Министерство транспорта Российской Федерации
Российский дорожный научно-исследовательский институт

ПЕРЕДОВОЙ ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ. ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА

Информационный сборник

Казань
Издательство «Бук»
2019

УДК 625.855.3
ББК 35.314
П27

Авторы:
к. т. н. **Полякова** Светлана Владленовна, **Рубинская** Наталия Николаевна,**Сандомирская** Ольга Дмитриевна, к.б.н. **Тактарова** Юлия Валерьевна

Рецензент:
Васильев Юрий Эммануилович, доктор технических наук, доцент (Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))

П27 **Передовой зарубежный опыт. Оценка эксплуатационных характеристик асфальтобетона** : информационный сборник / [С. В. Полякова, Н. Н. Рубинская, О. Д. Сандомирская, Ю. В. Тактарова] ; М-во транспорта Рос. Федерации, Рос. дорожный науч.-исследовательский ин-т. — Казань : Бук, 2019. — 154 с.

ISBN 978-5-00118-335-8.

В сборнике представлены общие сведения об основных методах исследований (испытаний) регламентируемых ПНСТ в области эксплуатационных характеристик (ЭХ) асфальтобетонов, приведен анализ зарубежного опыта (США, Германии, Новой Зеландии и др.) в вопросах проектирования оптимальных составов асфальтобетонных смесей и прогнозирования долговечности асфальтобетонных покрытий с использованием наиболее значимых эксплуатационных характеристик асфальтобетона. Представлена информация по алгоритмам исследований в данном направлении, позволяющим прогнозировать качественные преимущества различных видов асфальтобетонов. Материалы сборника предназначены для инженерно-технических и научных работников, осуществляющих свою деятельность в области проектирования, строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий, а также для студентов, магистров и аспирантов, изучающих дорожное материаловедение.

УДК 625.855.3
ББК 35.314

ISBN 978-5-00118-335-8

© Полякова С. В., Рубинская Н. Н., Сандомирская О. Д., Тактарова Ю. В., 2019
© Оформление. ООО «Бук», 2019

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 5

Список сокращений 6

Введение 8

Глава 1
ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВВЕДЕННЫХ В ДЕЙСТВИЕ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТАХ (ПНСТ) НА МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОНА 11

Глава 2
АКТУАЛИЗАЦИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАБОЧЕЙ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ ПО АСФАЛЬТОБЕТОННЫМ СМЕСЯМ (ETG BMD TF UPDATE — APRIL 2016, США). РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАСЕДАНИЯ РАБОЧЕЙ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ В РАМКАХ РАССМОТРЕНИЯ ВОПРОСОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ 23

Глава 3
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АМРТ 30

Глава 4
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ БИТУМА И СМЕСИ 44

Глава 5
ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ИЛИ ЕГО СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ 61

Глава 6
ИСПЫТАНИЕ НА УСТАЛОСТНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ В АМРТ 67

Глава 7
ПЕРЕДОВОЙ ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА И МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ 76

7.1. Опыт Германии. Изменение свойств битумного вяжущего с момента его производства и в течение срока эксплуатации в асфальтобетонном покрытии 76

7.2. Опыт США. Оценка эффективности применения адгезионных добавок в асфальтобетонных смесях и асфальтобетоне 84

7.3. Повышение эксплуатационных характеристик асфальтобетона (ЭХ) путем армирования асфальтобетонных смесей синтетическими волокнами 96
7.4. Опыт Новой Зеландии. Оценка эксплуатационных характеристик теплого асфальтобетона с высоким содержанием асфальтобетонного гранулята.....115

Приложение..... 144

ПРЕДИСЛОВИЕ

В целях увеличения межремонтных сроков службы асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог, планируется проведение ряда масштабных мероприятий, в том числе оснащение подведомственных федеральных казенных и региональных учреждений прогрессивным лабораторным испытательным оборудованием, позволяющим осуществлять проектирование состава и оценку качества эксплуатационных характеристик (ЭХ) асфальтобетона в соответствии с новыми нормативно-техническими документами. В связи с этим важное практическое значение имеет распространение зарубежного опыта о результатах научных отчетов, проектов, статей и докладов, способствующих инновационному развитию отечественного дорожного хозяйства в условиях грандиозного обновления документов по стандартизации. Использование передового зарубежного опыта в области качества конечного продукта (асфальтобетона) и результатов рационального применения прогрессивных методов испытаний позволит рекомендовать алгоритмы исследований для оптимизации составов асфальтобетонных смесей с учетом региональных условий эксплуатации дорожных покрытий и окажет информационную поддержку специалистам дорожной отрасли.

В рамках работ над информационным сборником осуществлялся поиск, сбор наиболее значимой научно-технической информации о передовом зарубежном опыте по оценке эксплуатационных характеристик горячих асфальтобетонов за последние пять лет с последующим переводом, обобщением и сопоставительным анализом научно-исследовательских статей и отчетных материалов. Информация на иностранных языках из зарубежных источников является малодоступной и содержит большое количество специализированных терминов и определений, перевод которых представляет определённые сложности даже для специалистов.

Представленные материалы могут быть использованы при решении широкого спектра задач при проектировании, строительстве и эксплуатации асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог. Информация, содержащаяся в информационном сборнике, рассчитана на представителей федеральных и региональных органов исполнительной власти, руководителей и специалистов дорожно-строительных лабораторий, проектировщиков и технических экспертов и окажется полезной для специалистов дорожной отрасли, вовлеченных в процесс реализации национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги» за счет широкого применения перспективного зарубежного опыта.

Информационный сборник «Передовой зарубежный опыт. Оценка эксплуатационных характеристик асфальтобетона» подготовлен сотрудниками ФАУ «РОСДОРНИИ» в инициативном порядке, а статус данного руководства носит рекомендательный характер и распространяется в интересах обмена информацией.

С уважением,
Генеральный директор ФАУ «РОСДОРНИИ» А. П. Варятченко

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГОСТ — Межгосударственный стандарт, принятый Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации СНГ

ГОСТ Р — национальный государственный стандарт РФ

ОДМ — отраслевой методический документ

ПАВ — поверхностно-активное вещество

ПБВ — полимерно-битумное вяжущее

ПНСТ — предварительный национальный стандарт

ЭХ — эксплуатационные характеристики асфальтобетона

AASHTO (American Association of State Highway and Transport Official) — Американская ассоциация руководителей государственных автомагистралей и транспорта

ALT (Accelerated Load Testing) — испытания ускоренным нагружением дорожных одежд

AMPT — испытательная установка для определения динамического модуля упругости и числа текучести

ASTM (American Society for Testing & Materials) — американская международная организация, разрабатывающая и издающая добровольные стандарты для материалов, продуктов, систем и услуг (аналог ГОСТа)

APA — анализатор колееобразования асфальтобетонного покрытия

APT (accelerated pavement testing) — ускоренное тестирование дорожного покрытия

BMD (Balanced Mix Design) — проектирование сбалансированных асфальтобетонных смесей

COST — Межправительственная рамочная программа европейского сотрудничества по науке и технике

DSR (Dynamic Shear Rheometer) — Динамический сдвиговый реометр

DCT — определение энергии разрушения образца

EAPA (European Asphalt Pavement Association) — Европейская ассоциация асфальтобетонных покрытий

ESAL — расчётная нагрузка при движении, млн. (эквивалентная стандартная нагрузка на ось)

ETG BMD TF Update — рабочая экспертная группа по асфальтобетонным смесям (США)

FHWA — Федеральная администрация магистралей (шоссейных дорог) (США)

FN (flow number) — число текучести. Количество циклов нагружения, при котором возникает осевая деформация с постоянной скоростью

FPBT (Four Point Bend Test) — метод испытаний на 4-х точечный изгиб

G* — комплексный (суммарный) модуль упругости при сдвиге

HMA (Hot Mix Asphalt) — горячая асфальтобетонная смесь

HTPG — высокотемпературная характеристика вяжущего по PG

IDT — метод определения прочности на растяжение и жесткости

LTPG — низкотемпературная характеристика вяжущего по PG

MT (Marshall test) — тест по Маршаллу

NAPA (National Asphalt Pavement Association) — национальная ассоциация асфальтобетонных покрытий

NCHRP (National Cooperative Highway Research Program) — национальная совместная программа исследований покрытий

PAV (Pressure aging vessel) — метод оценки долгосрочного старения вяжущего под давлением

PG (Performance Grade (binder grading to SHARP specification)) — градация вяжущего, основанная на его механических характеристиках при критических температурах и условиях старения по методологии «Superpave»

PMB (Polymer-Modified Binder) — полимерно-битумное вяжущее

RAP (Reclaimed asphalt pavement) — регенерированное (переработанное) асфальтобетонное покрытие

Rd (rut depth) — средняя глубина колеи

RTFO (Rolling thin film oven) — метод оценки краткосрочного старения вяжущего

SBS (Styrene-Butadiene-Styrene) — блок-сополимер стирола и бутадиена

SCB (semi-circle bending) — метод испытания на изгиб полуобразцов асфальтобетона

SHRP (Strategic Highways Research Program) — стратегическая исследовательская программа по автомагистралям

SMA (Stone Mastic Asphalt) — щебеночно-мастичный асфальтобетон

SST (Superpave Shear Tester) — метод оценки деформации сдвига асфальтобетона

STA-Hamburg — гамбургский тест колееобразования

Superpave — асфальтобетонное покрытие с наилучшими эксплуатационными характеристиками

TSR (Tensile strength ratio) — соотношение пределов прочности на растяжение асфальтобетона во «влажном» и «сухом» состоянии

VFA (Voids filled with asphalt) — воздушные пустоты, заполненные битумным вяжущим

VMA (Voids in mineral aggregate) — воздушные пустоты в минеральном материале

WMA (Warm Mix asphalt) — тёплая асфальтобетонная смесь

WTS — угол наклона кривой колееобразования

ВВЕДЕНИЕ

В связи с увеличением стоимости дорожно-строительных материалов актуальной задачей является применение новых инновационных решений с возможностью широкого использования местных материалов, отходов промышленности и др. продуктов производства, позволяющих при сохранении уровня качества конечного продукта (асфальтобетона) сократить материальные затраты на строительство, ремонт и содержание автомобильных дорог. Вопрос влияния структуры и свойств такого рода материалов на долговечность асфальтобетонных покрытий исследован недостаточно. В последние годы в отечественной практике дорожного хозяйства уделялось большее внимание качеству исходных материалов. В рамках работ по оценке технической эффективности зачастую проводились сравнительные испытания промежуточных продуктов (битумных вяжущих, минеральных материалов) и в меньшей степени оценивались показатели конечного продукта. В случае использования в асфальтобетоне новых видов минеральных и органических вяжущих материалов, которые в ряде случаев отличаются по своим свойствам от традиционных, необходимо комплексное, всестороннее изучение не только их физико-механических свойств, но оценка изменения качества асфальтобетона в процессе срока службы автомобильной дороги. К одной из причин недостаточной комплексной оценки технической эффективности новых материалов можно было бы отнести отсутствие до настоящего времени в дорожном хозяйстве современных и доступных высокоточных средств измерения, испытательного оборудования и методов испытаний, позволяющих оценивать поведение материала при различных температурных режимах и нагрузках, используя неразрушающие принципы исследований асфальтобетона. В настоящее время за короткий период введено и разрабатывается огромное количество методов испытаний (ГОСТ, ПНСТ, ГОСТ Р, ОДМ) на дорожные асфальтобетонные смеси и асфальтобетон. Большая часть документов разработана с учетом положений зарубежных стандартов. Таким образом, появилась возможность не только определять прочностные характеристики асфальтобетона в момент разрушения, но и моделировать процессы его поведения до разрушения и тем самым *прогнозировать срок службы дорожного покрытия*. Уникальное лабораторное оборудование, позволяющее прогнозировать эксплуатационные характеристики асфальтобетона (ЭХ), требует привлечения к данному процессу высококвалифицированных специалистов-испытателей и серьезной методической поддержки. В настоящее время в открытых источниках информации практически отсутствуют отечественные результаты научно-исследовательских работ, позволяющих выбирать наиболее перспективные направления исследований и ориентироваться на экспериментальные данные в вопросах прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

Мировой зарубежный опыт подтверждает, что в настоящее время накоплен огромный объем исследований, подтверждающих эффективность применения новых технических и технологических решений, в том числе в области использования местных материалов взамен традиционных. Оптимальное проектирование состава асфальтобетонных смесей с применением местных материалов (в ряде случаев характеризующихся более низким уровнем качественных показателей свойств) и выбор наиболее эффективных технологических режимов произ-

водства, оптимальных составов смесей путем сравнительной оценки комплекса эксплуатационных характеристик асфальтобетона является сложной, но перспективной научной задачей. Реализация данного направления осуществляется, прежде всего, научными компетентными организациями, в рамках исследований которых прогнозируется срок службы асфальтобетонного покрытия. Исследовательский подход заключается в обширной экспериментальной работе и реологическом моделировании процесса. В рамках зарубежных исследований уделяется значительное внимание изучению характера развития деформаций в асфальтобетоне в зависимости от воздействия нагрузки транспортных средств, погодно-климатических условий, качественных показателей применяемых материалов, качества укладки асфальтобетонных смесей, уровня эксплуатации покрытия и др.

Прогнозирование долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий является сложнейшей задачей и в первую очередь это связано с гетерогенной системой асфальтобетона. Сложность данного вопроса связана: с трудностью описания зависимостей факторов внешнего воздействия (транспортных нагрузок, погодно-климатических и др.); с недостаточно полно изученными внутренними физико-механическими процессами в асфальтобетоне как сложном композиционном материале; *отсутствием необходимого количества статистического материала, полученного в процессе эксплуатационных исследований* и др. Решение вопроса прогнозирования долговечности асфальтобетонных покрытий должно осуществляться по наиболее значимым показателям долговечности с учетом множества факторов, влияющих на динамику процессов развивающихся в асфальтобетоне.

К основным факторам, оказывающим влияние на различные виды разрушения дорожных асфальтобетонных покрытий, относят:

- воздействие воды (влаги);
- повышенные транспортные нагрузки;
- неблагоприятные климатические условия: в зимний период — замерзание-оттаивание дорожных одежд (особенно нежесткого типа), что вызывает снижение несущей способности земляного полотна в период оттаивания; в летний период — воздействие солнечного излучения на поверхностные слои обуславливает старение битума, что вызывает появление разнонаправленных термических трещин;
- риск образования колеи в слоях износа, которому подвержены верхние слои покрытий автомобильных дорог со средней и высокой интенсивностью движения и др.

В представленном информационном сборнике значительное место занимают научные статьи, в том числе, посвященные вопросам колееобразования, усталостного растрескивания, трещинообразования асфальтобетона. Верхние слои покрытий нежесткого типа подвергаются сложному процессу трещинообразования, например, смешанному разрушению (т. е. сочетанию открытого разрушения и разрушения при сдвиге). До настоящего времени большинство исследователей рассматривали только первый вид разрушений (открытый). Для понимания процесса разрушения асфальтобетонного покрытия и более точного проектирования состава смесей необходимы лабораторные и опытно-экспериментальные исследования с применением высокоточного и современного оборудования.

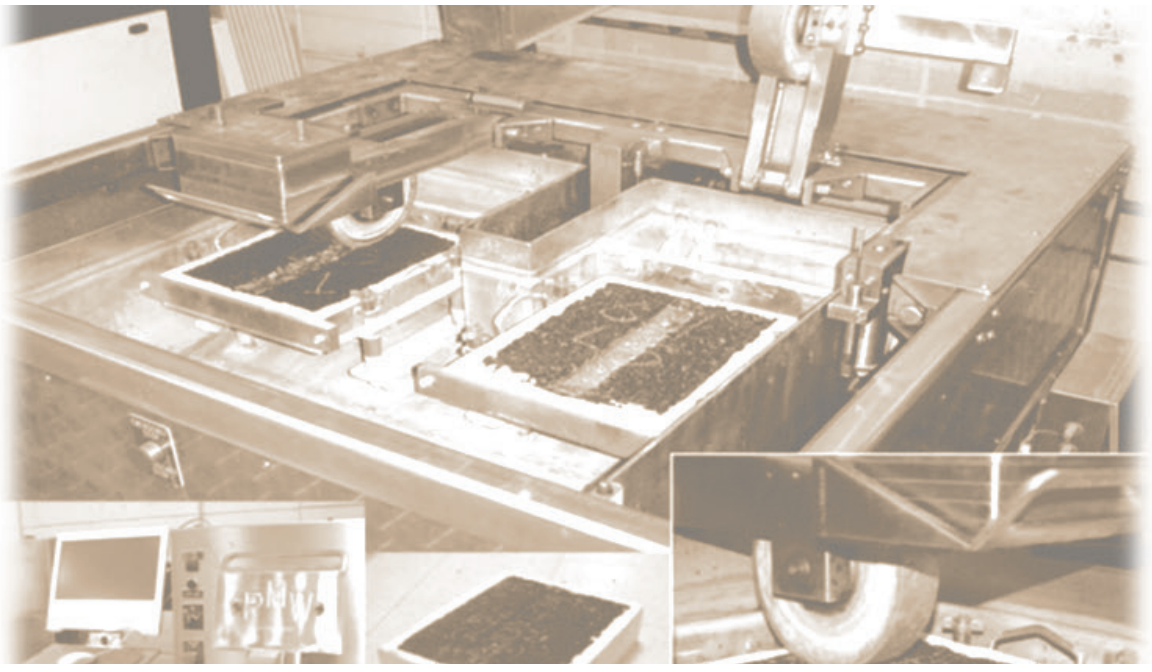
Особое внимание в сборнике уделяется вопросам усталостного растрескивания, которое является одним из основных повреждений асфальтобетонных покрытий. Усталостное растрескивание обычно происходит при резкой смене температур, вследствие воздействия повторяющихся транспортных нагрузок, вызывающих растягивающие напряжения и деформации в асфальтобетонных покрытиях. Под воздействием циклических (повторных) напряжений образуются микротрещины. После ряда воздействий транспортных нагрузок микротрещины развиваются и распространяются в покрытии. Усталостное трещинообразование слоя приводит к образованию продольных трещин в зоне полос наката, сначала незначительных, а затем все более глубоких.

Проведен целый ряд зарубежных исследований с целью повышения коррозионной стойкости асфальтобетонов, от которой в первую очередь зависит уровень эксплуатационных характеристик покрытия в неблагоприятных условиях повышенной влажности. В ходе работ проводилась оценка эффективности влияния различных типов адгезионных добавок с предоставлением рекомендаций по применению и др.

Для лучшего понимания процесса разрушения асфальтобетонного покрытия и более точного проектирования состава смесей, особенно в условиях высокоинтенсивных нагрузок, наиболее целесообразным является оценка его поведения при разрушении в ходе экспериментальных исследований в условиях максимального моделирования процесса эксплуатации покрытия.

В зарубежной практике для этих целей используются специальные технические средства для ускоренного испытания конструкций дорожных одежд и покрытий (например, типа APT — accelerated pavement testing). Так, в рамках Межправительственной рамочной программы европейского сотрудничества по науке и технике (COST) для координации европейских исследований, финансируемых на национальном уровне, в 2000 г. была создана программа COST 347. Основная цель программы — разработка европейских норм и правил для оптимизации использования технических средств, предназначенных для ускоренного испытания конструкций дорожных одежд и покрытий, ALT (Accelerated Load Testing), и оптимизации применения результатов, полученных с их помощью. Общепринято, что ускоренное испытание нагружением является одним из основных способов изучения поведения дорожной одежды.

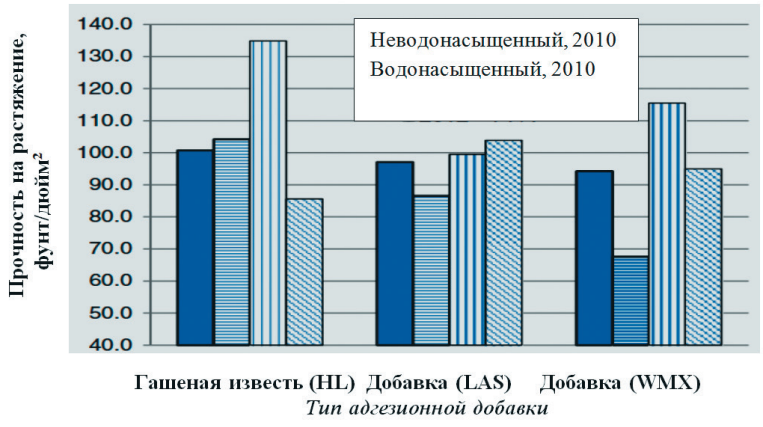
В рамках работ по программе COST Action 347, направленных на проведение испытания ускоренным нагружением дорожных одежд (ALT), приняли участие 18 европейских стран, а также Комитет TRB (Бюро транспортных исследований, США), при тесном сотрудничестве с центрами ALT в Южной Африке, Австралии и Новой Зеландии. Для освещения результатов работы был налажен регулярный выпуск информационного бюллетеня (доступный на веб-сайте COST 347), а на основе электронной почты организован форум для дискуссии. Разработанная система позволила обмениваться информацией по ALT в атмосфере сотрудничества, привела к уменьшению дублирования исследований и позволила специалистам сосредоточиться на общей цели и тем самым ускорить продвижение работ в данном направлении. В *Приложении* представлены общие сведения об используемых технических средствах типа ALT (Accelerated Load Testing), применяемых в европейских странах и предназначенных для оценки эксплуатационных характеристик асфальтобетонов в дорожных покрытиях.

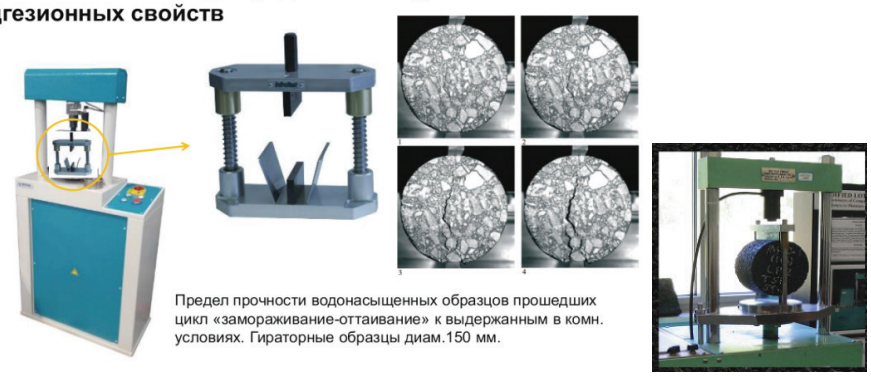


Глава 1

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ВВЕДЕННЫХ В ДЕЙСТВИЕ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫХ НАЦИОНАЛЬНЫХ СТАНДАРТАХ (ПНСТ) НА МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ АСФАЛЬТОБЕТОНА

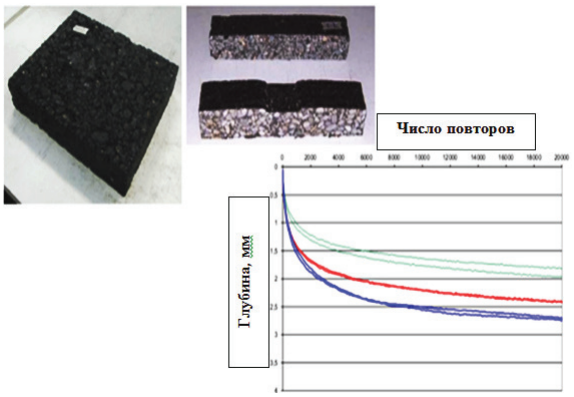
1. **ПНСТ 113–2016** Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения водостойкости и адгезионных свойств**

ПНСТ 113–2016	Разработан с учетом положений стандарта **AASHTO T 283** «Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Induced Damager»
Срок действия	с 01.06.2016 г. по 01.06.2019 г.
Область применения, указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт устанавливает метод определения водостойкости и адгезионных свойств асфальтобетона путем разрушения образца, подверженного водонасыщению и циклу «замораживание — оттаивание». Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные дорожные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев дорожной одежды.
Основные термины и определения	**Испытуемый образец** (test sample): Уплотненная асфальтобетонная смесь в виде цилиндра диаметром 150 мм и высотой от 90 до 100 мм. **Водостойкость** (moisture resistance): Отношение предела прочности при непрямом растяжении серии образцов, подверженных водонасыщению и циклу «замораживание — оттаивание», к пределу прочности при непрямом растяжении серии образцов, выдержанных при комнатных условиях. **Цикл «замораживание — оттаивание»** (cycle of freezing-thawing): Цикл, за который образец асфальтобетона подвергается замораживанию в водонасыщенном состоянии при температуре минус (18 ± 3) °С в течение не менее 16 ч, с последующим оттаиванием в водной среде при температуре (60 ± 3) °С в течение (24 ± 1) ч.
Пример графической зависимости (схема)	

Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу. Краткое описание метода	Косвенное растяжение при расколе «бразильским методом» позволяет оценить степень снижения прочности асфальтобетона в результате агрессивного воздействия воды (влаги). Метод регламентирует один цикл «замораживания-оттаивания» образцов при заданной степени насыщения пор водой. Ограниченно водонасыщенные образцы помещают в герметичные полиэтиленовые пакеты и замораживают в течение не менее 16 часов в морозильной камере, после чего их вынимают и выдерживают в воде с температурой (60±1) °С в течение (24±1) часа. Испытания двух серий образцов на растяжение при расколе проводят при температуре (22±3) °С со скоростью деформирования 50 мм/мин. После определения отношения предела прочности при непрямом растяжении по поверхности разлома визуально определяют степень адгезии битума с минеральной частью смеси.
Общий вид испытательного оборудования	**ПНСТ 113-2016 Метод определения водостойкости и адгезионных свойств**  Предел прочности водонасыщенных образцов прошедших цикл «замораживание-оттаивание» к выдержанным в комн. условиях. Гираторные образцы диам.150 мм.

