и климатических факторов) позволяет найти убедительный ответ на вопросы: какой асфальтобетон в аспекте его гранулометрического состава, вида применяемого вяжущего, целесообразности использования добавок в нем, должен применяться в конкретных климатических и эксплуатационных условиях, и как избежать типичных для асфальтобетонных покрытий разрушений: волн, колеи и наплывов, выкрашивания, шелушения и выбоинообразования, температурных и усталостных трещин, дефектов, вызванных старением асфальтобетона.

Автор отдаёт себе отчёт в том, что в некоторых случаях излагаемый материал выходит за рамки официальных учебных программ. Но, будучи уверенным, что эти программы будут совершенствоваться, и осознавая необходимость обладания знаниями в области ас-

фальтовых технологий на уровне западноевропейских и североамериканских достижений, он считает такой подход оправданным.

Благодаря этому учебник может быть полезным для магистров, аспирантов и соискателей, особенно в связи с вводимой в стране новой системой градации ученых степеней. Он также может быть подспорьем при изучении смежных дисциплин в области знаний «Архитектура и строительство», специальность «Строительство и гражданская инженерия», специализация «Строительство автомобильных дорог и аэродромов».

ЛИТЕРАТУРА

Рыбьев И.А. Асфальтовые бетоны / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1969. – 368 с.

Гохман Л.М. Комплексные органические вяжущие материалы на основе блоксополимеров типа СБС / Л.М. Гохман. – М.: ЗАО «ЭКОН-ИНФОРМ», 2004. – 510 с.

Испытания дорожно-строительных материалов: лабораторный практикум: учебное пособие / В.А. Золотарев, В.И. Братчун, А.В. Космин и др.; под ред. В.А. Золотарева. – Х.: ХНАДУ, 2011. – 368 с.

Дорожный теплый асфальтобетон / И.В. Королев, Е.Н. Агеева, В.А. Головкин, Г.Р. Фоменко. – К.: Вища школа. – 1984. – 200 с.

Дорожно-строительные материалы: учебник для вузов / И.М. Грушко, И.В. Королев, И.М. Борщ, Г.М. Мищенко. – М.: Транспорт, 1991. – 356 с.

Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев. – М.: Транспорт, 1985. – 352 с.

Золотарев В.А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В.А. Золотарев. – Х.: Вища школа, 1977. – 116 с.

Дорожные асфальтобетоны. Избранные труды. Том 3 / В.А. Золотарев. – С.Пб.: Славутич, 2015. – 184 с.

Кирюхин Г.Н. Покрытия из щебеночно-мастичного асфальтобетона / Г.Н. Кирюхин, Е.А. Смирнов. – М.: ООО «Издательство "Элит"», 2009. – 176 с.

Дорожные битумные вяжущие и асфальтобетоны: учебник: в 2 ч. Часть 1. Дорожные битумные вяжущие / В.А. Золотарев. – Х.: ХНАДУ, 2014. – 180 с.

Les enrobes bitumineux. Tome 1. – Paris: RGRA, 2001. – 228 p.

Les enrobes bitumineux. Tome 2. – Paris: RGRA, 2003. – 380 p.

Радовский Б.С. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям: монография / Б.С. Радовский, Б.Б. Телтаев. – Алма-Ата, БІІМ, 2013. – 152 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	
1. Асфальтобетон – общие представления, классификация, требования к материалам	
1.1. Классификация асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов	
1.2. Требования к материалам для асфальтобетонных смесей.....	
2. Физико-механические свойства асфальтобетонов	
2.1. Особенности работы асфальтобетона в покрытии и виды разрушений	
2.2. Физические свойства асфальтобетона	
2.3. Механические свойства асфальтобетона	
2.4. Европейская система оценки качества асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов.....	
3. Структура асфальтобетонов и роль материалов в ее формировании	
4. Формирование механических свойств асфальтобетонов.....	
5. Физико-химические основы получения асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов	
5.1. Перемешивание асфальтобетонных смесей	
5.2. Уплотнение асфальтобетонных смесей	
6 Технология производства асфальтобетонных смесей на АБЗ.....	
7. Реологические свойства, временные зависимости прочности и усталость асфальтобетонов.....	
7.1. Реологические свойства асфальтобетонов.....	
7.2. Влияние скорости деформирования на прочность асфальтобетона.....	
7.3. Циклическая усталость асфальтобетона	
7.4. Статическая усталость асфальтобетона	
8. Старение асфальтобетона и его повторное использование.....	
8.1. Особенности старения асфальтобетона	
8.2. Регенерация асфальтобетонных смесей.....	
9. Разновидности смесей и бетонов на битумных вяжущих.....	
9.1. Холодные асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны....	

9.2. Холодные асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны на битумных эмульсиях.....	
9.3. Литые асфальтобетонные смеси и асфальтобетоны	
9.4. Литые асфальтобетоны, применяемые за рубежом	
9.5. Литые холодные эмульсионно-битумные смеси на основе битумных или битумо-полимерных эмульсий.....	
9.6. Асфальтобетоны из теплых асфальтобетонных смесей	
10. Асфальтополимербетонные смеси и асфальтополимербетоны	
11. Высокощебенистые асфальтобетоны	
11.1. Щебеночно-мастичные смеси и асфальтобетоны	
11.2. Дренирующий асфальтобетон.....	
11.3. Асфальтобетоны для нижних слоев покрытий и оснований	
12. Асфальтоцементные бетоны	
12.1. Эмульсионно-цементные бетоны	
12.2. Асфальтоцементобетоны.....	
13. Цветные асфальтополимербетоны и термопластбетоны....	
14. Асфальтобетонные смеси: их влияние на здоровье человека и окружающую среду	
14.1. Асфальтобетонные смеси и окружающая среда	
14.2. Вредные для человека выбросы при производстве асфальтобетонных смесей	
Заключение.....	
Литература	

Навчальне видання

ЗОЛОТАРЕВ В _____ А _____

ДОРОЖНЫЕ БИТУМНЫЕ ВЯЖУЩИЕ И АСФАЛЬТОБЕТОНЫ

Часть 2

ДОРОЖНЫЕ АСФАЛЬТОБЕТОНЫ

Учебник

(російською мовою)

Відповідальний за випуск *В.О. Золотарьов*

Редактор *О.Ю. Шапіная*

Комп'ютерна верстка *Н.В. Журавльової*

Дизайн обкладинки

План 2016 р. Поз 4(н.п.).

Підписано до друку _____ р. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.

Гарнітура Times New Roman Cyr. Віддруковано на ризографі

Ум.друк. арк. _____. Обл.-вид.арк. _____.

Зам. № _____. Наклад _____ пр. Ціна договірна

ВИДАВНИЦТВО

Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Видавництво ХНАДУ, 61002, Харків-МСП, вул. Петровського, 25.

Тел. /факс: (057)700-38-64; 707-37-03, e-mail: rio@khadi.kharkov.ua

Свідоцтво Державного комітету інформаційної політики, телебачення та радіомовлення України про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції, серія ДК №897 від 17.04 2002 р.