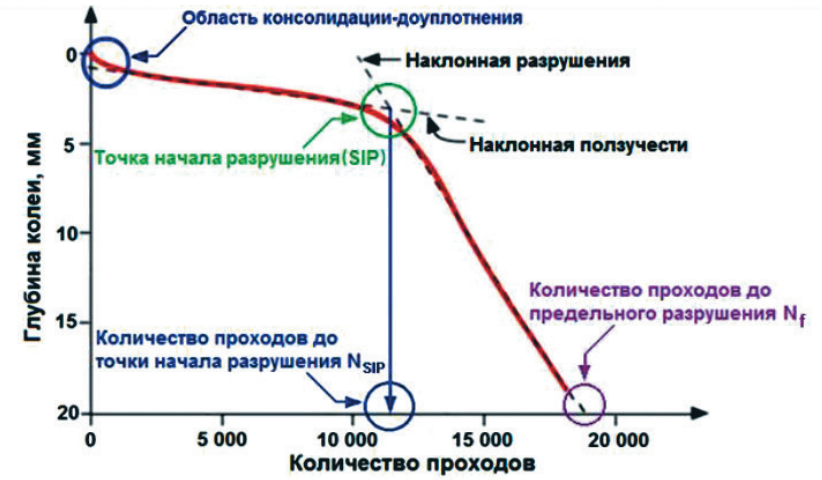
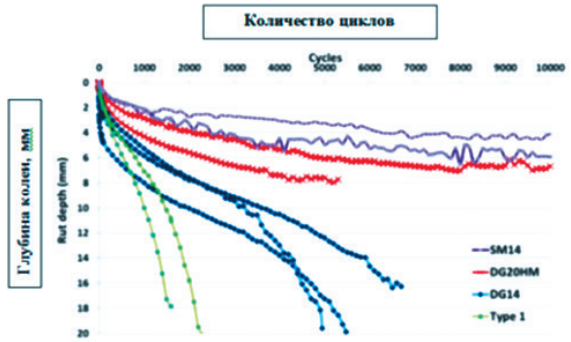
2. **ПНСТ 181–2016** Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса**

ПНСТ 181–2016	Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения стойкости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса.
Срок действия	С 01.06. 2017 до 01.06.2019
Область применения, указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт устанавливает метод определения стойкости к колееобразованию путем прокатывания нагруженного колеса с шиной. Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев автомобильных дорог общего пользования и аэродромов.
Основные термины и определения	**Глубина колеи**: Уменьшение толщины испытуемого образца относительно начального значения, вызванное повторяющимися прокатываниями нагруженного колеса. **Средняя глубина колеи, RD**: Среднеарифметическое значение глубины колеи двух или более испытуемых образцов, полученных из одной асфальтобетонной смеси. **Пропорциональная глубина колеи, PRD**: Отношение средней глубины колеи после определенного количества прохода колеса к фактической средней толщине испытуемого образца. **Образец-плита:** Уплотненная асфальтобетонная смесь в специальной установке, полученная путем уплотнения секторным вальцом или другими средствами, имитирующими уплотнение асфальтобетонной смеси при укладке на автомобильной дороге. **Испытуемый образец:** Образец установленных размеров, получаемый из вырубки или образца-плиты. **Вырубка (керн):** Образец, отобранный из асфальтобетонного покрытия путем выпиливания или выбуривания. **Цикл нагрузки:** Два прокатывания (вперед и назад) нагруженного колеса по испытуемому образцу. **Угол наклона кривой колееобразования, WTS**: Отношение средней глубины колеи к количеству циклов нагрузки, определяемое на выбранном участке нагружения.

Пример графической зависимости (схема)	
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Метод позволяет оценить глубину колеи и угол наклона кривой колеи с целью прогнозирования колееобразования в асфальтобетонном покрытии, оценить степень развития в нём пластических деформаций в связи с недостаточными каркасностью минерального заполнителя, вязкости вяжущего или низкой водостойкости асфальтобетона.
Общий вид испытательного оборудования	

3. ОДМ 218.3.098–2017 Методические рекомендации по испытанию уплотненных асфальтобетонных смесей прокатыванием нагруженного колеса по гамбургскому методу

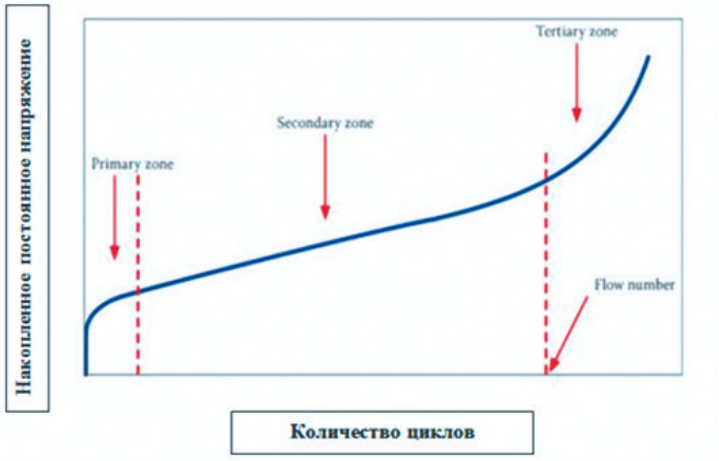
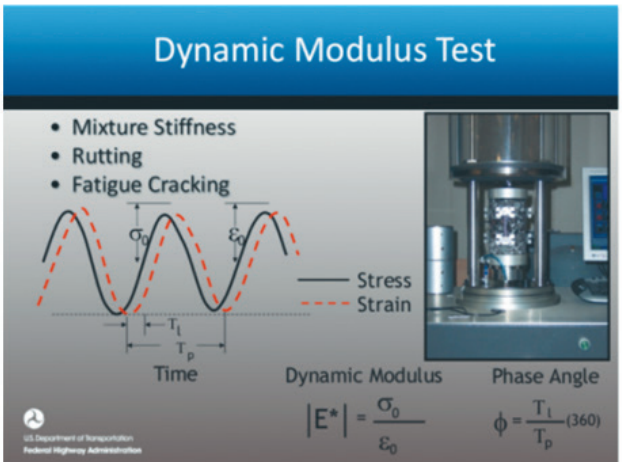
ОДМ 218.3.098–2017	Разработан с учетом основных нормативных положений **AASHTO T 324** «Hamburg Wheel-Track Testing of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA)» (Испытание уплотнённой асфальтобетонной смеси прокатыванием колеса по гамбургскому методу)
Область применения	Используется для прогнозирования склонности покрытия к разрушению, в следствии развития в нём пластических деформаций из-за слабости структуры минерального заполнителя, недостаточной вязкости вяжущего или низкой водостойкости асфальтобетона. В связи с тем, что образец нагружается в водной среде с регулируемой температурой, можно оценить влияние водной среды на устойчивость асфальтобетонного покрытия к разрушению. В данной методике измеряется глубина колеи и количество циклов проката (проходов) нагруженного колеса по образцу до его разрушения.
Основные термины и определения	**Эквивалентная одноосная нагрузка *ЭООН*** (design ESALs): Нагрузка, равная 80 кН, передаваемая на дорожное покрытие от одной оси транспортного средства. **Глубина колеи *Rd*** (rut depth), мм: Уменьшение толщины образца, вызванное циклическими проходами по нему нагруженного колеса в водной среде. **Максимальная глубина колеи *Rdmax*** (maximum rut depth), мм: Величина уменьшения толщины образца, вызванная циклическими проходами по нему нагруженного колеса в водной среде на момент завершения испытания, либо по достижению заданного количества проходов колеса, либо по достижению точки предельного разрушения ***f***.

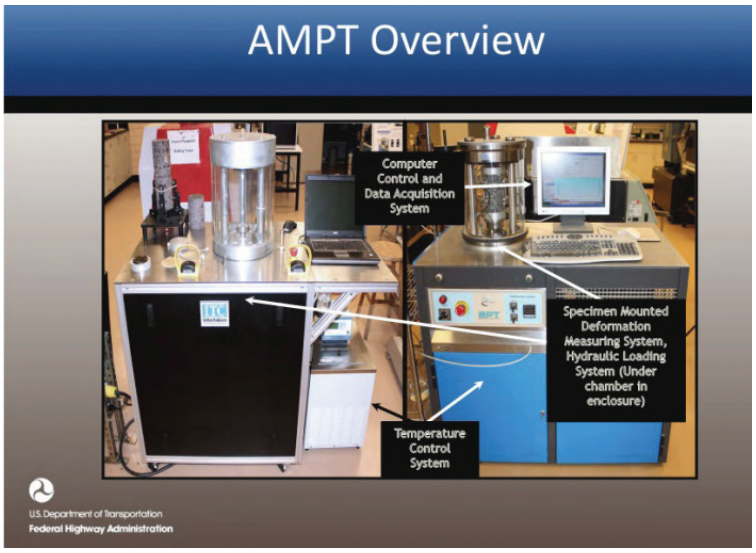
	Уклон ползучести *SC*, количество проходов/мм (creep slope) — характеризует испытываемый материал на устойчивость к колееобразованию. С помощью уклона ползучести оценивается свойство асфальтобетона к накоплению остаточных деформаций. Уклон ползучести демонстрирует скорость вязкоупругой деформации материала при длительном циклическом воздействии на него нагруженного колеса в водной среде. **Уклон разрушения *SS*, количество проходов/мм (strip slope)** — характеризует испытываемый материал по параметру влагостойкости. Уклон разрушения демонстрирует скорость течения разрушающих процессов материала при длительном циклическом воздействии на него нагруженного колеса в водной среде. **Точка начала разрушения *SIP*, количество проходов (stripping inflection point):** Является критической точкой кривой графика прочности, демонстрирующей начало преобладания хрупких разрушающих процессов над вязкоупругой деформацией ползучести и характеризует степень влагостойкости испытываемого материала. ***SIP*** определяется в точке пересечения наклонной ползучести с наклонной разрушения. **Точка предельного разрушения *f*,** (failure point): Точка предельного разрушения характеризуется достижением испытываемым образцом критической глубины колеи, равной 20 мм.
Типовой график, пример графической зависимости (схема)	 
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Метод позволяет оценить глубину колеи и угол наклона кривой колеи с целью прогнозирования колееобразования в асфальтобетонном покрытии, оценить степень развития в нём пластических деформаций, как *на воздухе, так и в водной среде.* Оценить уровень колееобразования вследствие высокой степени окатанности зерен заполнителя, неверного подбора состава смеси, недостаточного уплотнения на месте производства работ и др.

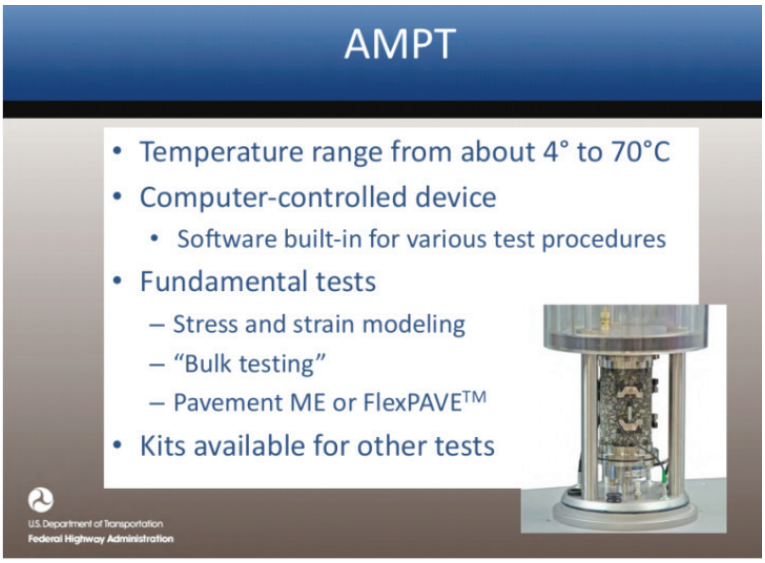
Общий вид испытательного оборудования	

4. ПНСТ 128–2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения динамического модуля упругости и числа текучести с использованием установки для испытания эксплуатационных характеристик (АМРТ)**

ПНСТ 128–2016	Разработан с учетом положений стандарта **AASHTO TP 79** «Determining the Dynamic Modulus and Flow Number for Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)»
Срок действия	с 01.09.2016 по 01.06.2019
Область применения, указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев дорожной одежды на автомобильных дорогах общего пользования. Настоящий стандарт устанавливает методику определения динамического модуля упругости и числа текучести асфальтобетона на образцах с номинальным максимальным размером заполнителя не более 37,5 мм с использованием установки для испытания эксплуатационных характеристик
Основные термины и определения, указанные в ПНСТ	**Динамический модуль упругости** (dynamic modulus): Абсолютное значение, полученное делением максимального (полного) напряжения на максимальную (полную) упругую деформацию материала, подверженного синусоидальной нагрузке. **Остаточная деформация** (permanent deformation): Необратимая деформация при испытаниях с циклической нагрузкой **Фазовый угол** (phase angle): Угол между функцией синусоидально приложенным максимальным напряжением и функцией результирующей максимальной деформации во время испытания. **Число текучести** (flow number, **FN**): Количество циклов нагружения, при котором возникает осевая деформация с постоянной скоростью

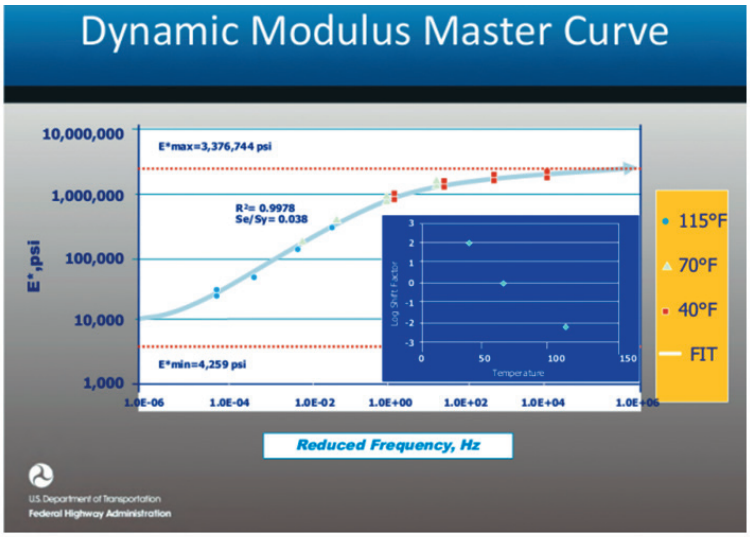
Типовой график, пример графической зависимости (схема)	 
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Метод позволяет оценить устойчивость к колееобразованию, используя испытание на число текучести. Выносливость асфальтобетона может прогнозироваться испытанием по определению динамического модуля. Динамический модуль и фазовый угол зависят от температуры и частоты нагружения. Эти характеристики основаны на концепции *температурно-временной суперпозиции.* В момент испытаний происходит сбор данных о деформации и прилагаемой нагрузке для определения остаточной деформации, упругой деформации, числа текучести. Динамической модуль упругости определяют для прогнозирования поведения асфальтобетона при различных температурах и частотах нагружения
Общий вид испытательного оборудования	



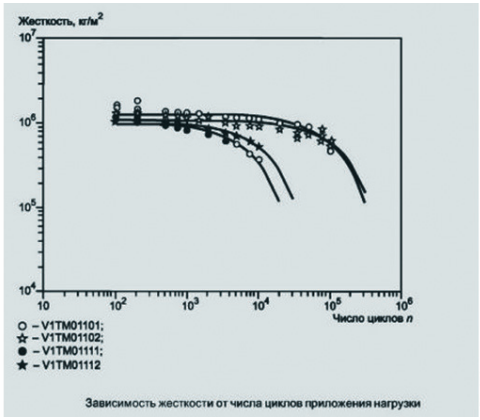
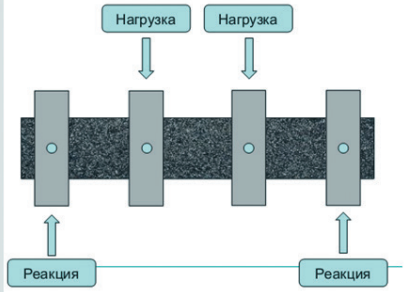
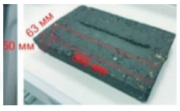


5. ПНСТ 133–2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения динамического модуля упругости**

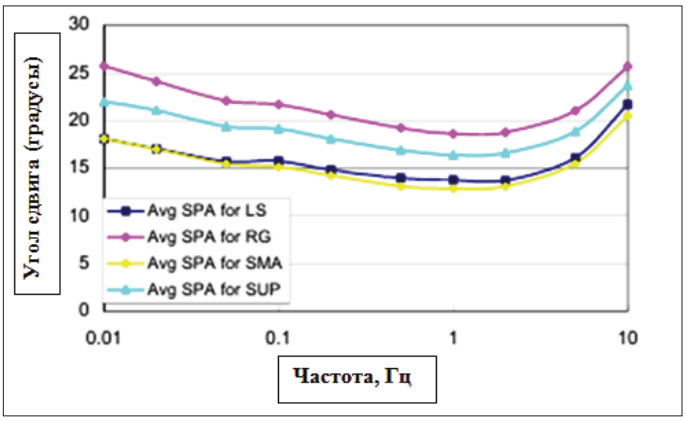
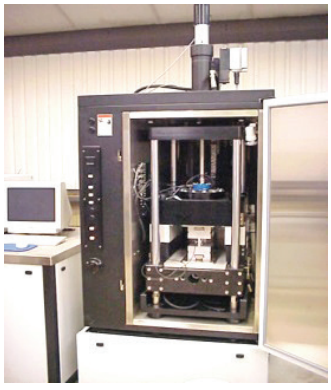
ПНСТ 133–2016	Разработан с учетом положений стандарта **AASHTO T 342** «Determining Dynamic Modulus of Hot Mix Asphalt (HMA)»
Срок действия	с 01.09.2016 по 01.06.2019
Область применения, указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные дорожные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев дорожной одежды, и устанавливает метод определения динамического модуля упругости асфальтобетона в определенных диапазонах температур и нагрузочных частот.
Основные термины и определения, указанные в ПНСТ	**Комплексный модуль** (complex modulus): Комплексная величина, устанавливающая взаимосвязь между напряжением и деформацией материала с линейными вязкостно-упругими свойствами. **Динамический модуль** (dynamic modulus): Абсолютное значение, полученное делением максимального (полного) напряжения на максимальную (полную) упругую деформацию материала, подверженного синусоидальной нагрузке. **Фазовый угол** (phase angle): Угол между функцией синусоидально приложенного максимального напряжения и функцией результирующей максимальной деформации во время испытания.

Типовой график, пример графической зависимости (схема)	
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Выносливость асфальтобетона может прогнозироваться испытанием по определению *динамического модуля.* Динамический модуль и фазовый угол зависят от температуры и частоты нагружения. Эти характеристики основаны на концепции *температурно-временной суперпозиции.* Динамической модуль упругости определяют для прогнозирования поведения асфальтобетона при различных температурах и частотах нагружения
Общий вид испытательного оборудования	

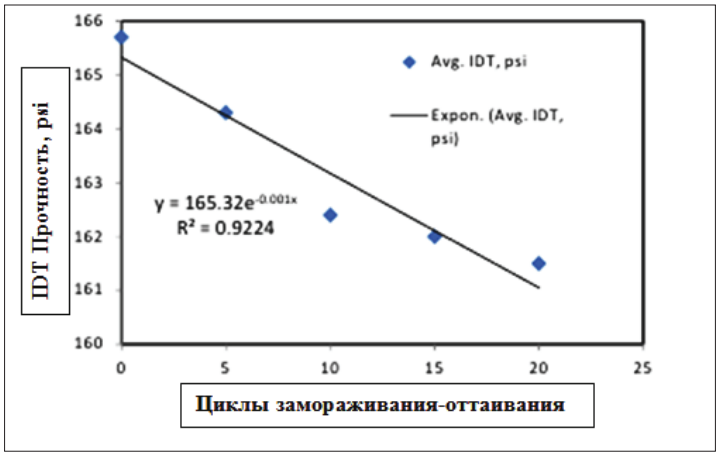
6. ПНСТ 135–2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения усталостной прочности при многократном изгибе**

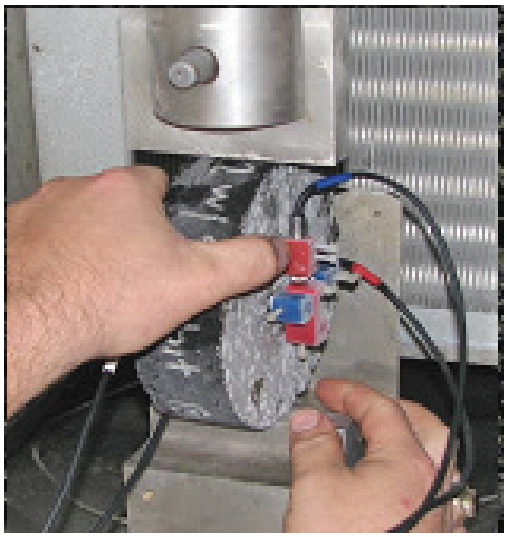
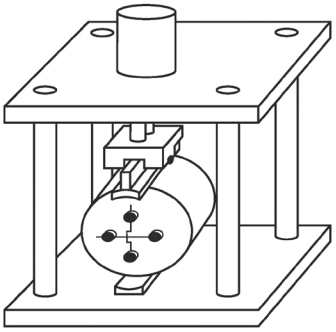
ПНСТ 135–2016	Разработан с учетом положений стандарта **AASHTO T 321** «Determining the Fatigue Life of Compacted Hot Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending»
Срок действия	с 01.09.2016 по 01.06.2019
Область применения, указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные дорожные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев дорожной одежды, и устанавливает метод определения усталостной прочности асфальтобетонных образцов прямоугольного сечения при многократном изгибе.
Основные термины и определения, указанные в ПНСТ	**Образец-плита** (slab sample): Уплотненная асфальтобетонная смесь в плитном уплотнителе или отобранная из асфальтобетонного покрытия. **Испытуемый образец** (test sample): Балка прямоугольного сечения, выпиленная из образца-плиты. **Момент разрушения** (failure point): Цикл нагрузки, при котором жесткость испытуемого образца снижается на 50% по отношению к начальной жесткости.
Типовой график, пример графической зависимости (схема)	 Зависимость жесткости от числа циклов приложения нагрузки 
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Одним из основных видов разрушения дорожного покрытия НМА является растрескивание, связанное с усталостью, называемое усталостным растрескиванием. Метод точно оценивает усталостные свойства асфальтобетона, что позволяет прогнозировать общий срок службы дорожного покрытия.
Общий вид испытательного оборудования	

7. ПНСТ 130–2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения деформации сдвига**

ПНСТ 130–2016	Разработан с учетом положений стандарта **AASHTO T 320** «Determining the Permanent Shear Strain and Stiffness of Asphalt Mixtures Using the Superpave Shear Tester (**SST**)»
Срок действия	с 01.09.2016 по 01.06.2019
Область применения указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные дорожные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев дорожной одежды. Настоящий стандарт устанавливает метод определения деформации сдвига асфальтобетона при циклической частоте сдвига и постоянной высоте испытуемого образца, при простом и повторном сдвиге, при постоянной высоте испытуемого образца путем вертикальных и сдвиговых горизонтальных напряжений.
Основные термины и определения указанные в ПНСТ	**Образец** (SGC sample): Уплотненная асфальтобетонная смесь в виде цилиндра диаметром 150 мм и высотой 75 мм. **Испытуемый образец** (test sample): Уплотненная асфальтобетонная смесь в виде цилиндра диаметром 150 мм и высотой от 38 до 50 мм. **Марка вяжущего** PG XX–XX (binder grades): Обозначение марки вяжущего, первое число которого характеризует среднее значение самой высокой температуры покрытия на глубине 2 см от поверхности в течение семи дней на определенной автомобильной дороге, а второе — самую низкую температуру покрытия, зафиксированную на поверхности покрытия на той же автомобильной дороге.
Типовой график, пример графической зависимости (схема)	
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Метод оценки деформации сдвига (SST) был разработан в рамках исследования программы SHRP, как один из методов оценки эксплуатационных характеристик горячего асфальтобетона (HMA). Метод способен прогнозировать деформацию дорожного асфальтобетонного покрытия.
Общий вид испытательного оборудования	

8. ПНСТ 136–2016 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. **Метод определения прочности на растяжение и жесткости** *(метод IDT)*

ПНСТ 136–2016	Разработан с учетом положений стандарта **AASHTO T 322** «Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device»
Срок действия	с 01.09.2016 по 01.06.2019 г
Область применения, указанная в ПНСТ	Настоящий стандарт устанавливает метод определения жесткости, прочности на растяжение и коэффициента Пуассона асфальтобетона с использованием методов непрямого нагружения. Настоящий стандарт распространяется на асфальтобетонные дорожные смеси и асфальтобетон, предназначенные для устройства конструктивных слоев дорожной одежды.
Основные термины и определения, указанные в ПНСТ	**Жесткость** (creep compliance): Отношение деформации, зависящей от времени, к величине приложенного напряжения. **Испытуемый образец** (test sample): Образец цилиндрической формы диаметром (150 ± 9) мм и высотой от 38 до 50 мм. **Коэффициент Пуассона** (Poisson ratio): Абсолютная величина отношения поперечной и продольной относительной деформации образца. **Марка вяжущего PG XX–XX** (binder grades): Обозначение марки вяжущего, первое число которого характеризует среднее значение самой высокой температуры покрытия на глубине 2 см от поверхности в течении семи дней на определенной автомобильной дороге, а второе — самую низкую температуру покрытия, зафиксированную на поверхности покрытия на той же автомобильной дороге. Пример — PG 64–34. **Образец (SGC sample):** Уплотненная асфальтобетонная смесь в виде цилиндра диаметром (150 + 9) мм и высотой не менее 62 мм. **Прочность на растяжение** (tensile strength): Прочность образца, подверженного растяжению.
Типовой график, пример графической зависимости (схема)	
Возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик асфальтобетона по методу	Выносливость асфальтобетона может прогнозироваться циклическими испытаниями *методом IDT* при трех-четырех амплитудах деформации. Метод испытания на растяжение при ползучести регламентирован AASHTO T 322 (1996 г.). К образцу прилагается статическая нагрузка по поперечной оси образца. Горизонтальные и вертикальные деформации вблизи центра образца используют для расчета податливости при ползучести при растяжении как функцию времени. Нагрузки выбирают для поддержания горизонтальных деформаций в линейном диапазоне (в основном ниже $5 \cdot 10^{-4}$ мм/мм). С целью измерения вертикальных и горизонтальных деформаций на двух торцевых поверхностях образца устанавливают по два измерительных устройства LVDT. Для образца диаметром (150 ± 9) мм длина замеров (база) составляет (38,0 ± 0,2) мм. Полагают, что составы смесей, образцы из которых выдерживают большие деформации, обладают большим сопротивлением растрескиванию. После испытания на ползучесть определяют прочность на растяжение при скорости деформирования 12,5 мм/мин.

Общий вид испытательного оборудования	 

Глава 2

АКТУАЛИЗАЦИЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ РАБОЧЕЙ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ ПО АСФАЛЬТОБЕТОННЫМ СМЕСЯМ (ETG BMD TF UPDATE — APRIL 2016, США). РЕЗУЛЬТАТЫ ЗАСЕДАНИЯ РАБОЧЕЙ ЭКСПЕРТНОЙ ГРУППЫ В РАМКАХ РАССМОТРЕНИЯ ВОПРОСОВ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В апреле 2016 года в Солт-Лейк-Сити (штат Юта, США) состоялось заседание рабочей группы по разработке сбалансированных составов асфальтобетонных смесей (ETG BMD TF Update — April 2016)[1]. Собрание рабочей экспертной группы по асфальтобетонным смесям (ETG) рассмотрело ряд вопросов, связанных с обновлением и актуализацией деятельности в области оценки эксплуатационных характеристик асфальтобетона. Состав рабочей экспертной группы (ETG) представлен на рисунке 1.

Affilation	Category
Pine Bluff S&G	Industry
FHWA - Denver	FHWA Agency
Oldcastle Materials	Industry
Mathy Construction	Industry
Consultant	Consultant
University of Arkansas	Academia/Research
Mathy Construction	Industry
Heritage Research	Industry
Ontario Ministry of Transportation	Provincial Agency
Louisiana State University	Academia/Research
Texas Transportation Institute	Academia/Research
NCAT	Research

Рис. 1. Состав рабочей экспертной группы по асфальтобетонным смесям (ETG, 2016)

[1] Ссылка на презентацию: Asphalt mixture expert task group (ETG) meeting Salt Lake City, Utah. (ETG BMD TF Update — April 2016)

Тема обсуждения: «Разработка сбалансированных составов асфальтобетонных смесей с использованием методов оценки эксплуатационных характеристик асфальтобетона, учитывающих множественные режимы воздействия: потеря первоначальных показателей свойств асфальтобетонных смесей, интенсивность движения автомобилей, климатические условия эксплуатации и местонахождение в конструкции дорожного покрытия».

Причины, вызывающие необходимость использования нового подхода к разработке сбалансированных составов асфальтобетонных смесей:

- Необходимость оценки качества запроектированных смесей с учетом ожидаемой эффективности подбора и возможность прогнозирования эксплуатационных характеристик (ЭХ) асфальтобетона;
- Разработка составов смесей с высокими эксплуатационными характеристиками (ЭХ), а не только подбор смеси методом объемного проектирования;
- Ряд проблем, возникающих с отсутствием подтверждения эффективности эксплуатационных характеристик асфальтобетона, которые могут возникнуть в ряде случаев: трещинообразование из-за низкого содержания связующего компонента в смеси; колееобразование вследствие высокой степени окатанности зерен заполнителя, недостаточное уплотнение на месте производства работ и др.
- Частичная замена битумного вяжущего и минеральных составляющих вторично переработанными материалами;
- Оценка эффективности применения различных видов добавок (модификаторов) в смеси, которые не учитываются непосредственно при проектировании состава смеси.

Все методы по оценке эффективности применения асфальтобетонных смесей связаны с оценкой эксплуатационных характеристик (ЭХ) самого асфальтобетона и отличаются от методов, применяемых при объемном проектировании смесей.

К методам оценки ЭХ асфальтобетона относят:

— тест «Гамбургское колесо» (гамбургский метод) (рисунок 2);
— метод определения динамического модуля упругости (АМРТ) (рисунок 3);
— APA (анализатор асфальтобетонного покрытия) (рисунок 4);
— определение усталостной прочности при многократном изгибе (рисунок 5);
— испытание полуобразцов на изгиб и др.

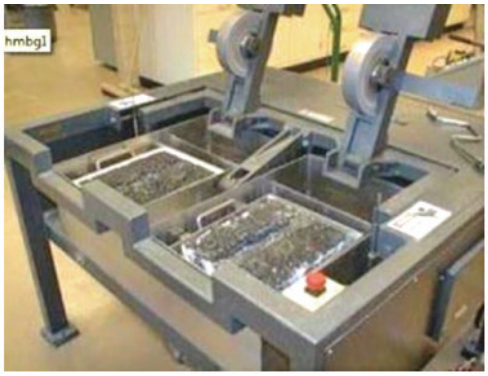


Рис. 2. Испытательное оборудование

Рис. 3. Установка АМРТ «Гамбургское колесо»

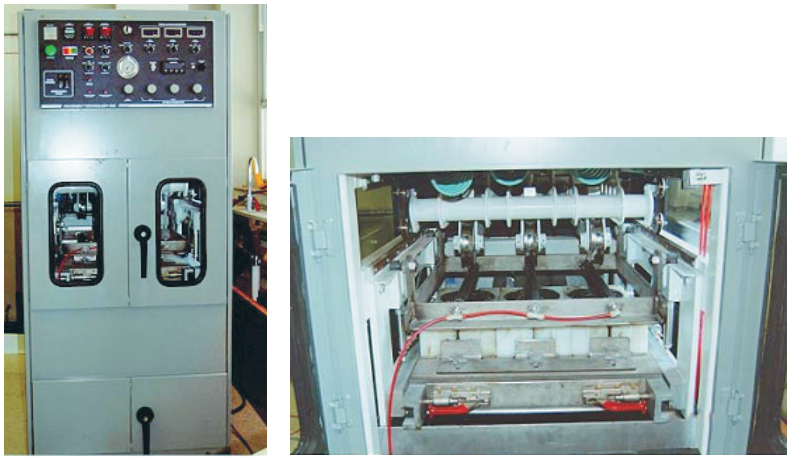


Рис. 4. АРА (анализатор асфальтобетонного покрытия)

Рис. 5. Оборудование для проведения испытаний на 4-х точечный изгиб (Four Point Bend Test)

На заседании рабочей группы было принято решение **НЕ делать** различий между механическими / эмпирическими тестами. Randy West (цитата): «Давайте не будем вязнуть в механической и эмпирической семантике. За основу необходимо принять две наиболее важные вещи: первое — параметр теста должен относиться к эксплуатационным характеристикам асфальтобетона, второе — тест может быть применён для рутинного использования при проектировании асфальтобетонной смеси».

Было предложено разделить процесс проектирования асфальтобетонных смесей на три уровня A, B и C.

Иерархия проектирования смесей

Уровень A:

Проектирование асфальтобетонной смеси с учетом требований по прогнозированию эксплуатационных характеристик (ЭХ), которые должны соответствовать измеряемым параметрам асфальтобетона (*без учёта ограничений по объёмному проектированию смеси по методологии Superpave*).

Определяющие параметры:

эксплуатационные характеристики (ЭХ).

Уровень B:

Проектирование смеси с учетом соответствия требованиям ЭХ (колейности, трещиностойкость или другой критерий ЭХ) в качестве основного принципа проектирования *с допустимыми корректировками по методу объёмного проектирования смеси по методологии Superpave AASHTO M323.*

Определяющие параметры:

эксплуатационные характеристики (ЭХ) ± Superpave (объёмные характеристики)

Уровень С:

Проектирование смеси с учетом метода объёмного проектирования по методологии *Superpave* согласно AASHTO M323 (волюметрические характеристики) в качестве основного принципа и *дополнительно — применение тестов на ЭХ* (определение колейности, трещиностойкости или других критериев ЭХ).

Определяющие параметры:

Superpave (объёмные характеристики) + ЭХ.

На рисунках 6, 7 и 8 представлены три блок-схемы различных уровней проектирования асфальтобетонных смесей (уровни А, В и С).

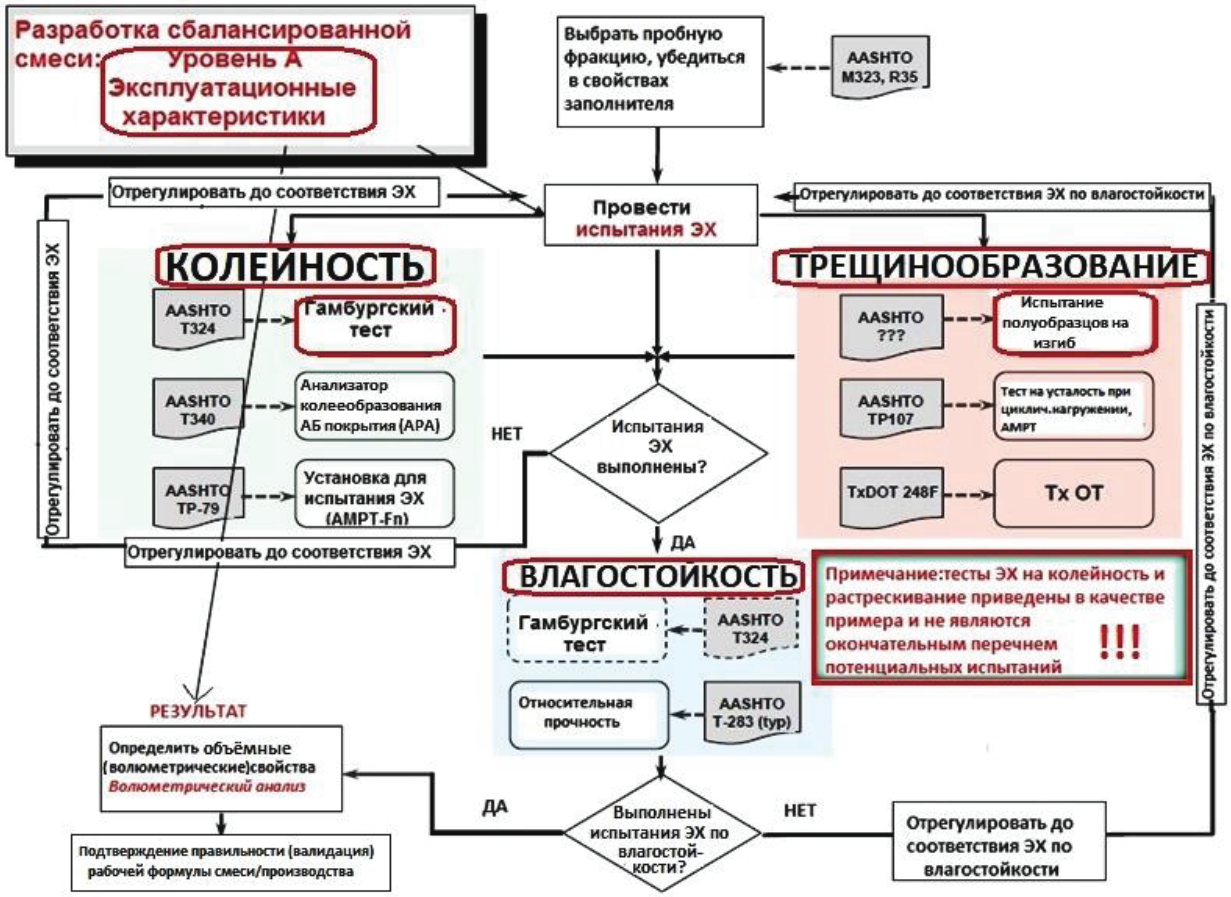


Рис. 6. Проектирование состава асфальтобетонной смеси по Уровню А

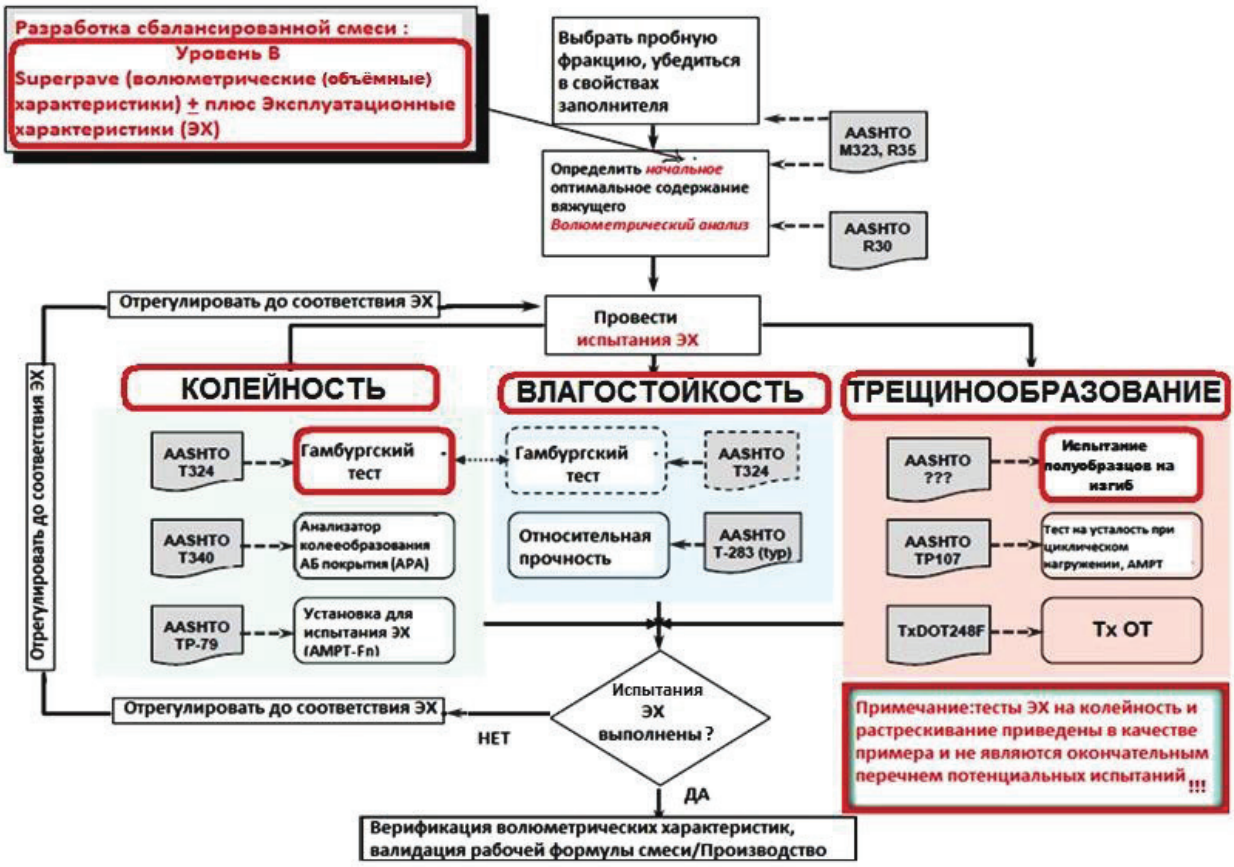


Рис. 7. Проектирование состава асфальтобетонной смеси по Уровню В

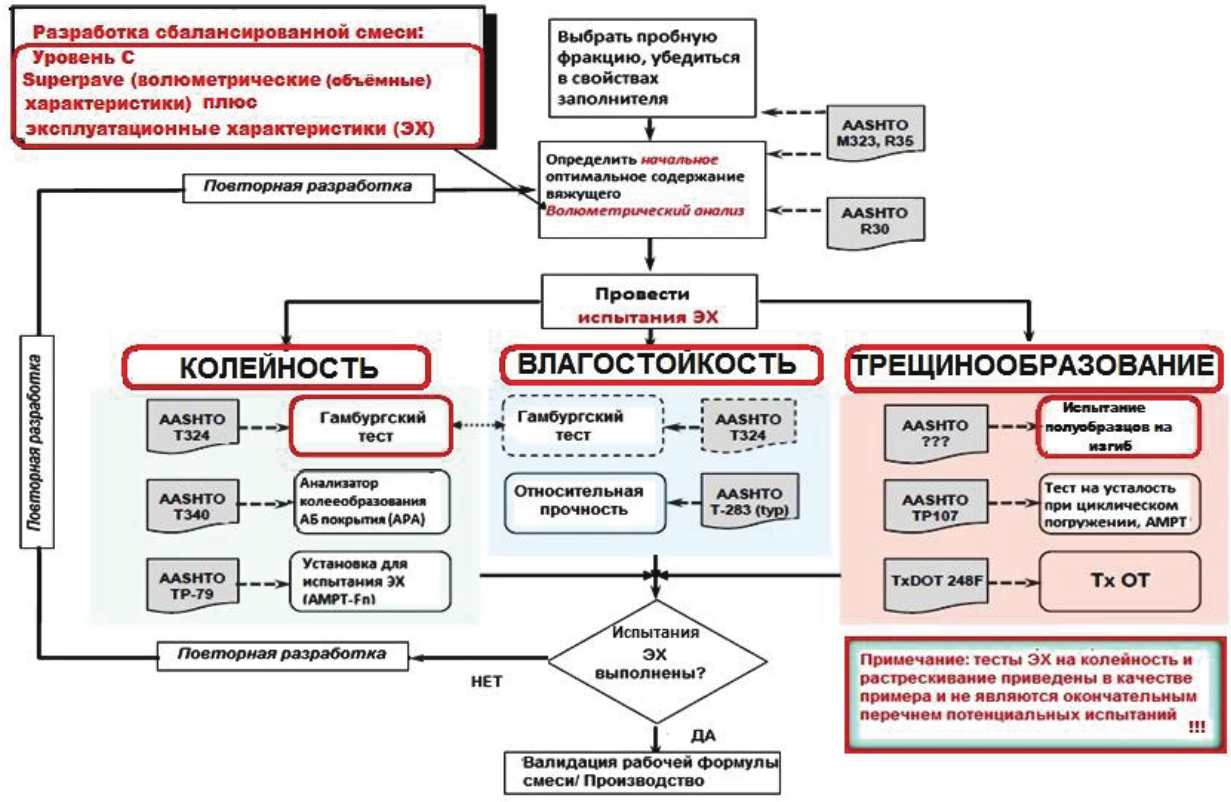


Рис. 8. Проектирование асфальтобетонной смеси по Уровню С

При проектировании оптимальных составов асфальтобетонных смесей особое внимание уделяется оптимизации рабочей формулы смеси JMF (Job Mix Formula). В таблице 1 приведена информация практического использования трех моделей (уровней A, B или C), применяемых в семи штатах США.

Таблица 1

Сведения о практическом использовании различных видов моделей (A, B или C) при проектировании составов асфальтобетонных смесей в семи штатах (Tim Ashenbrener, 19 января 2016 г.)

Модель (уровень) при проектировании смеси	Штат США	Применяемые тесты для определения ЭХ	Корректировка смеси
МОДЕЛЬ 1 (уровень C) ***Superpave*** *(метод объёмного проектирования)* **+ *ЭХ***	**Иллинойс** 8 проектов в 2016 г. в рамках строительства	STA — Hamburg (гамбургский тест) LTA (долгосрочное старение) — I-FIT	RAP и RAS (переработанный асфальтобетон, крошка) — Изменение количества — *Смена поставщика вяжущего*
	Техас Все специальные смеси за последние 2–3 года	STA — Hamburg LTA — Overlay tester	— Содержание вяжущего — *Смена поставщика вяжущего* — Корректировка размера фракции мелкого заполнителя (P200) — *Смена поставщика заполнителя*
	Висконсин 4 проекта за 2015 г.	STA — Hamburg LTA — DCT and SCB (тест полуцилиндра на изгиб)	— *Смена поставщика вяжущего и добавок* — Фракции заполнителя и мелкого заполнителя — Добавка резины
	Луизиана	STA — Hamburg LTA — SCB	—
	Нью-Джерси Все специальные смеси — 5–10% от общего выпуска	STA — APA (автоматический анализатор покрытия) LTA — Overlay tester и Beam Fatigue (испытание на усталость при изгибе)	— WMA (тёплый асфальтобетон) — «Омолаживающие компоненты» — Полимеры — Изменение состава смеси
МОДЕЛЬ 2 (уровень B) ***ЭХ*** ± ***Superpave*** *(объёмные характеристики*	**Калифорния** 7 межштатных проектов 2016 г.	STA — Hamburg, Repeated Shear (испытание на сдвиг) LTA — Beam Fatigue & freq. sweep	— *Работы с поставщиком вяжущего/заполнителя* — Содержание вяжущего — Соотношение: пыль (порошок): вяжущее
МОДЕЛЬ 3 (уровень A) ЭХ	**Нью-Джерси** Проекты планируемые к применению	STA — APA LTA — Overlay tester and Beam Fatigue	Должна быть определена в ходе работ

Состояние практического применения

Дополнительно было опрошено 27 штатов (февраль 2016 г., Louay Mohammad) и установлено, что в текущих технических условиях по проектированию асфальтобетонных смесей использует тесты по оценке эксплуатационных характеристик в 21 штате, что составляет 78% и 6 штатов (22%) их не используют. На диаграмме (рисунок 9) представлена информация практического применения с учетом методов оценки эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

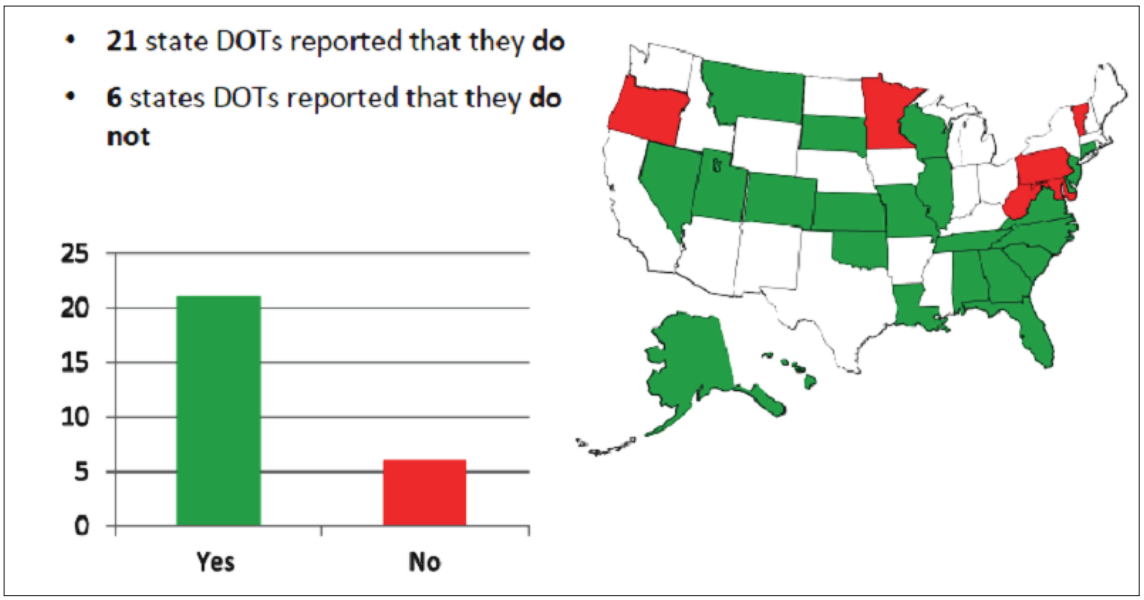


Рис. 9. Диаграмма практического применения методов оценки эксплуатационных характеристик (ЭХ) асфальтобетона

Кроме того, 12 штатов используют те же методы для оценки ЭХ непосредственно при производстве асфальтобетонных смесей на асфальтобетонных заводах. 10 штатов не используют ЭХ для оценки смеси в процессе производства и 5 штатов используют их лишь в том случае, если возникают спорные вопросы.

В настоящее время отсутствуют четкие рекомендации по проектированию сбалансированных асфальтобетонных смесей* (Balanced Mix Design BMD). *Данное направление является прогрессивным и требует поэтапного решения с разработкой альтернативных подходов.

Глава 3

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОНА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ОБОРУДОВАНИЯ АМРТ

Вопросы образования колейности требуют самого пристального внимания и принятия ряда мер, направленных на борьбу с ней.

Отечественные и зарубежные исследования показывают, что образование колейности на покрытии автомобильных дорог негативно влияет на безопасность дорожного движения. Вследствие образования колеи возрастает опасность аквапланирования (скольжение по воде). При этом автомобиль может быть выброшен на встречную полосу движения и тем самым создать угрозу лобового столкновения с встречным транспортом или, покинув свои колейные дорожки и, развернувшись поперёк дороги, остановиться, тем самым создать двойную опасность столкновения, как со встречным, так и сзади идущим транспортом.

С ростом интенсивности движения и транспортных нагрузок колея на поверхности асфальтобетонных покрытий становится наиболее распространенным дефектом. В течение срока службы покрытия колея образуется постепенно и может возникнуть из-за недостаточной устойчивости любого слоя дорожной конструкции, включая грунт земляного полотна. Чаще всего причиной колейности является конструктивный слой, характеризующийся наименьшим сопротивлением транспортным нагрузкам и погодно-климатическим факторам. Однако бывают случаи, когда глубина колеи суммируется из необратимых деформаций нескольких слоев дорожной одежды.

Для успешной борьбы с колейностью на дорогах необходим предварительный глубокий анализ причин и механизмов образования различных видов колейности и выявление причин ее образования. Ответственные за колейность конструктивные слои можно установить по результатам анализа их напряженно-деформированного состояния от воздействия транспортных нагрузок. Типовые схемы образования колеи в дорожных покрытиях представлены на рисунках 10–13.

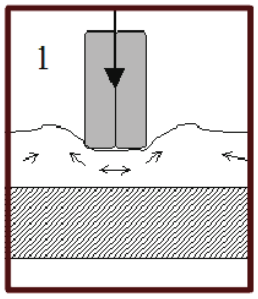


Рис. 10. Деформирование верхнего слоя асфальтобетонного покрытия

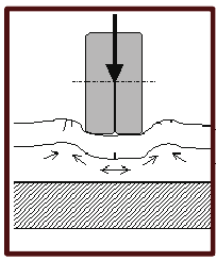


Рис. 11. Деформирование нижнего слоя асфальтобетонного покрытия

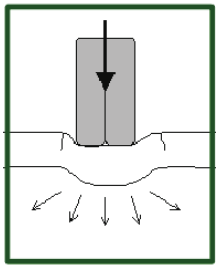


Рис. 12. Деформирование низлежащих слоев основания и грунта земляного полотна

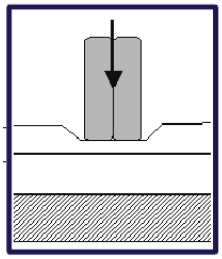


Рис. 13. Неравномерный износ поверхности асфальтобетонного покрытия от шипованных шин

Первые две схемы на рис. 10, 11 вызваны вязко-пластичным состоянием асфальтобетона в верхнем и нижнем слое покрытия. Отличительным признаком колеи пластичности является присутствие на поверхности покрытия гребней выпора. Как правило, колея пластичности характеризуется двухсторонним выпором вдоль полосы наката.

Схема на рис. 12 относится к колее, вызванной деформированием глубоколежащих слоев основания и грунта земляного полотна, которую принято называть глубинной. По очертанию в поперечном профиле глубинная колея в отличие от поверхностной, характеризуется отсутствием гребней выпора.

Схема на рис. 13 иллюстрирует образование колеи износа в результате абразивного истирания поверхности покрытия шинами автомобилей. Этот вид колеи наблюдается преимущественно на левых (скоростных) полосах автомагистралей с интенсивным движением легковых автомобилей. Наиболее существенный износ асфальтобетона происходит под воздействием шипованных шин.

Примечательно, что в странах, где шипованные шины не применяют, проблема колеи износа дорожных покрытий практически отсутствует, а в северных странах, где в целях безопасности автомобильного движения вынуждены применять в зимний период шипованную резину, колея износа превалирует. К образованию колеи износа приводят чрезмерно высокие скорости движения легковых автомобилей, а колеи пластичности — предельно низкие скорости движения грузового транспорта и заторы на дорогах.

Прогнозирование колееобразования асфальтобетона с использованием испытательного оборудования AMPT (при типовой схеме образования колеи, рис. 10, 11)

Программа *Asphalt Pavement Technology* представляет собой комплексный национальный проект, направленный на повышение долгосрочных эксплуатационных характеристик (ЭХ) асфальтобетона и экономической эффективности его применения в асфальтобетонных покрытий. Находясь под управлением FHA (Federal Highway Administration, Федеральное дорожное управление) через партнёрство с автомобильными агентствами штатов, промышленностью и научной общественностью, основными целями программы является снижение перегруженности и развитие технологических инноваций. Программа была создана для разработки и внедрения руководств, методов, процедур и других инструментов для использования в выборе материалов асфальтобетонных покрытий, проектирования смеси, испытаний, строительства и контроля качества.

Представленный технический обзор, выполненный отделом технологии покрытий Департамента транспорта FHA (FHWA-HIF-13–005. Февраль 2013), обобщает опыт применения, развитие метода AMPT, описывает возможности его использования при проектировании дорожного покрытия и проектирования асфальтобетонных смесей. AMPT рассматривается как один из основных инструментов, позволяющих дополнять стандартные процедуры проектирования асфальтобетонной смеси, предоставляя эксплуатационные (проектные) свойства для оценки пригодности смеси и инженерного проектирования дорожного покрытия (рисунок 13).

AMPT представляет собой стенд для испытаний, разработанный специально для измерения эксплуатационных характеристик асфальтобетонных смесей (рисунок 14). Это компактная сервогидравлическая испытательная машина, которая была разработана на основе работ, выполненных по программам NCHRP Проекты 9–19, *Модели управления поддержкой и эксплуатационными характеристиками (1)* Superpave (*Superpave Support and Performance Models Management (1)),* и 9–29, Простое устройство для испытания эксплуатационных характеристик при проектировании смеси Superpave (2–5) (Simple Performance Tester for Superpave Mix Design (2–5)).

Стандарты AMPT

- **AASHTO TP 79** Метод испытания для определения динамического модуля упругости и числа текучести для горячих асфальтобетонных смесей (HMA) с использованием установки AMPT
- **AASHTO PP 60** Стандартная практика для подготовки к испытаниям цилиндрических образцов с использованием вращательного уплотнителя (гираторного компактора (SGC) Superpave
- **AASHTO PP 61** Стандартная практика для разработки основных кривых динамического модуля упругости для горячей асфальтобетонной смеси (HMA)

С помощью AMPT можно быстро оценить устойчивость к колееобразованию, используя испытание на число текучести. Число текучести коррелирует с устойчивостью к колееобразованию смесей, определённой с использованием различных методов испытаний дорожного покрытия (*1*). AMPT также значительно упрощает разработку основных кривых динамического модуля, необходимых для проектирования конструкции дорожной одежды с использованием программного обеспечения для проектирования и анализа дорожного покрытия AASHTOWare® Pavement ME Design (ранее DARWin-ME™) или других механико-эмпирических процедур структурного проектирования. Испытания динамического модуля при нескольких температурах и частотах нагружения используются для разработки основной кривой динамического модуля. Помимо испытаний на число текучести и определения

динамического модуля упругости, которые были стандартизированы, в настоящее время ведется работа по разработке и стандартизации испытания на усталость при прямом растяжении для AMPT, которое может быть использовано для оценки устойчивости смеси к усталости и трещинообразованию (6,7).

Рис. 14. Фотографии оборудования для AMPT, Interlaken Technology Corporation (слева) и IPC Global (справа)

AMPT был разработан в ответ на проблемы, поднятые инженерами из агентств по материалам и заключался в том, что система проектирования смеси Superpave, в том виде, как она была реализована, не включала фундаментальное испытание на устойчивость к колееобразованию. Методы проектирования по Marshall и Hveem, которые заменил Superpave, по мнению инженеров и технических специалистов, включали испытания, связанные с устойчивостью к колееобразованию.

Несмотря на то, что прогностическая способность этих испытаний была сомнительной, они предоставляли разработчикам проектируемой смеси общую оценку устойчивости к колееобразованию, которая не оценивалась при подборе Superpave методом объёмного проектирования.

Федеральное агентство автомобильных дорог (FHWA) и NCHRP (Национальная совместная исследовательская программа дорожного движения) инициировали несколько исследовательских работ для оценки различных испытаний как «простых эксплуатационных испытаний» колееустойчивости, которые могли бы дополнить результаты проектирования (подбора) смеси методом объемного проектирования (1,8–10). К ним отнесли:

1 — параметры, полученные с использованием гирационного уплотнителя;
2 — испытания на колееустойчивость;
3 — испытания на сдвиг;
4 — испытания на непрямое растяжение;
5 — трехосные испытания.

Одновременно рабочая группа AASHTO приступила к разработке механико-эмпирической процедуры проектирования дорожных покрытий, которая в конечном итоге превратилась в AASHTOWare® Pavement ME Design (11).

Совместимость трехосных испытаний на устойчивость к колееобразованию с новой механико-эмпирической процедурой проектирования дорожного покрытия привела к выбору числа текучести и динамического модуля упругости в качестве предпочтительных эксплуатацион-

ных испытаний для дополнения проектирования смеси, которые были учтены при разработке оборудования для AMPT.

Чем AMPT отличается от другого тестового оборудования для испытаний асфальтовой смеси?

Для оценки асфальтобетонных смесей был разработан ряд испытаний эксплуатационных характеристик (12).

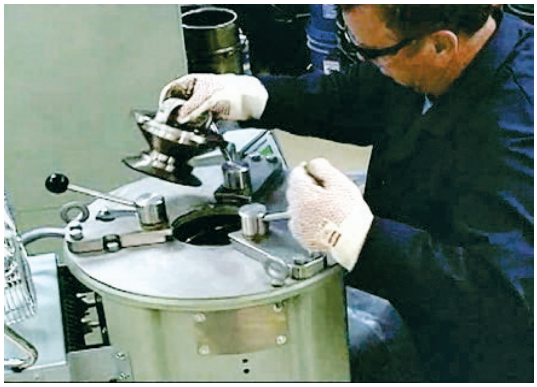
Основные отличия между испытаниями AMPT и другими испытаниями на устойчивость к колееобразованию, такими как анализатор асфальтобетонных покрытий (APA) или Гамбургский тест на колейность, заключаются в фундаментальной механической природе, и эти результаты могут быть использованы в AASHTOWare® Pavement ME Design для оценки эксплуатационных характеристик покрытий, созданных с использованием смеси. Использование одних и тех же тестов, как для оценки смеси, так и для ее структурного проектирования обеспечивает связь между проектированием смеси и структурным анализом конечного продукта, что являлось основной целью огромного количества прошлых исследований в области нежестких дорожных покрытий. Кроме того, тесты AMPT получили национальную, а не региональную поддержку в ходе их разработки. Это привело к спецификации универсального оборудования для AMPT, появились несколько поставщиков, производящих AMPT-оборудование, стандарты AASHTO для тестирования и анализа данных, первоначальные оценки сходимости и воспроизводимости, а также скоординировано обучение и техническая поддержка в ходе работ. На рисунке 15 представлена блок-схема, показывающая период развития AMPT, который занял приблизительно 10 лет. Потребность в AMPT была установлена инженерами из агентств по дорожно-строительным материалам. Исследование и разработка проекта методов испытаний и прототипа оборудования были завершены в проекте NCHRP 9–19. Поддержка осуществлялась в рамках проекта 9–29 NCHRP с целью коммерциализации оборудования путём разработки спецификации на оборудование, оценки устройств для первых продуктов, проведения испытаний на предмет работоспособности с целью улучшения спецификации оборудования и методов испытаний, разработки предварительных стандартов AASHTO и проведения межлабораторных испытаний для установления сходимости и воспроизводимости испытаний по определению динамического модуля и числа текучести. FHWA в рамках проекта по финансированию смешанных проектов TPF-5 (13, 14) провела обучение методу AMPT и оказывает поддержку агентствам, использующим AMPT.

Рис. 15. Блок-схема разработки AMPT

Каким образом осуществляется подготовка образцов для испытаний методом АМРТ?

Испытания в АМРТ проводятся на образцах диаметром 100 мм (4 дюйма) с высотой 150 мм (6 дюймов), которые выбуривают и обрезают из более крупного образца 150 мм (6 дюймов) в диаметре с высотой 170 мм (6,75 дюймов), изготовленного во вращательном уплотнителе (гираторном компакторе) по Superpave. Рисунок 16 иллюстрирует основные этапы процесса изготовления образцов. Сначала готовится образец высотой 170 мм путём уплотнения смеси, необходимой для достижения заданного количества воздушных пор. Затем из средней части образца приготовленного на гираторе удаляется сердцевина диаметром 100 мм с использованием стандартного алмазного станка. Наконец, верхняя и нижняя части образца обрезаются гладко и строго параллельно при помощи камнерезного станка.

Подготовка образца для испытаний методом АМРТ была стандартизирована в AASHTO PP 60 (Предварительная стандартная практика подготовки образцов для испытаний цилиндрических образцов с использованием вращательного уплотнителя (гираторного компактора (SGC)). Размеры испытательного образца для АМРТ были выбраны таким образом, чтобы в методах АМРТ измерялись основные технические характеристики. Испытуемый образец получают из сердцевины более крупного образца, приготовленного во вращательном уплотнителе (гираторном компакторе) для получения большей однородности образца за счет устранения воздушных пустот, которые имеют место по окружности и на поверхности гираторных уплотненных образцов.



1. Приготовление образца на гираторе

2. Высверливание сердцевины образца диаметром 100 мм

3. Полировка поверхности

Рис. 16. Основные этапы подготовки образцов для испытаний АМРТ

Как применяется AMPT для проектирования покрытия?

Основной характеристикой асфальтобетонных смесей, которая используется при проектировании покрытия, является динамический модуль упругости. При испытании на динамический модуль упругости образец подвергается непрерывной синусоидальной стресс-контролируемой нагрузке при заданной частоте и температурном режиме. При проведении испытаний непрерывно регистрируются как приложенное напряжение, так и возникшая в результате деформация. Динамический модуль упругости определяется как пиковое напряжение, деленное на пиковую деформацию, и является мерой общей жесткости смеси при определенной температуре испытания и частоте нагружения.

Поскольку поведение асфальтобетона зависит как от температуры, так и от скорости нагрузки, а скорость нагрузки связана со скоростью движения, модуль асфальтобетона не может быть описан одиночным значением. Основная кривая динамического модуля — это уравнение, которое определяет модуль асфальтобетона для любой комбинации температуры и скорости нагружения. Во время структурного анализа AASHTO Ware® Pavement ME Design использует основную кривую динамического модуля, чтобы назначить соответствующее значение модуля упругости в зависимости от температуры, скорости движения и толщины дорожного покрытия. Главная кривая динамического модуля строится с использованием суперпозиции время / температура, как изображено схематически на рисунке 17. Измерения динамического модуля проводятся при различных температурах и частоте нагрузки. Затем результаты сдвигаются горизонтально до тех пор, пока данные при разных температурах не выровняются в непрерывную функцию, отображающую поведение покрытия при различных температурах и скоростях нагрузки. Условия, связанные с низкой температурой и высокой скоростью движения, являются высокие частоты на одном конце основной кривой, а условия, связанные с высокой температурой и низкой скоростью движения — низкие частоты на другом конце основной кривой.

Испытание динамического модуля в AMPT требует использования датчиков измерения деформации на образцах для минимизации ошибок, связанных с конечными эффектами. Датчики монтируются на измерительные точки, приклеенные к образцу, с помощью приспособления для их быстрой установки. Испытание динамического модуля для основных кривых должно проводиться на образцах, подготовленных с определенным содержанием воздушных пустот (обычно семь процентов).

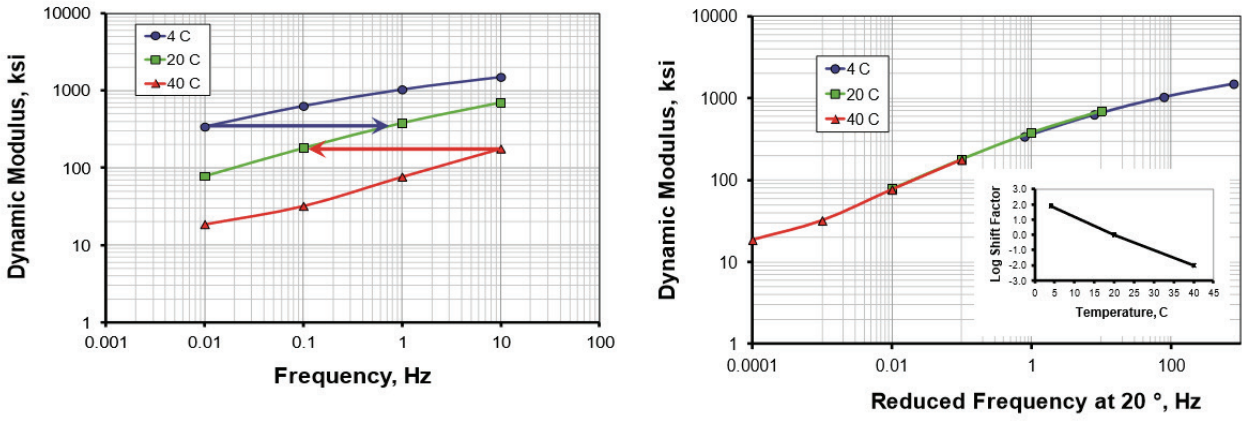


Рис. 17. Схематическая суперпозиция Время / Температура для построения основной кривой динамического модуля. Необработанные данные вверху, обработанные данные внизу

Построение основных кривых динамического модуля с применением AMPT было стандартизировано в AASHTO PP61 (*Предварительная стандартная практика для разработки основ-*

ных кривых динамического модуля для горячих асфальтобетонных смесей (HMA) с использованием установки для определения эксплуатационных характеристик асфальтобетонной смеси (AMPT)). Данные по динамическому модулю собираются при трех значениях температуры и четырех значениях частот.

На рисунке 18 приведены четыре шага для использования AMPT и MasterSolver для получения входных данных динамического модуля для AASHTOWare® Pavement ME Design.

Рис. 18. Создание основных кривых динамического модуля для структурного проектирования с применением установки AMPT и приложения Master Solver

Как применяется AMPT для оценки смеси?

В настоящее время первичное использование AMPT для оценки наиболее эффективной смеси заключается в оценке устойчивости асфальтобетона на ее основе к колееобразованию путем оценки числа текучести. В настоящее время испытание на усталостное трещинообразование в AMPT находится в стадии разработки. Оценка устойчивости асфальтобетона к колееобразованию с применением испытания числа текучести довольно проста. При про-

ведении испытаний на число текучести образец подвергается повторяющимся циклам нагружения при определённой температуре испытания. Результирующие постоянные осевые деформации измеряются для каждого импульса (цикла) нагружения и используются для расчета числа текучести, или точки, где образец демонстрирует неконтролируемую третичную текучесть.

Дополнительного прибора для измерения образца не требуется при проведении испытаний на число текучести, поскольку для измерения остаточной деформации используется механизм для определения смещения. Для оценки устойчивости к колееобразованию проводится неограниченное испытание на число текучести с применением повторяющейся осевой нагрузки в 600 кПа (87 psi) при использовании установки AMPT (с надёжностью температуры 50% из LTPPBind версии 3.1 на глубине 20 мм).

Содержание воздушных пустот в образце доводят до 7%. Обычно испытание числа текучести может проводиться на образцах после того, как они испытаны на динамический модуль, ограничивая количество требуемых образцов. Затем измеренное число текучести сравнивают с критериями, разработанными в проекте NCHRP 9–33 для горячей асфальтобетонной смеси (HMA) или NCHRP 9–43 для тёплой асфальтобетонной смеси (WMA) (13). Критерии приведены в таблице 2. Критерии различны для горячих и тёплых асфальтобетонных смесей (HMA и WMA), поскольку отличаются условия приготовления. На рис.19 приведена оценка устойчивости к колееобразованию с применением AMPT.

Таблица 2

Критерии определения числа текучести

Расчётная нагрузка при движении, млн. ESAL (эквивалентная стандартная нагрузка на ось)	**Горячая асфальтобетонная смесь (HMA[1])**	**Тёплая асфальтобетонная смесь (WMA[1])**
<3	—	—
3 до <10	50	30
10<30	190	105
>30	740	415

[1] *Горячие асфальтобетонные смеси обрабатываются 4 часа при 135 °C, тёплые асфальтобетонные смеси — 2 часа при температуре уплотнения в условиях эксплуатации.*

Рис. 19. Оценка устойчивости к колееобразованию при помощи AMPT

Можно ли оценивать трещинообразование при помощи AMPT?

В связи с увеличением объёмов применения переработанных материалов, произведённых из асфальтобетонного покрытия (RAP), переработанной асфальтобетонной крошки (RAS) и использования других модифицирующих добавок типа резиновой крошки, серы, волокон, применяемых в асфальтобетонных смесях, разработка метода испытания на трещинообразование находится в зоне растущего интереса. Современные методы проектирования асфальтобетонных смесей основаны на подборе эффективного вяжущего материала с минимальным его содержанием и наличия свойств позволяющих снизить усталостное и термическое трещинообразование.

Из-за определенных аспектов, связанных со смешиванием новых и восстановленных вяжущих материалов, влияния модификаторов, эффективность которых невозможно оценить только при сравнительных испытаниях вяжущего, необходим метод оценки устойчивости к трещинообразованию конечного продукта (асфальтобетона).

Испытание на *термическое трещинообразование* в АМРТ невозможно. Регулирование температуры в АМРТ ограничено диапазоном от 4 °С до 70 °С, а степени нагружения недостаточно для низкотемпературного тестирования. Проведение испытаний на *усталостное трещинообразование* возможно и сейчас продолжаются работы по разработке соответствующего протокола испытания усталости для АМРТ (6,7). Применяемые методы испытания усталости основаны на принципе непрерывно, постоянно действующих воздействий. Испытания включают в себя испытания при прямом циклическом растяжении и контроль изменения модуля при увеличении количества циклов. На рисунке 20 представлен образец для испытаний АМРТ с растягивающими концевыми пластинами, необходимыми для испытания, и устройство для склеивания нескольких образцов. В настоящее время основное внимание в исследовании уделяется разработке эффективных протоколов испытания и анализа данных для использования техническими специалистами, отвечающими за разработку смеси асфальтобетонного покрытия. Проект испытаний методов тестирования усталости представлен в AASHTO в 2013 году.

Рис. 20. Образец для испытаний на усталость в АМРТ и устройство для приклеивания

Существуют ли другие тесты, которые можно использовать?

АМРТ — это не единственное оборудование для испытания эксплуатационных характеристик асфальтобетонной смеси. В таблице 3 приведено несколько испытаний, которые получили определённый уровень признания и применения в дорожной области.

Эта таблица включает пять основных типов тестов эксплуатационных характеристик: модуль упругости, остаточная деформация, трещинообразование, связанное с нагрузкой, термическое трещинообразование и чувствительность к влаге. Применимость каждого испытания к разработке обычной смеси оценивается на основе следующих критериев.

1. Стандартизация. Был ли принят стандартный метод для испытания AASHTO или ASTM, или пока ведутся работы, которые приведут к стандартизации в ближайшем будущем? Очень важно, чтобы испытания эксплуатационных характеристик, включенные в методы проектирования смесей, были стандартизированы и *достоверны с оценкой сходимости и воспроизводимости результатов.*

2. Критерии. Были ли разработаны критерии применения методов испытаний? Прошлый опыт попыток внедрения системы Superpave предполагает, что для стандартного проектирования смеси должны быть предусмотрены критерии испытаний, различающие основные и дополнительные эксплуатационные характеристики. Некоторые ЭХ могут использоваться в качестве дополнительной гарантии для критически важных проектов.

3. Сложность. Являются ли методы испытаний и требуемый анализ результатов подходящими для техников и инженеров, участвующих в процессе проектирования смеси? Многие испытания ЭХ дорожного покрытия включают изготовление специальных образцов для испытаний или использование испытательного оборудования, с которыми не знакомы технические специалисты. Анализ данных часто связан с относительно сложными теориями, которые могут выходить за рамки возможностей инженеров и техников, участвующих в проектировании смеси. Компьютерное управление и анализ данных могут устранить большую часть сложности испытания; однако оборудование и алгоритмы должны быть надежными. Прекрасным примером правильного использования компьютерного управления является метод DSR -динамический сдвиговый реометр, который представляет собой очень сложное оборудование и использует относительно сложный анализ, но поскольку контроль и анализ данных являются надежными, динамические сдвиговые реометры были быстро приняты для использования в дорожной области.

4. Оборудование. Является ли оборудование для испытания доступным у коммерческих поставщиков по разумной цене, и если испытание является относительно сложным, является ли надёжным программное обеспечение для компьютерного контроля и анализа? Предпочтительно, чтобы было доступно оборудование из нескольких источников, чтобы спрос и конкуренция на рынке приводили к постоянному усовершенствованию оборудования.

Результаты Таблицы 3 показывают, что достигнут существенный прогресс в разработке испытаний динамического модуля, остаточной деформации и влагостойкости для асфальтобетонных смесей. Для этих испытаний были разработаны стандарты и критерии, а оборудование для них доступно при средних затратах. Многие из этих тестов не содержат инструкций по точности испытания, которые необходимы при принятии или отклонении материала. В последние годы достигнут прогресс в рамках испытаний на энергию разрушения для анализа низкотемпературного трещинообразования. Большая часть этой работы была проделана в исследовании 776 «Транспортный фонд» (Transportation Pooled Fund Study 776) (14). Достигнут прогресс в разработке метода испытаний на трещинообразование. Несмотря на то, что подходы к применению повторяющейся нагрузкой с оценкой энергии разрушения кажутся многообещающими, стандартизировано только испытание на усталость при изгибе.

Как показано в таблице 3, AMPT представляет собой оборудование с умеренной стоимостью, позволяющее проводить испытания на динамический модуль упругости, остаточную деформацию и трещинообразование, связанное с нагрузкой, используя образец, изготовленный в гираторном уплотнителе Superpave, доступный большинству лабораторий. Испытания динамического модуля и остаточных деформаций были стандартизированы и имеют требования к оценке точности. В настоящее время разработан тест на трещинообразование. Еще одно важное преимущество, которое предлагает AMPT, — это возможность связать проектирование смеси с инженерным (структурным) проектированием дорожного покрытия. Тесты AMPT предоставляют данные, которые могут использоваться как для оценки качества смеси, так и для прогноза ЭХ дорожного покрытия с использованием AASHTOWare® Pavement ME Design или другого механико-эмпирического программного обеспечения для структурного проектирования.

Таблица 3

Оценка доступных эксплуатационных характеристик для использования в разработке обычных рутинных смесей

Эксплуатационные характеристики	Метод	Стандартизация		Критерий		Сложность		Оборудование		
		Метод	Точность	Разработка смеси принята/отклонена	Модель прогноза характеристик	Метод	Анализ	Доступность	Надёжность	Стоимость
Динамический модуль упругости	AMPT Динамический модуль	Да	Да	—	Да	Средн.	Средн.	Да	Высок.	Средн.
	Простой сдвиг	Да	Да		Да	Средн.	Средн.	Да	Средн.	Высок.
	Динамический модуль непрямого растяжения	Нет	Нет		Да	Средн.	Средн.	Нет	Средн.	Высок.
Остаточная деформация	AMPT Число текучести	Да	Да	Да	Да	Средн.	Низк.	Да	Высок.	Средн.
	Повторный сдвиг	Да	Да	Да	Да	Средн.	Средн.	Да	Средн.	Высок.
	Прочность на непрямое растяжение при высокой температуре	Проект	Нет	Да	Нет	Низк.	Низк.	Да	Высок.	Низк.
	APA (анализатор АБ покрытия)	Да	Нет	Да	Нет	Средн.	Низк.	Да	Высок.	Средн.
	Гамбургский тест на колейность	Да	Нет	Да	Нет	Средн.	Низк.	Да	Высок.	Средн.
Трещинообразование, связанное с нагрузкой	Усталость при изгибе	Да	Нет	Нет	Да	Высок.	Средн.	Да	Высок.	Средн.
	AMPT Продолжающееся воздействие	Нет	Нет	Нет	Да	Высок.	Высок.	Да	Высок.	Средн.
	Энергетическое соотношение (уровень энергии)	Нет	Нет	Да	Да	Высок.	Высок.	Да	Высок.	Высок.
	Энергия разрушения	Нет	Нет	Нет	Да	Низк.	Низк.	Да	Высок.	Высок.
Термическое трещинообразование	Ползучесть и прочность (IDT)	Да	Нет	Нет	Да	Высок.	Высок.	Да	Высок.	Высок.
	Определение энергии разрушения образца (DCT)	Да	Да	Да	Да	Высок.	Низк.	Да	Высок.	Высок.
	Испытание полуобразца на изгиб (SCB)	Проект	Нет	Да	Нет	Средн.	Низк.	Да	Высок.	Высок.
Влагостойкость	Уровень (степень) прочности на разрыв	Да	Да	Да	Нет	Средн.	Низк.	Да	Высок.	Низк.
	Гамбургский тест на колейность	Да	Нет	Да	Нет	Средн.	Низк.	Да	Высок.	Средн.

Литература

1. Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., and VonQuintus, H., "Simple Performance Test for Superpave Mix Design," NCHRP Report 465, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2002.

2. Bonaquist, R. F., Christensen, D. W., and Stump, W, "Simple Performance Tester for Superpave Mix Design: First Article Development and Evaluation, NCHRP Report 513, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2003.

3. Bonaquist, R., "Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice," NCHRP Report 614, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2008.

4. Bonaquist, R., "Ruggedness Testing of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests with the Simple Performance Tester," NCHRP Report 629, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2008.

5. Bonaquist, R., "Precision of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests Conducted with the Asphalt Mixture Performance Tester," NCHRP Report 702, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2011.

6. Hou, T., Underwood, B. S., and Kim, R., "Fatigue Performance Prediction of North Carolina Mixtures Using the Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 79, 2010.

7. Christensen, D. W., and Bonaquist, R. "Analysis of HMA Fatigue Data Using the Concepts of Reduced Loading Cycles and Endurance Limit," Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 78, 2009.

8. Anderson, R. M., Turner, P. A., Peterson, R. L., and Mallick, R. B., "Relationship of Superpave Gyratory Compaction Properties to HMA Rutting Behavior," NCHRP Report 478, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2002.

9. Kandhal, P. S., and Cooler, L. A., Jr., "Accelerated Laboratory Rutting Tests: Evaluation of the Asphalt Pavement Analyzer," NCHRP Report 508, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2003.

10. National Cooperative Highway Research Program, Research Results Digest Number 262, "Field Shear Test for Hot Mix Asphalt," Transportation Research Board, Washington, D. C., February, 2002.

11. Applied Research Associates, "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures," Final Report of NCHRP Project 1–37A, National Cooperative Highway Research Program, March, 2004.

12. Advanced Asphalt Technologies, LLC "A Manual for Design of Hot Mix Asphalt with Commentary," NCHRP Report 673, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2011.

13. Bonaquist, R., "Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt," NCHRP Report 691, Transportation Research Board, Washington, D. C., 2011.

14. Marasteanu, M., Zofka, A., Turos, M., Li, X., Velasquez, R., Li, X., Buttlar, W., Paulino, G., Braham, A., Dave, E., Ojo, J., Bahia, H., Williams, C., Bausano, J., Gallistel, A., and McGraw, J., "Investigation of Low Temperature Cracking in Asphalt Pavements National Pooled Fund Study 776," Report MN/RC 2007–43, Minnesota Department of Transportation, St. Paul, MN, October 2007.

Глава 4

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ СВОЙСТВ БИТУМА И СМЕСИ

Цель данного исследования — прогнозирование реологических свойств и прочности при растяжении асфальтобетона на основе традиционного битумного вяжущего и анализ низкотемпературного трещинообразования[2]. Работа выполнена при поддержке Дорожного комитета Министерства по инвестициям и развитию Республики Казахстан (Контракт № 36 от 21.07.2016 г.).

Параметры модифицированной модели Кристенсена-Андерсона-Марастеану для описания модуля релаксации битума были связаны с индексом пенетрации и температурой размягчения битума по приближенным формулам, основанным на номограмме Ван дер Поля для определения жесткости битума. Функция релаксации горячей асфальтобетонной смеси описана с использованием модели Кристенсена-Бонаквиста. Прочность при растяжении горячей асфальтобетонной смеси в зависимости от времени нагружения и температуры была связана с жесткостью битума по уравнению, основанному на данных Хекелома и эмпирической формуле Моленаар-Ли. Прочность горячей асфальтобетонной смеси также изучалась путем проведения испытаний на растяжение при постоянных как скорости деформации, так и температурах. Результаты испытаний были проанализированы с учетом рассчитанного увеличения напряжения со снижением температуры при различных скоростях охлаждения. Критическая температура оценивалась путем сравнения температурного напряжения и прочности асфальтобетона при растяжении при постоянной скорости изменения напряжения.

Низкотемпературное трещинообразование является одной из основных причин разрушения асфальтобетонных покрытий в регионах с холодными климатическими условиями, включая большую часть США, Канады, России, Украины, Казахстана и других стран, расположенных в крайних северных и южных широтах. Температурное трещинообразование связано с изменением объема в слое асфальтобетона. Понижение температуры приводит к уменьшению объема дорожного покрытия, однако температурные деформации не развиваются. Это вызывает температурные напряжения в покрытии. Они накапливаются до тех пор, пока не достигнут предела прочности материала, что приведет к образованию трещин, способствующих уменьшению таких напряжений.

Монисмит, Секор и Секор (Monismith, Secor, Secor, 1965) разработали теоретический метод расчета температурного напряжения в асфальтобетонных покрытиях, как в бесконечной вязкоупругой балке на основе решения Хамфриса и Мартина (Humphreys and Martin, 1963). Для установления связи между зависящими от времени напряжениями и деформациями при-

---

[2] ***B. Teltayev, B. Radovskiy.*** Predicting thermal cracking of asphalt pavements from bitumen and mix properties. Источник: Road Materials and Pavement Design –2017. – July. – PP. 1–16. – англ.

меняли принцип суперпозиции Больцмана и наследственную интегральную форму уравнения состояния (определяющее уравнение) для линейного вязкоупругого материала. В настоящее время данный метод используется многими исследователями для оценки критической температуры трещинообразования. Хиллсом и Брайеном (Hills and Brien, 1966) был разработан простой псевдоупругий метод расчета температурных напряжений в асфальтобетонном покрытии. Прогнозируемое напряжение зависело от времени нагружения, равного временному интервалу численного интегрирования, по которому вычислялось изменение напряжения.

Фромм и Пханг (Fromm and Phang, 1971) устранили зависимость численного интегрирования от временного интервала, устанавливая время нагружения. Однако результаты расчета напряжений по-прежнему напрямую зависели от указанного времени нагружения. Кристисон, Мюррей и Андерсон (Christison, Murray и Anderson, 1972), используя пять различных методов расчета напряжений, в том числе методы Монисмита и Хиллса-Брайена, пришли к выводу, что потенциальную возможность низкотемпературного трещинообразования дорожного покрытия данного типа можно оценить, если жесткость и прочностные характеристики асфальтобетонных смесей известны, как функция температуры и времени нагружения. Батллар и Рок (Buttlar и Roque, 1994) разработали испытание на косвенное растяжение (indirect tension test, IDT) для измерения податливости при ползучести и прочности при растяжении асфальтобетонных смесей при низких температурах. Косвенное испытание на растяжение IDT наилучшим образом подходит для оценки уже имеющихся дорожных покрытий. Однако несколько различий между продольным (осевым) растяжением и испытанием на косвенное растяжение (IDT) ставят под сомнение взаимозаменяемость значений податливости при ползучести и прочности при растяжении, полученных путем применения двух методов испытаний. Боулдин, Донгре, Роув, Шаррок и Андерсон (Bouldin, Dongre, Rowe, Sharrock и Anderson, 2000) рассмотрели температурное напряжение в битумном вяжущем как в вязкоупругом стержне и заключили, что средняя точка (температура) перехода битумного вяжущего в стеклообразное состояние близка к критической температуре трещинообразования в дорожном покрытии. На основании исследования Боулдина с соавторами (Bouldin et al., 2000) в стандартах на битумные вяжущие Ассоциации AASHTO[3] и Общества ASTM[4], MP1a-02[5] (AASHTO, 2002), PP 42–07[6] (AASHTO, 2007) и ASTM D 6816–02[7] (ASTM, 2002), температурные напряжения асфальтобетонной смеси были рассчитаны путем произведения значения температурного напряжения битумного вяжущего на эмпирический коэффициент (константу) дорожного покрытия, равный 18. Это было сделано с целью определения критической температуры трещинообразования, при которой кривая температурного напряжения смеси и кривая прочности вяжущего пересекаются (Мун, Марастеану и Турос (Moon, Marasteanu, & Turos, 2013)). Во-первых, прочность вяжущего при растяжении при постоянной скорости деформации, равной 3%/мин., не может использоваться также, как и прочность смеси при растяжении при разных скоростях напряжения. Во-вторых, для преобразования свойств вяжущего в свойства смеси недостаточно одной только константы дорожного покрытия. Этот метод не может отражать разницу в температурных напряжениях для смесей, приготовленных с минеральными заполнителями, различными по типу и грануло-

---

[3] *American Association of State Highway and Transportation Officials* (*AASHTO*) — англ. Американская ассоциация руководителей дорожных и транспортных служб штатов.

[4] *American Society for Testing and Materials (ASTM*) — англ. Американское общество по испытанию материалов.

[5] MP1a-02 — Standard Specification for Performance Graded Asphalt Binder — англ. Технические условия на битум, классифицированного в зависимости от эксплуатационных качеств.

[6] AASHTO PP 42–07 Standard Method of Test for Determination of Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders — англ. Стандартный метод испытания по определению класса битумных вяжущих в зависимости от их эксплуатационных качеств при низких температурах.

[7] ASTM D 6816–02 — Standard Practice for Determining Low-Temperature Performance Grade (PG) of Asphalt Binders — Стандартная методика определения класса битумных вяжущих в зависимости от их эксплуатационных качеств при низких температурах. (Для классификации товарных битумов по сортам в зависимости от их качества разработаны и применяются различные методы испытания — прим. ред.).

метрическому составу, а также для асфальтобетонных смесей с разными объемными показателями (количество воздушных пор, вяжущее и т. д.). Например, Рой и Хесп (Roy and Hesp, 2001) для ограниченного набора вяжущих установили изменение «константы» дорожного покрытия в диапазоне от 3,4 до 16,7. Ху, Чжоу и Валубита (Hu, Zhou, and Walubita, 2009), Прието-Муньос, Инь и Бутлар (Prieto-Munoz, Yin, and Buttlar, 2013), а также Дэйв, Бутлар, Леон, Бехния и Паулино (Dave, Buttlar, Leon, Behnia, and Paulino, 2013) заменили одномерную модель дорожного покрытия анализом низкотемпературного трещинообразования напряженной двумерной модели, проведенным в рамках моделирования вязкоупругих свойств методом конечных элементов. Фаррар, Хадж, Планш, Алави (Farrar, Hajj, Planche, и Alavi, 2013) обобщили результаты исследования температурного напряжения защемленных и незащемленных образцов асфальтобетона. Изменение измеренного температурного напряжения защемленных образцов асфальтобетона было аналогично накоплению температурного напряжения, рассчитанного по интегральному уравнению наследственного типа Больцмана. Модуль релаксации асфальтобетона определяли путем аппроксимированного преобразования комплексного (динамического) модуля, оцененного по модели, основанной на законе для композитных материалов, а также измеренного комплексного модуля восстановленного битумного вяжущего (Фаррар с соавторами (Farrar et al., 2013)).

Низкотемпературное поперечное трещинообразование в асфальтобетонных покрытиях является результатом сочетания двух механизмов повреждения: единичного события температурного трещинообразования и температурной усталости. В данном исследовании рассматривалось единичное событие температурного трещинообразования как существенная причина поперечного трещинообразования дорожных покрытий. Для лучшего понимания способов снижения низкотемпературного трещинообразования необходима механистическая модель, охватывающая спрогнозированные реологические свойства и характеристики разрушения асфальтобетона.

Целью данного исследования являлась разработка приближенных (аппроксимированных) соотношений для прогнозирования вязкоупругих свойств и прочности при растяжении асфальтобетона на основе традиционного битумного вяжущего как зависимость времени и температуры нагружения и их применение для решения проблемы низкотемпературного трещинообразования.

Модуль жесткости $S(t)$, введенный Ван дер Полем (Van der Poel, 1954), представляет собой отношение постоянного приложенного одноосного напряжения σ_0 к полученной одноосной деформации $\varepsilon(t)$ в момент времени t. Основываясь на результатах испытаний 47 образцов битумов, Ван дер Поль разработал номограмму для определения жесткости асфальтобетона в зависимости от температуры T и времени нагружения t (или частоты ω), если известны температура размягчения Ts и индекс пенетрации PI. Для того, чтобы рассчитать жесткость вяжущего, удобно использовать разработанную Г. Роу и М. Шарроком (G. Rowe and M. Sharrock (Abatech, Inc.)) программу BitProps (бесплатное программное обеспечение) на основе анализа (сканирования) номограммы Ван дер Поля.

Несколькими исследователями были предложены эмпирические уравнения для определения модуля жесткости битума в зависимости от пенетрации и температуры размягчения, основываясь на данных, полученных Ван дер Полем. Сааль (Saal, 1955) предложил зависимость между жесткостью битума и его пенетрацией для длительности нагружения $t = 0{,}4$ с и $PI = 0$. Уллидз и Ларсен (Ullidz and Larsen, 1984) предложили простое уравнение для $S(t)$ и ограничили его применимость для длительности нагружения в дипазоне $0{,}01 < t < 0{,}1$, индекса пенетрации — $1 < PI < 1$ и температур — $10\,°C < T < 70\,°C$. Даже в этом узком диапазоне входных параметров средний коэффициент вариации жесткости, рассчитанный с использованием предложенного уравнения на основе данных Ван дер Поля, составляет 40%. Шахин (1977) разработал два уравнения регрессии, основанные на номограмме Ван дер Поля, с целью связать

модуль жесткости со временем, температурой, индексом пенетрации и температурой размягчения: один из них для S < 1 МПа, а другой для S > 1 МПа. Диапазон их применимости с точки зрения входных параметров не был определен. Между тем неясно, какое значение будет иметь модуль жесткости и какую из этих формул следует использовать. Более того, часто для одного и того же набора входных параметров первое уравнение возвращает $S < 1$ МПа, а второе — $S > 1$ МПа, и непонятно, какой из результатов является правильным. Насколько известно, предложенные формулы для определения жесткости битума, на основе данных Ван дер Поля, были главным образом разработаны с использованием только регрессионных методов без применения каких-либо реологических моделей.

В рассматриваемом исследовании в качестве математической модели для описания жесткости битума использовалось выражение Кристенсена и Андерсона (1992):

$$S(t) = E_g \cdot [1 + \left(\frac{E_g t}{3\eta} \right)^{\beta}]^{-1/\beta}, \quad (1)$$

где E_g — модуль вяжущего в стекловидной фазе в условиях одноосного сжатия (МПа);

$\acute{\eta}$ — стабилизированная вязкость (МПа-с);

β — постоянная (константа).

Мгновенная величина модуля продольной упругости E_g была получена путем экстраполяции значений модуля жесткости $S(T, t)$ по Ван дер Полю при низкой температуре T и малой длительности нагружения t при $t \to 0$. С целью экстраполяции была использована модель, разработанная для описания вязкоупругих свойств аморфных стеклующихся полимеров (Дроздов (Drozdov), 2001) на основе теории кооперативной релаксации (Адам и Гиббс (Adam & Gibbs), 1965). Для битума с определенным индексом пенетрации была выбрана самая низкая температура, при которой с помощью программы BitProps значение жесткости S можно получить при $t = 0{,}00005$ с. Значения самых низких температур варьировались от –42 ° для $PI = +2$ до 9° для $PI = -3$. Модуль жесткости S был получен при самой низкой температуре для ряда из восьми периодов нагружения $t = 0{,}00005$; 0,0001;0,0002; 0,0005; 0,001; 0,002; 0,005 и 0,01 с. Затем, используя уравнения (18) и (37), предложенные Дроздовым (2001), определяли величину мгновенного продольного модуля путем подбора данных Ван дер Поля для модуля жесткости для восьми периодов времени нагружения. Был сделан вывод о том, что для битумов с индексом пенетрации от –2 до + 3 среднее значение мгновенного продольного модуля равно $E_g = 2460$ МПа со стандартным отклонением 7%.

После сопоставления уравнения (1) с данными Ван дер Поля были получены следующие уравнения:

$$\beta = \frac{0.1794}{1 + 0.2084PI - 0.00524PI^2}, \quad (2)$$

$$\eta = \alpha_{T\,Ahrr}(T) \cdot \eta(T_r) \quad (at\ T \le T_s - 10),$$

$$\eta = \alpha_{T\,WLF}(T) \cdot \eta(T_r) \quad (at\ T > T_s - 10), \quad (3)$$

$$\eta(T_r) = 0.00124 \left[1 + 71 \exp\left[-\frac{12(20 - PI)}{5(10 + PI)} \right] \right] \cdot \exp\left(\frac{0.2011}{0.11 + 0.0077PI} \right), \quad (4)$$

где T_r — исходная (эталонная) температура $T_r = (T_s - 10)$ [°C], $\alpha_T(T)$ — функция исходя из принципа температурно-временной суперпозиции:

$$\alpha_{T\,Ahrr}(T) = \exp\left[11720 \cdot \frac{3(30 + PI)}{5(10 + PI)} \left[\frac{1}{(T + 273)} - \frac{1}{(T_s + 263)} \right] \right], \quad (5)$$

$$\alpha_{T\,WLF}\,(T) = \exp\,[-\frac{2.303\left(T - T_s + 10\right)}{\left(0.11 + 0.0077PI\right)\left(114.5 + T - T_s\right)}. \tag{6}$$

Для 1910 точек в диапазоне *PI* от –3 до + 2, $(T - T_s)$ от –45 °C до 10 °C и *t* от 10^{-4} до 10^4 с стандартное отклонение модуля жесткости, рассчитанное с использованием уравнения (1) по данным Ван дер Поля, составило 14,6%, а коэффициент смешанной корреляции $R^2 = 0{,}978$.

По определению модуль жесткости *S(t)* обратно пропорционален податливости при ползучести в условиях одноосного нагружения. Зависимая функция — это податливость при сдвиговой ползучести:

$$J(t) = \frac{1}{G_g}[1 + \left(\frac{G_g t}{\eta}\right)^{\beta}]^{1/\beta}, \tag{7}$$

где β задается уравнением (2);

G_g = модуль сдвига в стекловидной фазе;

$G_g \approx E_g/3$ = 820 МПа, если материал считается изотропным с коэффициентом Пуассона, равным $\nu = 0{,}5$.

Однако следует отметить, что ν зависит от времени (Ди Бенедетто, Делапорте и Саузеат (Di Benedetto, Delaporte, & Sauzeat), 2007).

Существуют различные методы преобразования податливости при сдвиговой ползучести *J(t)* в модуль релаксации *G(t)*. В данном исследовании был выбран модифицированный алгоритм Хопкинса-Хэмминга (Щегл (Tschoegl), 1989), а модуль релаксации *G(t)* был аппроксимирован по модели Кристенсена, Андерсона и Марастеану (Christensen, Anderson and Marasteanu (CAM) (Marasteanu & Anderson), 1999):

$$\begin{aligned} J(t) &= \frac{1}{G_g}[1 + \left(\frac{G_g t}{\eta}\right)^{\beta}]^{1/\beta} \\ G(t) &= G_g[1 + \left(\frac{G_g t}{\eta}\right)^{b}]^{-k/b}, \end{aligned} \tag{8}$$

где *b* и *k* — постоянные.

Следует отметить, что параметр *k* является функцией от *b* из следующего уравнения (Ферри (Ferry, 1980)):

$$\int_0^{\infty} G(t)dt = \eta\,, \tag{9}$$

который можно рассматривать как параметр определения вязкости с нулевым сдвигом $\acute{\eta}$. После замены уравнения (8) уравнением (9) и интегрирования легко найти, что точно $k = 1 + b$. Это приводит к следующей формуле определения модуля релаксации при сдвиге:

$$G(t) = G_g[1 + (\frac{G_g t}{\eta})^{b}]^{-(1+1/b)}, \tag{10}$$

где

$$b = \left(\frac{1}{\beta} + \frac{\ln(\pi)}{\ln(2)} - 2\right)^{-1} \tag{11}$$

Модуль релаксации вяжущего в условиях одноосного нагружения может быть найден как $E_b(t) \approx 3G(t)$, где его модуль сдвига *G(t)* задается уравнением (10).

Комплексный модуль битума при сдвиге определяли по уравнению податливости при сдвиговой ползучести (7) при частоте, равной обратной величине времени нагружения по методу Шварцля и Струика (Schwarzl and Struik, 1968), следующего вида:

$$G_d(\omega) = \frac{G_g}{\Gamma\left(1+m(\eta)\right)}\left[1+\left(\frac{G_G}{\eta\omega}\right)^{\beta}\right]^{-1/\beta}, \quad \delta(\omega) = m(\omega)\pi/2, \tag{12}$$

где $G_d(\omega)$ — норма комплексного модуля;

δ — угол сдвига фаз;

ω — частота;

$\Gamma(x)$ — гамма-функция;

при

$$m(\omega) = \frac{(G_g/\eta\omega)^{\beta}}{1+(G_g/\eta\omega)^{\beta}} \tag{13}$$

Например, сравнение полученных экспериментальным путем результатов (Кристенсен и Андерсон (Christensen & Anderson), 1992) при T = 25 °C со значениями, рассчитанными по уравнению (12) $G_d(\omega)$ и $\delta(\omega)$ проиллюстрировано на рис. 21 для образца битума, подготовленного по методике SHRP[8], марки AAB-1, с пенетрацией 25 = 98 дмм, T_s = 47,8 °C, PI = 0 (Мортазави и Моултхроп (Mortazavi & Moulthrop), 1993). Испытания проводились на реометре динамического сдвига в диапазоне частоты от 0,1 до 100 рад/с при температурах –35, –25, –15, –5, 5, 15, 25, 35, 45 и 60 °C. Затем данные, полученные при всех температурах, были сдвинуты (смещены) с учетом времени для того, чтобы построить обобщенную кривую при эталонной температуре 25 °C (Christensen & Anderson, 1992).

Необходимо отметить хорошее совпадение рассчитанных и полученных в ходе эксперимента результатов относительно нормы комплексного модуля и угла сдвига фаз.

Спектр времени релаксации — практичный фундаментальный способ охарактеризовать зависящие от времени свойства битумных вяжущих (Кристенсен, Андерсон и Роу (Christensen, Anderson, & Rowe), 2016). Согласно правилу Альфрея (Ferry, 1980), спектр времени релаксации $H(\tau)$ вяжущего можно получить в первом приближении как отрицательный наклон модуля релаксации. Дифференцируя уравнение (10) относительно ln t, получают:

$$H(\tau) = G_g(1+b)\left(\frac{G_g\tau}{\eta}\right)^{b}\left[1+\left(\frac{G_g\tau}{\eta}\right)^{b}\right]^{-\left(2+\frac{1}{b}\right)} \tag{14}$$

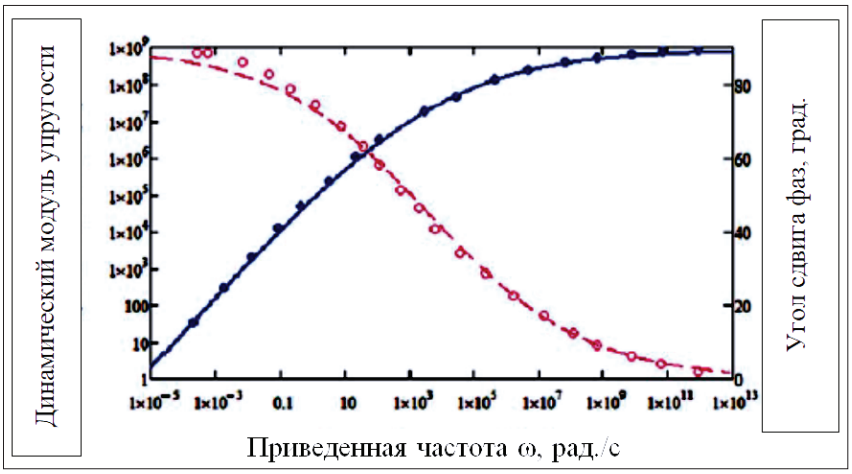


Рис. 21. Пример сравнения данных, прогнозируемых по модели, с экспериментальными данными комплексного модуля и угла сдвига фаз, в зависимости от частоты: точки — измеренные данные (Christensen & Anderson, 1992), линии — рассчитанные по уравнению (12)

[8] Англ. Strategic Highway Research Program — Программа стратегических исследований в области автомобильных дорог

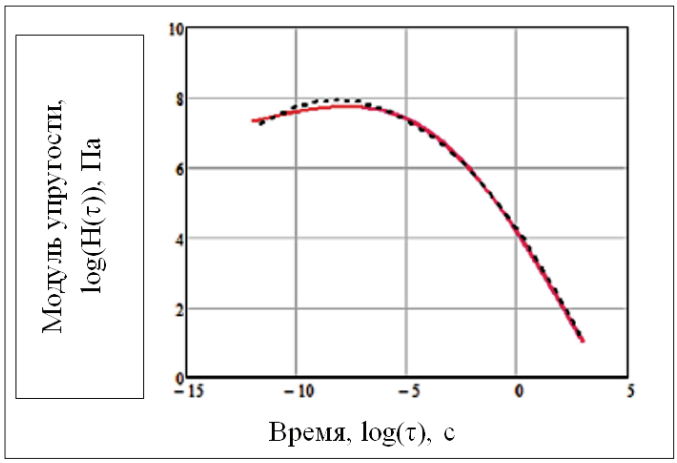


Рис. 22. Спектр времени релаксации битума марки AAB-1 при температуре, равной 25 °C: пунктирная линия — по экспериментальным данным (построена с допущением по Кристенсену, 1992); сплошная линия — рассчитана по уравнению (14)

Спектр времени релаксации, рассчитанный в работе Кристенсена (1992, рис. 3.4) для образца битума SHRP марки APA-1 на основе измерений комплексного модуля, представлен на рис. 22 вместе с рассчитанным по уравнению (14). Отмечается хорошее соответствие между данными. Из уравнения (14) легко получить время релаксации, соответствующее максимальной плотности спектра:

$$\tau_{\max} = \frac{\eta}{G_g}\left(\frac{b}{1+b}\right)^{1/b} \tag{15}$$

и его максимальную плотность:

$$H_{max} = G_g b\left(\frac{b+1}{2b+1}\right)^{(2b+1)/b} \tag{16}$$

Для оценки максимальной плотности спектра времени релаксации битума допустимым является $H\max = Ggb/3$. Отсюда следует, что максимальная плотность спектра прямо пропорциональна параметру b модели CAM, и что она не зависит от температуры битума.

Очевидно, что важные реологические свойства битума, такие как жесткость, модуль релаксации, комплексный модуль и спектр времени релаксации, можно оценить по предложенным уравнениям, с использованием стандартных свойств битума: температуры пенетрации и размягчения.

Для анализа температурных напряжений необходим модуль релаксации асфальтобетона $E_{\text{mix}}(t)$ в условиях одноосного сжатия. Кристенсеном и Бонаквистом (2015) относительно недавно была улучшена модель:

$$E_{\max}(t) = P_c\left[E_{agg}\cdot(1-VMA) + E_b(t)\cdot VFA\cdot VMA\right] \tag{17}$$

$$P_c = 0.006 + 0.994[1 + \exp(-(0.0663 + \\ + 0.586\cdot\ln(VFA\cdot E_b(t)/3) - 12.9VMA - 0.17\cdot\ln(\varepsilon_s\cdot 10^6))]^{-1} \tag{18}$$

где $E_b(t)$ — модуль релаксации вяжущего (МПа);

E_{agg} — модуль упругости минерального заполнителя (МПа);

VMA — Voids in the mineral aggregate — англ. содержание пор в минеральном заполнителе (объемная доля);

VFA — voids filled with asphalt — англ. содержание пор, заполненных битумом (объемная доля);

s_s = 0,0001 является стандартная целевая деформация;

P_c — коэффициент контакта, введенный в работе Кристенсена и Бонаквиста (2015) и определяемый по уравнению (18).

Та же модель может быть использована для определения модуля жесткости асфальтобетона S_{mix}(t), если заменить $E_b(t)$ на жесткость вяжущего *S(t),* определенную в соответствии с уравнением (1).

Для оценки критической температуры необходимо определить прочность при растяжении асфальтобетона в зависимости от температуры. В. Хеукелом (W. Heukelom) представил убедительные доказательства того, что прочность при растяжении смеси связана со свойствами содержащегося в ней битума, (Heukelom, 1966). Хеукелом привел некоторые данные измерений прочности при растяжении восьми образцов плотных асфальтобетонных смесей при различных температурах и скоростях. Хеукелом показал, что относительная прочность при растяжении, т. е. величина прочности при растяжении, деленная на ее максимальное значение, может быть представлена одной кривой для всех испытанных смесей в зависимости от жесткости восстановленного битума (Heukelom, 1966, рис. 22):

$$R(S) = \frac{\text{Прочность при растяжении}}{\text{Максимальная прочность при растяжении}} \text{смеси.} \tag{19}$$

Кривая Хекелома может быть аппроксимирована уравнением:

$$R = \frac{0.774 + 0.039r + 0.141r^{4.547}}{1 + 0.026r^{3.608} \cdot \exp(1.145r)}, \tag{20}$$

где

$$r = \log(E_g/S);$$

E_g — модуль стеклования вяжущего в условиях одноосного сжатия (МПа);

S — жесткость вяжущего.

Моленаар и Ли (Molenaar and Li, 2014) предложили эмпирическое уравнение для оценки максимальной прочности при растяжении асфальтобетона P_h в зависимости от жесткости смеси и объемного содержания. В Технологическом университете Делфта были испытаны шесть плотных асфальтобетонных смесей и одна пористая смесь на основе битума с пенетрацией от 10/20 до 70/100 и минерального заполнителя с максимальным размером зерна от 4 до 32 мм в температурном диапазоне 5–35 °C при деформации с постоянной скоростью растяжения от 0,0001 до 0,04/с. Для прогнозирования максимальной прочности при растяжении смесей был проведен регрессионный анализ в зависимости от жесткости смеси S_{mix} при 20 °C и соотношения битума и воздушных пор (VFA). Моленаар и Ли (Molenaar and Li, 2014) разработали следующее уравнение регрессии:

$$P_h = 0.505 \cdot S_{mix}^{0.308} \cdot VFA^{0.849}. \tag{21}$$

Комбинация уравнения (20) на основе кривой Хеукелома для относительной прочности смеси и эмпирического уравнения (21) для максимальной прочности смеси (Molenaar & Li, 2014) позволяет получить следующее выражение для определения прочности при растяжении *f* в зависимости от температуры *T* и время нагружения *t*:

$$f = 0.505 \cdot S_{mix}^{0.308} \cdot VFA^{0.849} \cdot \frac{0.774 + 0.039r + 0.141r^{4.547}}{1 + 0.026r^{3.608} \cdot \exp(1.245r)}, \tag{22}$$

где S — жесткость вяжущего (МПа), определенная в уравнении (1), как зависимость от времени и температуры;

S_{mix} — жесткость смеси при $T = 20\,°C$ и фиксированном времени нагружения 0,06 с;

f — прочность при растяжении при прямоугольном импульсном нагружении в течение времени t.

Уравнение (22) позволяет связать прочность при растяжении асфальтобетона f с температурой T и временем до разрушения t_f с точки зрения жесткости вяжущего при ползучести $S(t_f)$, как предположил Хеукелом (1966). При постоянной скорости деформации V_e, прочность при растяжении f_e в левой части уравнения (19) может быть выражена как произведение времени на разрушение, скорость деформации и секущий модуль при разрушении $H_{mix}(tf)$. Секущий модуль упругости $H_{mix}(t)$ связан с модулем релаксации $E_{mix}(t)$ следующим уравнением (Smith, 1976):

$$H_{mix}(t) = -\int E_{mix}(t-\tau)d\tau \tag{23}$$

Таким образом, используя уравнение (22), можно определить время до разрушения t_f, численно равное корню следующего уравнения:

$$t_f V_\varepsilon H_{mix}(tf) = 0.505 \cdot S_{mix}^{0.308} \cdot VFA^{0.849} \cdot \frac{0.774 + 0.039r + 0.141r^{4.547}}{1 + 0.026r^{3.608} \cdot \exp(1.245r)}, \tag{24}$$

где

$$r = \log(Eg/S(t_f)).$$

Затем прочность при растяжении асфальтобетона f_e при постоянной скорости деформации V_e может быть рассчитана как:

$$f_e = t_f V_\varepsilon H_{mix}(t_f). \tag{25}$$

В Брауншвейгском техническом университете были проведены испытания, в ходе которых было выполнено сравнение рассчитанной прочности при растяжении с постоянной скоростью деформации с результатами прямых измерений прочности при растяжении (Сток и Аранд (Stock & Arand), 1993). Основные характеристики разработанной университетом испытательной машины следующие: очень жесткая рама, тензометрический датчик для измерения длины образца, а также шаговый двигатель для нагружения образца с заранее установленной скоростью. Образцы были призматическими с поперечным сечением 40 мм на 40 мм. Длина образца составляла 160 мм. Семь асфальтобетонных смесей с одинаковым содержанием различных вяжущих — 4,7% по массе общей смеси были испытаны при постоянной скорости деформации $V_e = 1 \cdot 10^{-4}$/с (1 мм/мин) и при температурах 20; 5; 10 и –25 °C. Результаты испытаний смеси с немодифицированным битумом B1 с индексом пенетрации PI = –0,692 и температурой размягчения T_s = 49 °C при объемных свойствах смеси VMA = 0,15 и VFA = 0,733 представлены на рис. 23 вместе с кривой прочности на растяжение, рассчитанной по уравнению (25). Максимальная расчетная прочность и общая форма кривой согласуются с измеренной прочностью, однако кривая смещена по оси температуры примерно на 4–5 °C. Возможные причины такого смещения будут рассмотрены ниже.

В Казахстанском дорожном научно-исследовательском институте были проведены испытания на одноосное растяжение с помощью испытательной системы TRAVIS (производства компании InfraTest GmbH[9]), которая является версией устройства, разработанного в Брауншвейгском технический университете (рис. 24). Эта система для проведения испытаний включает компактную испытательную раму, встроенную в термокамеру. Нагрузка прикладывается к образцу с помощью усиленного винтового домкрата и шагового двигателя. Электронный датчик напряжений подключен непосредственно к шпинделю. Управление оборудованием осуществ-

[9] Немецкая компания «ИнфраТест ГмбХ».

ляется с помощью персонального компьютера (ПК), подключенного к двигателю и датчикам. ПК используется для записи результатов измерений, контроля хода испытаний и работы испытательной термокамеры.

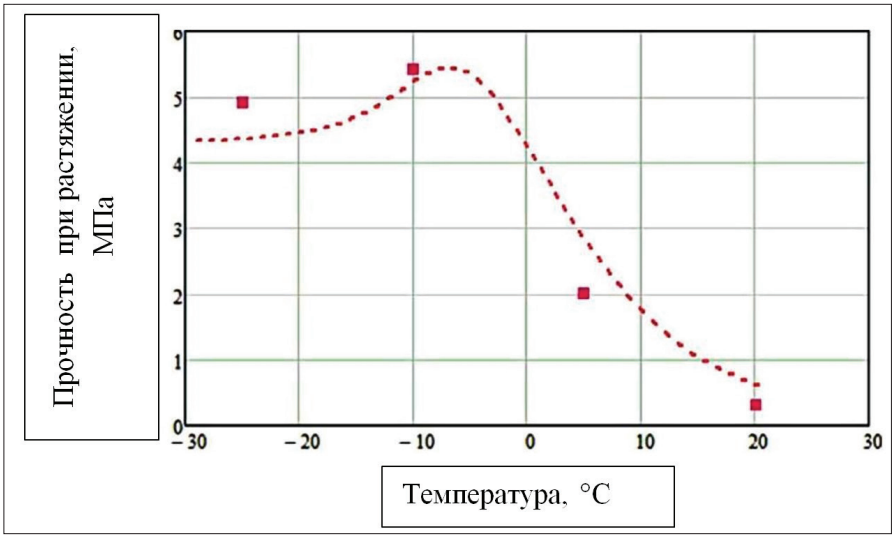


Рис. 23. Значения прочности при растяжении, измеренные при постоянной скорости деформации (Stock & Arand, 1993), и рассчитанные по уравнениям (24) и (25)

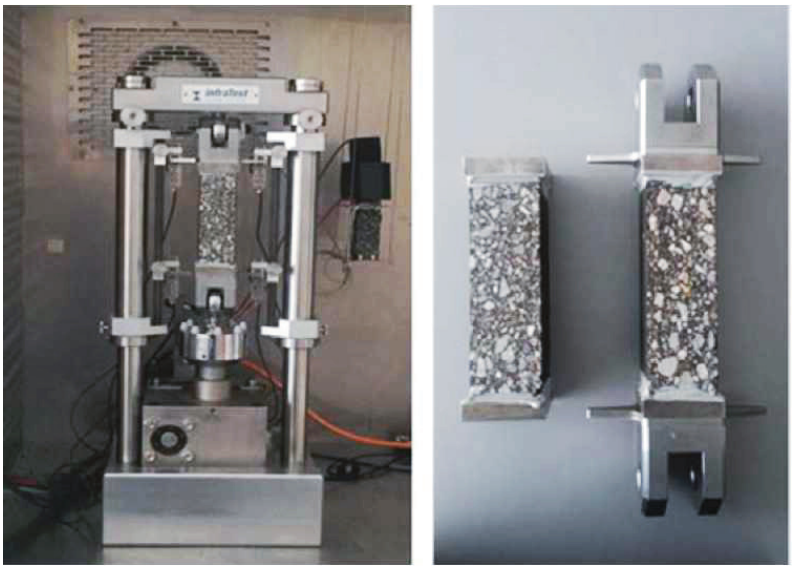


Рис. 24. Оборудование, используемое для механических испытаний в Казахстанском дорожном научно-исследовательском институте (КаздорНИИ)

Плотная асфальтобетонная смесь была приготовлена с использованием минерального заполнителя из гранита фракции 5–10 мм (20%), 10–15 мм (13%) и 15–20 мм (10%) из Ново-Алексеевского карьера (Алматинская область); песка фракции 0–5 мм (50%) завода «Асфальт-бетон-1» (г. Алматы), а также активированного минерального порошка (7%) из карьера в с. Кордай (Жамбылская область, Казахстан). Окисленный битум был произведен Павлодарским нефтехимическим заводом из сырой нефти Западной Сибири (Россия). После кратковременного старения пенетрация битума составляла 70 дмм (при 25 °С), температура размягчения T_s = 48 °С и PI = –0,91. Смесь, обозначенная как К2, была приготовлена с 4,8% битума по массе минерального заполнителя. Смесь уплотняли с помощью секторного пресса Cooper (модель

CRT-RC2S) до среднего количества пустот 3,6%. Затем из этих плит выпиливали прямоугольные образцы (50 x 50 x 160 мм³) и приклеивали эпоксидной смолой к держателям. Образцы испытывались с номинальной скоростью деформации 1 мм / мин ($V_e = 1 \cdot 10^{-4}$/с). Испытания проводились при температурах 20, 10, 0, 10, 20 и 30 °С. Значения прочности были получены в результате пяти испытаний на растяжение для всех температур (рис. 5). Средний коэффициент вариации составил 15,6%.

На рис. 5 представлены результаты сравнения измеренной прочности на растяжение образцов асфальтобетона и прочности асфальтобетона, рассчитанной по уравнениям (24) и (25) для $V_e = 1 \cdot 10^{-4}$/с, а также отражены объемные свойства смеси VMA = 0,144 и VFA = 0,75 (пунктирная кривая). Модуль минерального заполнителя с насыпным удельным весом $G_{sb} = 2{,}760$ определялась по корреляции, рекомендованной Кристенсеном и Бонаквистой (2015), как $Eagg = 7650 G_{sb}^{1.59} = 36\,000$ МПа.

На рис. 25, как и выше на рис. 3, рассчитанная максимальная прочность и форма спрогнозированной кривой (красная пунктирная линия) согласуются с измеренной прочностью при растяжении, но спрогнозированная кривая постоянно смещается вдоль оси температуры к более высоким температурам даже больше, чем на рис. 3. Этот сдвиг может быть вызван различными причинами. Одна из них, возможно, заключается в температурно-временной суперпозиции. Очевидно, что вяжущее независимо от структуры минерального заполнителя влияет на температурную зависимость битумосодержащего материала (Ди Бенедетто с соавт. (Di Benedetto et al.), 2011). В данной работе функция температурно-временной суперпозиции для вяжущего $a_T(T)$ в уравнениях (5) и (6) была определена по данным Ван дер Поля. Между тем, Андерсоном с соавт. (1990) было выявлено, что по номограмме Ван дер Поля занижается оценка жесткости битума при длительном нагружении и низких температурах. Хотя температурно-временная чувствительность битума при низких температурах является важной проблемой, что заслуживает дальнейших исследований, это не объясняет сдвиг при температурах $T > 0$ °С на рис. 5 (пунктирная кривая).

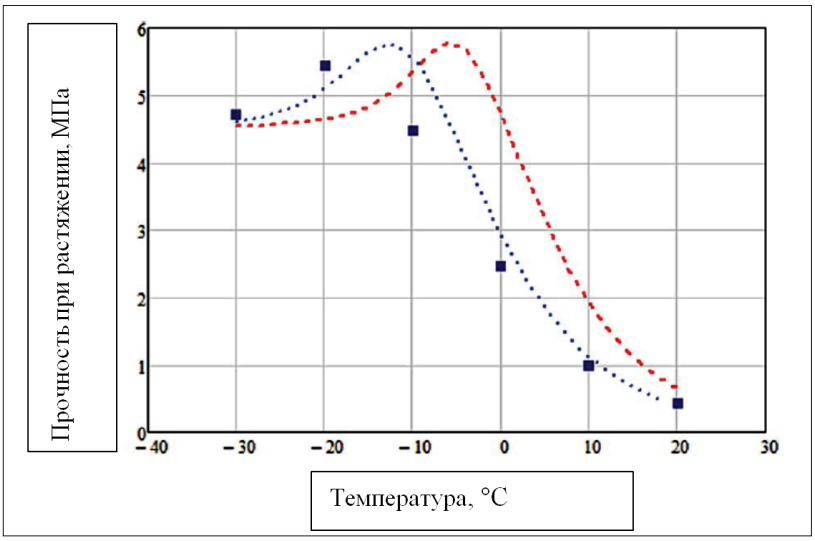


Рис. 25. Измеренные и рассчитанные значения прочности при растяжении: пунктирная кривая — рассчитанная по уравнениям (24) и (25) при постоянной скорости деформации VE = 1 · 10⁻⁴//с; точечная кривая — рассчитанная по уравнению (22) для среднего времени до разрушения $t_f = 40$ с

Другой возможной причиной такого смещения является влияние податливости (соответствия, деформируемости) оборудования (машины) на скорость деформации образца. Для упрощения процедуры сбора данных была разработана система TRAVIS с целью увеличения времени испытания при низких температурах. В результате, из-за податливости (де-

формируемости) оборудования (машины) скорость деформации образцов не была постоянной, учитывая, что скорость перемещения перекладины — 1 мм/мин. — остается постоянной во время испытания благодаря высокой жесткости материала при низких температурах. Фактическое время до разрушения составляло от 40 до 50 с при температурах 20; 10; 0; –10; –20 °С и около 20–25 с при T = –30 °С. Для проверки достоверности объяснения этой причины авторами данной работы была рассчитана прочность на растяжение той же асфальтобетонной смеси К2 при времени нагружения 40 с по уравнению (22) для PI = –0,91, Ts = 48 °С, VMA = 0,144 и VFA = 0,75 (точечная кривая на рис. 5). Наличие смещения рассчитанной кривой до низких температур ближе к измеренным значениям прочности подтверждает значительное влияние податливости оборудования (машины) на результаты испытания. Если для асфальтобетона необходимо провести настоящее испытание при постоянной скорости деформации, отклик на единицу нагружения должен быть от датчика обратной связи по положению на основе линейно регулируемого дифференциального трансформатора (англ. linear variable displacement transducer, LVDT), а не от поперечного смещения, как в случае данного эксперимента. Такое требование нагружения при постоянной деформации трудно выполнить. Более того, хотя оно используется некоторыми исследователями (Боулдин с соавт. (Bouldin et al.), 2000); (Кристисон с соавт. (Christison и et al.), 1972); (Сток и Аран) Stock & Arand, 1993)), преимущества испытания при постоянной скорости деформации вызывают сомнение в отношении использования получаемого значения для решения проблемы низкотемпературного трещинообразования, так как продольная деформация в асфальтобетонных покрытиях, вызванная охлаждением, не развивается, т. е. равна нулю до появления поперечной трещины. Для анализа отдельного события низкотемпературного трещинообразования больше подходит испытание на прочность при контролируемом напряжении, чем испытание на прочность при контролируемой деформации.

При постоянной скорости напряжения V_σ время до разрушения равно прочности при растяжении f_σ относительно скорости напряжения $t_f = f_\sigma / V_\sigma$. В этом случае жесткость вяжущего в правой части уравнения (22) зависит от прочности при растяжении и скорости напряжения. Прочность при растяжении f_σ при постоянной скорости напряжения V_σ может быть найдена численно из уравнения (26) как функция от T и V_σ:

$$f_\alpha = 0.505 \cdot S_{mix}^{0.308} \cdot VFA^{0.849} \cdot \frac{0.774 + 0.039r + 0.141r^{4.547}}{1 + 0.026r^{3.608} \cdot \exp(1.245r)}, \quad (26)$$

где

$$r = \log(\mathrm{Eg}/S(t_f = f_\sigma / V_\sigma)).$$

На рисунке 26 представлен график прочности при растяжении, рассчитанной по уравнению (26), для той же асфальтобетонной смеси К2 при разных постоянных скоростях напряжения.

Для пояснения отметим следующее: прочность смеси при T = –2 °С и V_σ = 0,05 МПа/с равна 3,1 МПа (рис. 26). В этом случае время до разрушения составляет 62 с; жесткость вяжущего при T = 20 °С и t = 0,06 с по уравнению (1) составляет S = 6,02 МПа; жесткость смеси при T = 20 °С и t = 0,06 с по уравнению (17) равна S_{mix} = 6040 МПа. Параметр r равен r = log (2460/S(T = –2 °С, t = 62 с)) = 2,611; а правая часть уравнения (26) возвращает величину прочности при растяжении до значения, равного 3,1 МПа. Десятикратное увеличение скорости напряжения сдвигает кривую прочности в зависимости от температуры до более высоких температур примерно на 7 °С (рис. 26).

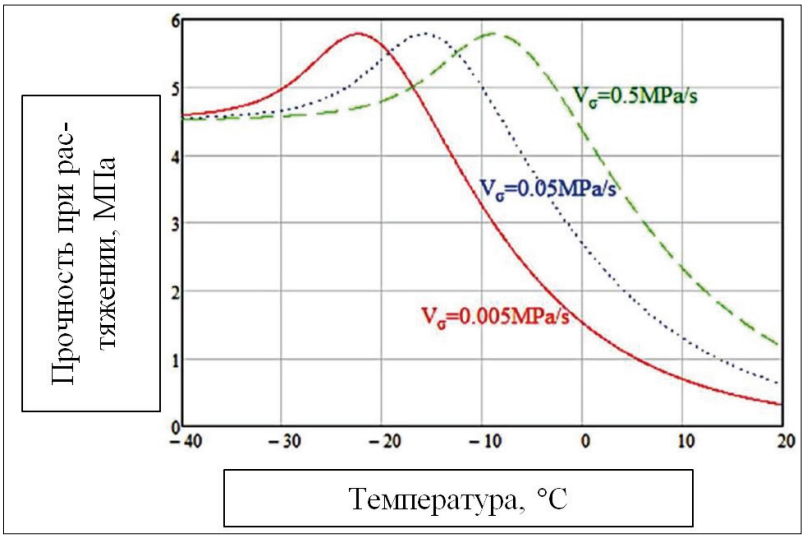


Рис. 26. Прочность при растяжении асфальтобетона в зависимости от температуры, рассчитанная по уравнению (26) при разных скоростях напряжения

Температурные напряжения и критическая температура

Для определения критической температуры единичного события трещинообразования использовали спрогнозированный модуль релаксации E_{mix} и зависящую от скорости напряжения прочность при растяжении f_a. В ходе данного исследования критическая температура трещинообразования (T_{cr}) определяется как температура, при которой прочность асфальтобетона при растяжении при постоянной скорости напряжения пересекает кривую температурного напряжения.

Напряжения в асфальтобетонных покрытиях, вызванные низкой температурой, были рассчитаны, как в бесконечной вязкоупругой балке, на свободном от трения жестком основании:

$$\alpha(t) = -\int_0^t \alpha_{mix}\left(T(\tau)\right) E_{mix}\left(\xi(t) - \xi(\tau)\right)\left(\frac{d}{d\tau} T(\tau)\right) d\tau \qquad (27)$$

где t — настоящее время (с);

τ — прошедшее время (с);

$T(\tau)$ — изменение со временем температуры (°C);

α_{mix} — коэффициент теплового сжатия асфальтобетонной смеси (/°C);

E_{mix} — модуль релаксации (МПа);

$\xi(t)$ — уменьшенное время:

$$\xi(t) = \int_0^t d\tau / \alpha_T\left(T(\tau)\right).$$

Предположили, что коэффициент теплового сжатия — постоянная $\alpha_{\text{mix}} = 2{,}5 \cdot 10{-}5$ /°C. Были приняты те же, что и ранее показатели, характеризующие свойства вяжущего и смеси: Ts = 48 °C, PI = –0,91, E_{agg} = 36 000 МПа, VMA = 0,144, VFA = 0,75. Модуль релаксации асфальтобетона был определен по модели Кристенсена-Бонаквиста — уравнение (17).

Синусоидальные колебания между максимальной и минимальной температурами в течение суток принимались как в первом примере (рис. 27). Происходило снижение температуры от 5 °C до –35 °C, а затем ее повышение до 5 °C в течение 24 ч. Развитие (увеличение) температурного напряжения рассчитывалось по уравнению (27). Скорость растягивающего напряжения оценивали по выражению $V_\sigma(t) = d\sigma(t)/dt$, с изменениями от нуля до 3,8–10^{-4} МПа/с со средним значением около 2–10^{-4} МПа/с. Прочность при растяжении асфальтобетона f_σ при $f_\sigma = 2 \times 10^{-4}$ МПа/с, согласно уравнению (26), в зависимости от T показана на том же гра-

фике. Критическая температура трещинообразования, при которой кривая температурного напряжения и кривая прочности асфальтобетона пересекаются, составляет *Tcr* = –33 °C.

Во втором примере температура дорожного покрытия понижается от 5 °C до –35 °C при различных скоростях охлаждения. Как и ожидалось, скорость накопления напряжения находилась в зависимости от скорости охлаждения (рис. 28). При возрастании скорости охлаждения значительно увеличивается скорость температурного напряжения. При скорости охлаждения 2 °C/ч, что аналогично темпам охлаждения реальных дорожных покрытий, скорость нагружения при температуре примерно минус 30 °C составляет около $V_\sigma(t) = 2 \cdot 10^{-4}$ МПа/с (рис. 8). На рис. 29 приведен график изменения напряжений согласно уравнению (27) при скорости охлаждения 2 °C/ч и прочности асфальтобетона в зависимости от температуры по уравнению (26) при $V_\sigma(t) = 2\,10^{-4}$ МПа/с. Критическая температура приблизительно равна *Tcr* = –34,5 °C.

Низкотемпературное трещинообразование дорожных асфальтобетонных покрытий является широко распространенной и дорогостоящей проблемой в холодных регионах. Предоставление возможности прогнозирования напряжения в асфальтобетонных дорожных покрытиях, вызванного температурными изменениями, а также прочности асфальтобетона, исходя из свойств вяжущего и смеси, могло бы быть очень полезным для проектирования более устойчивых к трещинообразованию смесей.

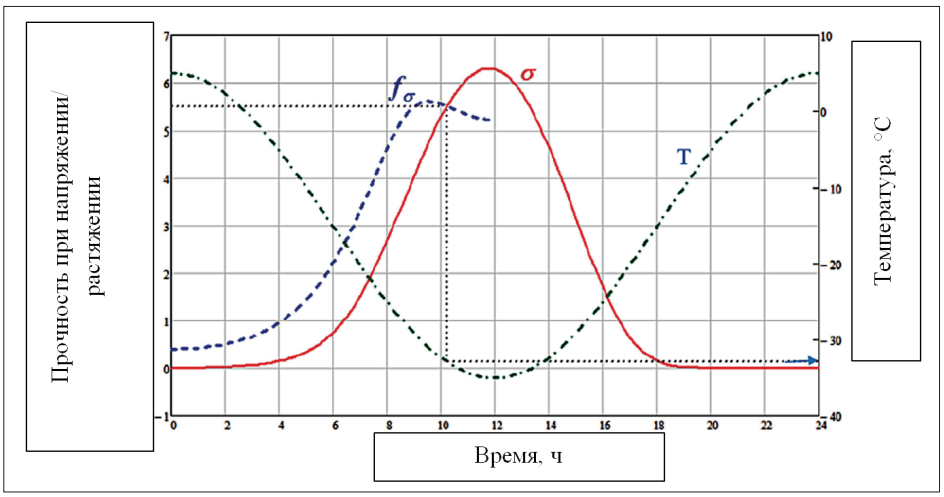


Рис. 27. Температурное напряжение и расчетная температура разрушения для синусоидальных температурных колебаний в течение суток

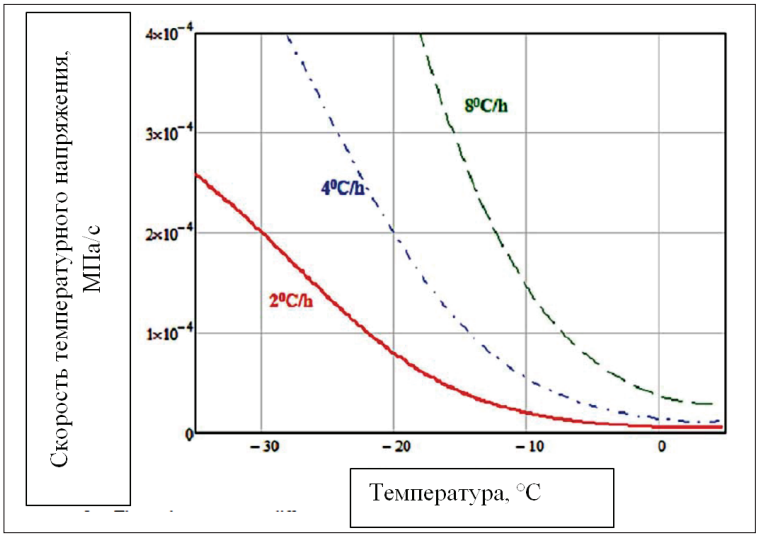


Рис. 28. Скорость температурного напряжения при различных скоростях охлаждения

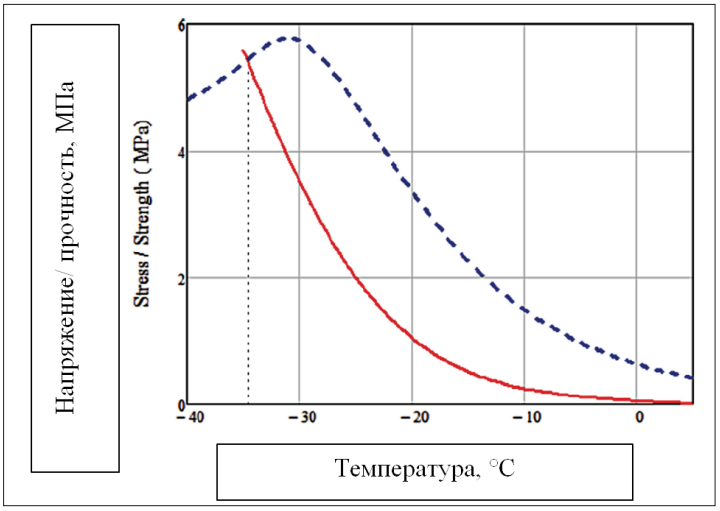


Рис. 29. Изменение температурного напряжения в зависимости от расчетной температуры разрушения при постоянном охлаждении

Выводы

На основе анализа, проведенного в ходе данного исследовании, можно сделать следующие выводы:

- Важные реологические свойства битума, такие как поддатливость при ползучести (уравнение (7)), модуль релаксации (уравнение (10)), комплексный модуль (уравнение (12)) и спектр релаксации (уравнение (14)), могут быть связаны с простейшими показателями его свойств, такими как температура пенетрации и размягчения, на основе экспериментальных данных и реологических моделей (модель CA в этом исследовании), используя взаимосвязи линейной вязкоупругости, а не применяя чисто регрессионные методы. Было бы интересно использовать более полную реологическую модель, такую как модель 2S2P1D (Ди Бенедетто, Олар, Саузеат и Делапорт (Di Benedetto, Olard, Sauzeat, & Delaporte, 2004)), для моделирования вязкоупругих свойств, как битума, так и смеси.
- Изменение прочности при растяжении асфальтобетонной смеси, обусловленное температурой, можно оценить в зависимости от свойств вяжущего и объемного состава смеси по эмпирическим уравнениям (22), (25) и (26). Оценка прочности асфальтобетона требует более комплексного механистического подхода для изучения перехода из пластического состояния в хрупкое, при низких температурах, возможно, на основе новой теории разрушения материалов (Кристенсен, 2013).
- Испытание на прочность при нагружении с постоянной скоростью напряжения для анализа низкотемпературного трещинообразования представляется более соответствующим.
- Предлагаемый метод определения критической температуры единичного события трещинообразования как температуры, при которой кривая температурных напряжений пересекает кривую прочности при постоянной скорости напряжения, позволяет получить достоверные результаты. Требуется проведение дополнительных исследований.

Литература

AASHTO. (2002). Standard specification for performance graded (PG) asphalt binder. *AASHTO Provisional Standards,* MP1a-02, Washington, DC.

AASHTO. (2007). Determination of low-temperature performance grade (PG) of asphalt binders. *AASHTO Provisional Standards,* PP 42–07. Washington, DC.

Adam, G., & Gibbs, J. H. (1965). On the temperature dependence of cooperative relaxation properties in glass-forming liquids. *The Journal of Chemical Physics, 43,* 139–146.

Anderson, D., Christensen, D., Dongre, R., Sharma, M., Runt, J., & Jordhal, P. (1990). Asphalt behaviour at low service temperatures. Federal Highway Administration-RD-88–078, U. S. Department Transportation, Washington, D. C., 337p.

ASTM. (2002). Standard practice for determining low-temperature performance grade (PG) of asphalt binders D 6816–02. *Annual book ofASTM standards, road and paving materials: Vehicle-pavement systems, 04–03.* West Conshohocken, Pennsylvania.

Bouldin, M., Dongre, R., Rowe, G., Sharrock, M. J., & Anderson, D. (2000). Predicting thermal cracking of pavements from binder properties-theoretical basis and field validation. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 69,* 455–488.

Buttlar, W. G., & Roque, R. (1994). Development and evaluation of the strategic highway research program measurement and analysis system for indirect tensile testing at low temperatures. *Transportation Research Record, 1454,* 163–171.

Christensen, D. W. (1992). *Mathematical modelling ofthe linear viscoelastic behaviour of asphalt cements* (thesis). The Pennsylvania State University.

Christensen, R. M. (2013). *The theory of materials failure.* Oxford: Oxford University Press.

Christensen, D. W., & Anderson, D. A. (1992). Interpretation of dynamic mechanical test data for paving grade asphalt cements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 61,* 67–116.

Christensen, D. W., Anderson, D. A., & Rowe, G. W. (2016). Relaxation spectra of asphalt binders and the Christensen-Anderson rheological model. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists,* Meeting Pre-prints, *86,* 546–577.

Christensen, D. W., & Bonaquist, R. (2015). Improved Hirsch Model for estimating the modulus of hot mix asphalt. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 84,* 527–557.

Christison, J. T., Murray, D. W., & Anderson, K. O. (1972). Stress prediction and low temperature fracture susceptibility of asphaltic concrete pavements. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 41,* 494–523.

Dave, E., Buttlar, W. G., Leon, S. E., Behnia, B., & Paulino, G. H. (2013). IlliTC — low-temperature cracking model for asphalt pavements. *Road Materials and Pavement Design, 14* (S2), 57–78.

Di Benedetto, H., Delaporte, B., & Sauzeat, C. (2007). Three-dimensional linear behavior of bituminous materials: Experiments and modeling. *International Journal of Geomechanics, 7,* 149–157.

Di Benedetto, H., Olard, F., Sauzeat, C., & Delaporte, B. (2004). Linear viscoelastic behavior of bituminous materials: From binders to mixes. *Road Materials and Pavement Design, 5,* 163–202.

Di Benedetto, H., Sauzeat, C., Bilodeau, K., Buannic, M., Mangiafico, S., Nguyen, Q. T., Van Rompu, J. (2011). General overview of the time-temperature superposition principle validity for materials containing bituminous binder. *International Journal of Roads and Airports, 1,* 35–52.

Drozdov, A. D. (2001). A model for the viscoelastic and viscoplastic responses of glassy polymers. *International Journal of Solids and Structures, 38,* 8285–8304.

Farrar, M. J., Hajj, E. Y., Planche, J. P., & Alavi, M. Z. (2013). A method to estimate the thermal stress build-up in an asphalt mixture from a single-cooling event. *Road Materials and Pavement Design,* 14 (1), 201–211.

Ferry, J. D. (1980). *Viscoelastic properties of polymers* (3rd ed.). New York, NY: Wiley.

Fromm, H. J., & Phang, W. A. (1971). Temperature susceptibility control in asphalt cement specifications. *Highway Research Record, 350,* 30–35.

Heukelom, W. (1966). Observations on the rheology and fracture of Bitumens and asphalt mixes. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 35,* 358–399.

Hills, J. F., & Brien, D. (1966). The fracture of Bitumens and asphalt mixes by temperature induced stresses. Prepared discussion. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 35,* 292–309.

Hu, S., Zhou, F., & Walubita, L. F. (2009). Development of a viscoelastic finite element tool for asphalt pavement low temperature cracking analysis. *Road Materials and Pavement Design, 10* (4), 833–858.

Humphreys, J. S., & Martin, C. J. (1963). Determination of transient thermal stresses in a slab with temperature dependent viscoelastic properties. *Transactions of the Society of Rheology, 7,* 155–170.

Marasteanu, M. O., & Anderson, D. A. (1999). *Improved model for bitumen rheological characterization.* Paper presented at the Eurobitumen workshop on performance related properties for Bituminous Binders, Luxembourg.

Molenaar, A. A. A., & Li, N. (2014). Prediction of compressive and tensile strength of asphalt concrete. *International Journal ofPavement Research and Technology, 7,* 324–331.

Monismith, C. L., Secor, G. A., & Secor, K. E. (1965). Temperature induced stresses and deformations in asphalt concrete. *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 34,* 248–285.

Moon, K. H., Marasteanu, M. O., & Turos, M. (2013). Comparison of thermal stresses calculated from asphalt binder and asphalt mixture creep tests. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 25 (8), 10591067.

Mortazavi, M., & Moulthrop, J. S. (1993). *The SHRP Materials Reference Library.* SHRP-A-646.

Washington, DC: The Transportation Research Board. Prieto-Munoz, P. A., Yin, H. M., & Buttlar, W. G. (2013). Two-dimensional stress analysis of low-temperature cracking in asphalt overlay/substrate systems. *Journal of Materials in Civil Engineering,* 25 (9), 1228–1238.

Roy, S. D., & Hesp, S. A. M. (2001). *Fracture energy and critical crack tip opening displacement: Fracture mechanics-basedfailure criteria for low-temperature grading of asphalt binders.* Paper presented at the proceedings of Canadian Technical Asphalt Association, Toronto, Ontario (pp. 185–212). Saal, R. N. J. (1955). *Mechanical testing of asphaltic bitumen.* Paper presented at the Fourth World

Petroleum Congress, Rome, Section VI/A, Paper 3, 1–17. Schwarzl, F. R. L., & Struik, C. E. (1968). Analysis of relaxation measurements. *Advances in Molecular*

Relaxation Processes, 1, 201–255. Shahin, M. Y. (1977). *Design system for minimizing asphalt concrete thermal cracking.* Paper presented at the proceedings of fourth international conference on the structural design of asphalt pavements, Ann

Arbor, University of Michigan (pp. 920–932). Smith, T. L. (1976). Linear viscoelastic response to a deformation at constant rate: Derivation of physical properties of a densely cross linked elastomer. *Transactions of the Society of Rheology,* 20 (1), 103–117. Stock, A. F., & Arand, W. (1993). Low temperature cracking in polymer modified binder. *Journal of the*

Association of Asphalt Paving Technologists, 62, 23–53. Tschoegl, N. W. (1989). *The phenomenological theory of linear viscoelastic behaviour.* Heidelberg: Springer-Verlag.

Ullidz, P., & Larsen, B. K. (1984). Mathematical model for predicting pavement performance. *Transportation Research Record 949,* TRB, 45–54.

Van der Poel, C. (1954). A general system describing the visco-elastic properties of bitumens and its relation to routine test data. *Journal of Applied Chemistry, 4,* 221–236.

Глава 5

ОЦЕНКА ВЫНОСЛИВОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА ИЛИ ЕГО СОПРОТИВЛЕНИЕ УСТАЛОСТНОМУ РАСТРЕСКИВАНИЮ

В главе рассмотрен предложенный в США метод оценки выносливости (сопротивления усталостному растрескиванию) асфальтобетона путем испытания полукруглого образца с надрезом на изгиб[10]*. В качестве показателя выносливости предлагают использовать энергию растрескивания, определяемую при указанном испытании. Выполнен анализ научно-исследовательских работ, показывающих возможность замены циклического испытания монотонным.*

В работе [1] были рассмотрены различные методы испытания асфальтобетона для оценки его сопротивления усталостному растрескиванию — далее *выносливости.* Следует отметить, что этот параметр при прочих равных условиях обусловливает срок службы дорожной одежды до капитального ремонта.

В США в последние годы для оценки выносливости асфальтобетона получил распространение метод определения энергии растрескивания (англ. fracture energy), который был упомянут в [1]. Там же был представлен метод испытания на изгиб полукруглых образцов (SCB) (англ. semi-circle bending), впервые предложенный Лимом с сотрудниками (Lim I. L. and others) в 1993 г. Благодаря своим возможностям, надежности и простоте он был нормирован в 2013 г. для определения сопротивления асфальтобетона растрескиванию при пониженных температурах [2]. Целесообразно более подробно остановиться на этом методе.

SCB-метод предназначен для определения требуемой энергии растрескивания *(G_f),* вязкости разрушения *(K_{IC})* и жесткости *(S)*. Первые два параметра характеризуют сопротивление асфальтобетона растрескиванию.

Образец представляет собой половинку диска толщиной (25 ± 2) мм, выпиленного из средней части стандартного асфальтобетонного цилиндра. В середине нижней прямоугольной плоскости полукруглого образца (хорде) делают вдоль стрелы сегмента сквозную прорезь длиной (15 ± 0,5) мм и толщиной (1,5 ± 0,03) мм. Диаметр стандартного образца-цилиндра составляет (150 ± 9) мм. Размер зерен щебня в образцах не должен превышать 19 мм. Полукруглый образец устанавливают стрелой сегмента вертикально, а хордой с прорезью горизонтально на две цилиндрические опоры (как при испытании балочки на изгиб) с расстоянием между центрами опор (120 ± 0,05) мм (рис. 30). Вертикальную нагрузку прикладывают к верхней части образца вдоль стрелы сегмента. Скорость перемещения нагружающей головки — 0,0005 мм/с или 0,03 мм/мин. Процедура испытания предусматривает температуры ниже 10 °С. Для более высоких температур энергия должна быть скорректирована с учетом смятия образца в месте приложения нагружающей головки (стандарт США ASTM D 5045).

---

[10] Канд. техн. наук Г. С. Бахрах (ФАУ «РОСДОРНИИ») Дороги и мосты. — ***2018. — 40/2.***

По результатам испытания строят график зависимости перемещения образца (прогиба) от нагрузки (рис. 31).

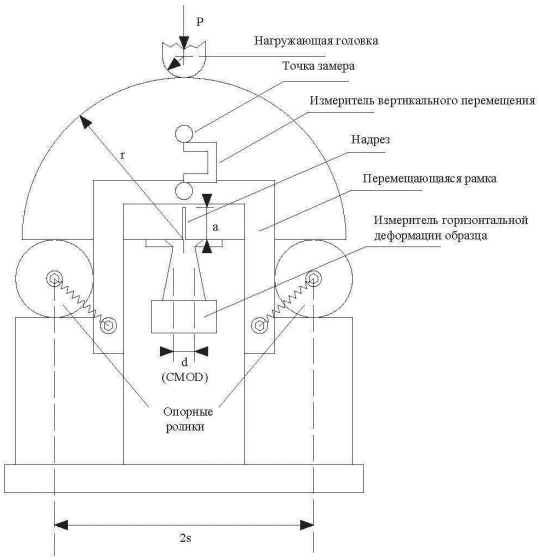


Рис. 30. Схема испытания полукруглого образца с надрезом на изгиб [2]: радиус нагружающей головки равен r/8; CMOD — деформация образца

Энергию растрескивания в Дж/м² вычисляют по формулам:

$$G_f = W_f / A_{lig}, \quad (1)$$

где W_f — работа растрескивания, Дж;

$$W_f = \int P du, \quad (2)$$

где P — нагрузка, Н;

u — прогиб образца, м;

A_{lig} — площадь под кривой на графике, м²;

$$A_{lig} = (r - a)t, \quad (3)$$

где r — радиус образца, м;

a — длина надреза, м;

t — толщина образца, м.

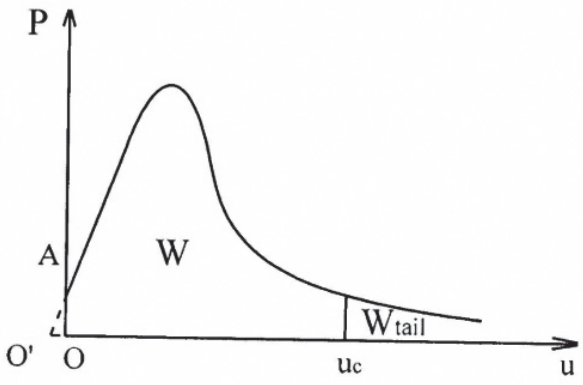


Рис. 31. Кривая зависимости прогиба (u) от нагрузки (P) [2]

Испытание останавливают, когда нагрузка начнет снижаться и достигнет значения 0,5 кН (точка u_c на рис. 31). Ниже этой точки кривую экстраполируют. Полная работа разрушения: $W_f = W + W_{tail}$. Ее можно определить как сумму четырехугольников по формуле:

$$W = \sum_{i=1}^{n}(u_{i+1} - u_i)P_i + 0{,}5(u_{i+1} - u_i)(P_{i+1} - P_i), \quad (4)$$

где P_i — значение нагрузки на i-товом шаге, Н;

P_{i+1} — то же на шаге $i+1$;

u_i — прогиб на i-товом шаге, м;

u_{i+1} — то же на шаге $i+1$.

Согласно Ли (Li X.) и Мерестиану (Marasteanu M.) (2004 г.), после достижения пика нагрузки, значения снижающейся нагрузки определяют по формуле:

$$P = c/u^2. \quad (5)$$

Коэффициент c получают из уравнения (5) по экспериментальному значению $P = 60\%$ от его пикового значения. Кривую P-u экстраполируют к $P = 0$ и определяют значение оставшейся части энергии W_{tail} по формуле:

$$W_{tail} = \int_{u_i}^{\infty} Pd(u) = \int_{u_i}^{\infty}\left(\frac{c}{u^2}\right)d(u) = c/u_c, \quad (6)$$

где u — прогиб, м;

u_c — то же после прекращении испытания.

Альтернативой является выражение:

$$P = au^{b,} \quad (7)$$

где a и b — подгоночные параметры.

Отсюда:

$$W_{tail} = -a(u_c)^b/(b-1). \quad (8)$$

Вязкость разрушения K_{IC} получают в качестве фактора интенсивности напряжения при достижении последним максимального значения при испытании образца. Согласно Лиму с соавторами (Lim I. L. and others) (1994 г.) и упомянутым выше Ли и Мерестиану, параметр K_1 в МРа·m^{0,5} можно определить из выражения:

$$K_1/(\sigma_0\sqrt{\pi a}) = Y_{1(0.8)}, \quad (9)$$

где

$$\sigma_o = P/(2rt), \quad (10)$$

P — приложенная нагрузка, МН;

r — радиус образца, м;

t — толщина образца, м;

a — глубина надреза, м;

Y_1 — безразмерный фактор интенсивности напряжения, определяемый по формуле:

$$Y_{1(08)} = 4{,}782 + 1{,}219a/r + 0{,}063exp(7{,}045a/r). \quad (11)$$

Жесткость определяют как наклон линейной части графика нагрузка (кН) — перемещение (мм).

Как следует из изложенного, SCB-метод испытания существенно проще, чем лабораторные циклические методы испытания асфальтобетона, и позволяет испытывать керны из покрытия. Интерес к данному методу специалистов возрастает все в большей степени. Однако неудобством является то, что метод был предназначен для оценки низкотемпературного сопротивления асфальтобетона растрескиванию. Поэтому в последние годы все большее число исследований в США направлено на изучение растрескивания асфальтобетона при положительных температурах.

Озер с соисполнителями [3] проанализировали различные методы испытаний на сопротивление растрескиванию, такие как:

- испытание на изгиб обычных балочек повторными нагрузками, регламентированное ASTM [4];
- испытание на прямое одноосное растяжение-сжатие, приведенное в [5];
- техасский метод для оценки сопротивления верхнего асфальтобетонного слоя отраженному растрескиванию с приложением циклической нагрузки к плоскому образцу, изложенный в регламенте [6];
- испытание на косвенное растяжение (метод IDT);
- испытание дискообразных образцов с надрезом глубиной 6,2 см по ASTM [7] и описанный выше SCB-метод испытания.

Предпочтение было отдано последнему методу.

Исследования проводили при температурах от минус 12 до плюс 25 °С. Для низких температур скорость начала продвижения трещины составила 0,7–1,0 мм/мин. При промежуточных температурах скорость нагружения образца варьировали от 6,25 до 50 мм/мин. В результате остановились на температуре 25 °С и скорости нагружения 50 мм/мин. Эти значения были выбраны по причинам, близким к полевым условиям, хорошей воспроизводимости и корреляции с другими методами оценки выносливости. При таких условиях для асфальтобетона значения G_f обычно находятся в пределах 970–2230 Дж/м^2, что согласуется с данными Базанта с соавторами (Basant Z. P. and others, 1992 г., 1997 г.) для бетона, горных пород и полимеров.

Было установлено, что с ростом температуры возрастает и G_f. На приведенных микрофотографиях видно, что при положительных температурах трещина распространяется по битумной мастике, огибая минеральные материалы. Казалось бы, прочность асфальтобетона падает, и G_f должна снижаться. Авторы [3] объясняют этот феномен снижением хрупкости материала и переходом его в вязкоупругое состояние.

По мнению автора настоящей статьи, рост G_f можно объяснить на основе механизма когезионного разрушения, изложенного в [8]. Если при низких температурах энергия разрушения расходуется в основном на разрыв химических связей макромолекул битума, то при положительных температурах она тратится еще и на ориентацию макромолекул вдоль растягивающего усилия и проскальзывание их относительно друг друга в том же направлении с разрывом водородных связей.

Для оценки возможности замены дорогостоящих усталостных испытаний модифицированным SCB-испытанием в работе [3] была выбрана группа асфальтобетонных смесей с заведомо разной выносливостью. В смеси вводили разное количество асфальтобетонного гранулята (АГ) или переработанного черного щебня. В качестве контрольной смеси была использована смесь с полимер-модифицированным битумом. В результате получили хорошую корреляцию между модифицированным SCB-испытанием и техасским методом испытания. Предложенный параметр FI, названный иллинойским индексом упругости (англ. Illinois Flexibility Index Test), надежно характеризует склонность асфальтобетона к усталостному растрескиванию. Он позволяет выбрать наиболее выносливые составы.

Большим достоинством рассматриваемой работы Озера с соисполнителями является сопоставление рассмотренных лабораторных критериев выносливости асфальтобетона в модернизированном SCB-методе с состоянием асфальтобетона на экспериментальных участках. В 2013 г. в шт. Вирджиния (США) были восстановлены участки старого покрытия с целью проверки влияния содержания в асфальтобетонной смеси АГ и добавки, позволяющей получить теплые смеси, на поведение покрытия в процессе ускоренного нагружения. Смеси отличались содержанием АГ (0%, 23% и 44%) и наличием или отсутствием модифицирующей добавки. Для всех смесей были определены значения показателей энергии разрушения G_f и индекса упругости FI. Покрытие включало два слоя толщиной по 5 см каждый. Остаточная пористость асфальтобетона на всех участках составляла (4 ± 1) %. После начала растрескивания было зафиксировано число циклов нагружения. Лучшие результаты показал контрольный участок, не содержащий ни АГ, ни добавки: 368 тыс. циклов и FI = 9,9. Несколько худший результат для участка с 23% АГ: 270 тыс. циклов и FI = 7,3. Вероятно, АГ был изрядно состаренный. Худшие результаты показали участки с теплым асфальтобетоном: с 44% АГ: 81 тыс. циклов и FI = 5,3; с 23% АГ: 89 тыс. циклов и FI = 6,7. Поведение покрытия очень хорошо согласовалось с величиной показателя FI. Участки в худшем состоянии характеризовались значением FI менее 2, а в лучшем состоянии — 10.

В более поздней работе [9] Наньдзиньского университета лесного хозяйства (Nanjing Forestry University) Китая было исследовано сопротивление асфальтобетона растрескиванию с использованием энергетического подхода и полукруглых образцов (SCB-образцы) толщиной 5 см с глубиной надреза 20 мм. Испытания проводили при монотонном и циклическом изгибах (последний метод для SCB-образцов в работе [**3**] не применялся). В первом случае испытывали образцы без надреза. Основной целью этого исследования была оценка сопротивляемости усталостному растрескиванию асфальтобетона с добавкой разного количества АГ при положительных температурах.

При монотонном испытании скорость нагружения была принята 50 мм/мин. Постоянная скорость поперечной деформации составляла 0,5 мм/мин. Испытание останавливали при уменьшении нагрузки ниже 0,3 кН. Циклическое испытание проводили в режиме контролируемого полусинусоидального нагружения с частотой 10 Гц без отдыха.

В случае монотонного испытания определяли две части энергии растрескивания: *энергию зарождения трещины* и *энергию* ее *продвижения*.

Исследования показали, что при обоих типах испытания значения энергии растрескивания изменяются более широко при 15 °С, чем при 25 °С, и поэтому первая температура является более подходящей для проведения испытаний. При циклических испытаниях этот показатель изменяется в большем диапазоне при низких уровнях нагружения. При 15 °С асфальтобетон лучше сопротивляется растрескиванию, чем при 25 °С. Подтверждено, что большая часть энергии затрачивается на продвижение трещины, чем на ее зарождение. Это положение отмечено еще в [10]. Кроме того, в рассмотренной работе [9] было показано, что с увеличением содержания в асфальтобетоне АГ уменьшается сопротивление материала растрескиванию.

Выводы

1. В США все большее распространение получает метод оценки выносливости асфальтобетона путем испытания полукруглого образца с надрезом на изгиб.

2. В качестве показателя выносливости асфальтобетона предлагают энергию растрескивания.

3. Показана возможность замены циклического испытания асфальтобетонного образца монотонным. Предпочтительная температура испытания — 15 °С, скорость нагружения образца — 50 мм/мин.

Литература

1. Бахрах Г. С. Эволюция методов оценки выносливости асфальтобетона / Г. С. Бахрах // ДОРОГИ И МОСТЫ. — 2016. — Вып. 35/2. — С. 288–298.

2. AASHTO TR 105–13. Standard Method for Determining the Fracture Energy of Asphalt Mixtures Using the Semi-Circular Bend (SCB). AASHTO, Washington. DC, 2013.

3. Ozer H. Development of the Fracture-Based Flexibility Index for Asphalt Concrete Cracking Potential Using Modified Semi-Circle Bending Test Parameters / H. Ozer, I. L. Al-Qadi., J. Lambros, A. Al-Khatib, P. Singhvi, B. Doll // Construction and Building Materials. — 2016. — Vol. 115. — PP. 390–401.

4. ASTM D7460–10. Standard Test Method for Determining Fatigue Failure of compacted Asphalt Concrete Subjected to Repeated Flexural Bending, ASTM International, West Conshohocken. PA. — 2010.

5. Underwood B. Simplified Viscoelastic Continuum Damage Model as Platform for Asphalt Concrete Fatigue Analysis / B. Underwood, C. Baek, Y. Cim // TRR. — No 2298. — 2012. — PP. 36–45.

6. TEX-245-F, Test Procedure for Overlay Test / Texas Department of Transportation. — Austin, TX. — 2014.

7. ASTM D7313–13. Standard Test Method for Determining of Asphalt-Aggregate Mixtures Using the Disc-Shaped Compact Tension Geometry / ASTM International. — West Conshohocken, PA. — 2013.

8. Бахрах Г. С. Подход к определению срока службы асфальтобетонного покрытия / Г. С. Бахрах // ДОРОГИ И МОСТЫ. — Вып. 32/2. — 2014. — С. 250–263.

9. Zhou Z. Cracking Resistance Characterization of Asphalt Concrete Containing Reclaimed Asphalt Pavement at Intermediate Temperatures / Z. Zhou, G. Xindyu, Ni F., Li Q., Ma X. // TRR. — 2017. — No 2633. — PP. 46–57.

10. Бахрах Г. С. Усталостное разрушение асфальтобетонных покрытий и пути замедления этого процесса / Г. С. Бахрах // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог: Экспресс-информация / ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. — 1980. — Вып. 9. — 40 с.

Глава 6

ИСПЫТАНИЕ НА УСТАЛОСТНОЕ РАСТРЕСКИВАНИЕ В АМРТ

Программа *Asphalt Pavement Technology* была создана для разработки и внедрения руководств, методов, процедур и других инструментов для использования при выборе материалов для асфальтобетонных покрытий, методов проектирования смеси, видов испытаний, способов производства и контроля качества[11].

В этом техническом обзоре представлено описание метода испытаний по оценке усталостной характеристики асфальтобетона, который может быть воспроизведен с использованием устройства АМРТ, предназначенного для измерения эксплуатационных характеристик асфальтобетона. Метод включает описание испытания, а также сведения о его развитии, информацию об эксплуатационных характеристиках асфальтобетона (ЭХ) и модель напряжения-деформации материала.

За последние 20 лет были достигнуты успехи в разработке и внедрении стандартизованной установки для испытания ЭХ асфальтобетона. Одним из первых был разработан стандарт, известный как Предварительный Стандарт AASHTO (TP) 107: Построение характерной кривой повреждения асфальтобетона при испытаниях на циклическую усталость при прямом растяжении (*1*) (или *циклическое испытание АМРТ на усталость*), который использует модель «напряжение-деформация».

Метод испытания АМРТ позволяет улучшить и всесторонне понять сложное явление усталостного растрескивания, поскольку может объяснить, как конкретный асфальтобетон поведет себя в слое дорожного покрытия при различных условиях напряжений или деформаций. Метод позволяет преодолеть разрыв между процессами проектирования дорожного покрытия и проектированием асфальтобетонной смеси. Циклическое испытание на усталость может предложить пользователям и агентствам большую отдачу от инвестиций, поскольку это связано с минимизацией дефектов возникающих в асфальтобетонных дорожных покрытиях в период жизненного цикла.

Причины интереса к усталостному растрескиванию

Усталостное растрескивание асфальтобетонных покрытий считается одной из самых сложных проблем, стоящих сегодня перед инженерами-проектировщиками покрытий. Причиной усталостных трещин, образование которых зависит от повторной (циклической) нагрузки во времени, может быть слабое основание дорожного покрытия, недостаточно оптимально подобранные исходные материалы смеси, снижение устойчивости к деформации смеси, вызванной долгосрочным старением в период эксплуатации (2). Усталостные трещины асфальтобетонного слоя распространяются внутрь по структуре покрытия. Конечным результатом трещин является проникновение воды, снижение качества езды, больший расход топлива и задержки движения в результате ремонтных работ, которые стоят времени и денег пользователей и агентств. Поскольку бюджет в области транспортного и дорожного хозяйства про-

[11] Департамент транспорта FHA, отдел технологии покрытий, FHWA-HIF-16–027, Август 2016

должает сокращаться, испытания эксплуатационных характеристик, спецификации для асфальтобетонной смеси и структурного проектирования, а также оценка качества при приёмке строительных работ имеют решающее значение в вопросах увеличения срока службы дорожных покрытий, ограничения затрат на их содержание и максимального использования местных ресурсов.

Установка AMPT

В конце 1980-х и начале 1990-х годов Исследовательская Программа Стратегических Шоссейных дорог (SHRP) создала методологию проектирования Superpave mix, которая предлагала комплекс испытаний вяжущих в рамках оценки ЭХ. Однако SHRP предлагала испытания смеси и модели, которые сложно было реализовать. Проект 9–19: *Superpave Support and Performance Models Management (Поддержка и управление моделями эксплуатационных характеристик покрытия Superpave)* Национальной научно-исследовательской программы совместных проектов (NCHRP) предоставил руководство для нового процесса Superpave и поиска лучших испытаний ЭХ асфальтобетона. Проект имел ценность для ряда показателей используемых в качестве основных параметров при изучении поведения устойчивости асфальтобетона к колееобразованию и к растрескиванию с целью прогнозирования его ЭХ: динамического модуля (|E *|), числа текучести и времени текучести. Данный подход был впоследствии принят в качестве основы следующего руководства по асфальтобетонам «Эмпирическое руководство по проектированию дорожных покрытий (MEPDG)» проекта NCHRP 1–37A: «Разработка Руководства по проектированию новых и восстановленных покрытий: Этап II (3, 4)», 2002 года.

В 2003 году на основе работ NCHRP 9–19, был опубликован отчет в рамках Проекта 9–29 NCHRP: «Простая установка для определения ЭХ для разработки смеси Superpave», который заложил основы применения AMPT. Спецификация (технические условия) устройства была создана для достижения двух целей: оценить параметры релевантности проекта NCHRP 9–19 (|E*|, число и время текучести) и предоставить характеристику материала для ввода в модель MEPDG. В рамках проекта 9–29 NCHRP была разработана установка AMPT, оборудование, производимое сторонними поставщиками, и проведена оценка ее технической эффективности при реализации целей исследовательской группы проекта NCHRP Project 9–29 (5–7).

Таким образом, AMPT рассматривается как инструмент, способный обеспечить оценку эксплуатационных характеристик асфальтобетона, реализованных в программном обеспечении AASHTO Ware Pavement ME Design (ранее MEPDG) и в рамках Национальном Дорожного Института FHWA-NHI-131118. Оборудование обладает потенциалом быть автономным устройством для других типов испытания эксплуатационных характеристик и привлекает интерес всего мира отчасти благодаря его способности адаптироваться к множеству разнообразных процедур испытаний.

На протяжении последних нескольких лет было произведено обновление программного обеспечения, позволяющее AMPT получать дополнительную информацию о колейности и устойчивости к растрескиванию. AMPT существует как сервогидравлическая система для испытания, оснащенная компьютерным контроллером (рисунок 32). Камера с контролируемой температурой способна охлаждать или нагревать образец от 4 до 60 °C с фиксированием точных значений |E *| и подходящих для ввода в программное обеспечение AASHTO Ware Pavement ME Design. В TechBrief по AMPT (8), основным преимуществом упомянутых выше испытаний AMPT является связь между механическими свойствами, проектированием смеси и толщинами асфальтобетонных покрытий.

Циклические испытания на усталость AMPT возможно рассматривать как промежуточные между классическим испытанием на усталость при изгибе и более быстрым методом на основе коэффициентов (индексов).

Существуют также методы, которые используют испытанные свойства материала для прогнозирования характеристик дорожного покрытия посредством структурного моделирования,

такого как циклическое испытание на усталость в установке АМРТ. Все эти методы обеспечивают понимание поведения материала и могут использоваться при разработке технических условий (спецификаций) к эксплуатационным характеристикам.

Рис. 32. Две наиболее часто применяемые установки АМРТ (8). Оценка эксплуатационных характеристик дорожного покрытия с использованием методов испытаний, связанных с усталостью

Данные испытания в установке АМРТ могут быть использованы для определения изменения жесткости материала и его разрушения с повторяющейся нагрузкой (9–11). Моделирование ЭХ основано на определении напряжений и деформаций, которым подвергается дорожное покрытие. Прогнозирование усталостной долговечности — это основа для проектирования дорожного покрытия и определения фактора стоимости. Это также позволяет включить следующие критические аспекты в рекомендации по прогнозированию эксплуатационных характеристик дорожного покрытия:

— влияние толщины покрытия;
— влияние интенсивности и частоты нагрузок в период времени;
— влияние климатических условий и других погодных характеристик.

Дополнительная информация о прогнозировании ЭХ с применением циклического испытания на усталость АМРТ приведена ниже.

Процедура проведения циклического испытания АМРТ на усталость

Процедура проводится в различных проектах Соединенных Штатов, например, как часть завершённого на данный момент проекта NCHRP 9–38: «Предел выносливости горячих асфальтобетонных смесей для предотвращения усталостного растрескивания в нежестких дорожных покрытиях»; проекта NCHRP 9–54: «Долгосрочное старение асфальтобетонных смесей и прогнозирование ЭХ»; исследования, связанного с финансированием транспорта TPF-5 (230): «Оценка асфальтобетонных смесей с высоким содержанием восстановленных покрытий, произведённых на заводах Северо-востока»; многочисленные исследования в Северной Каролине, работы Исследовательского Центра Битумных смесей Turner-Fairbank FHWA (Федерального дорожного управления) и мобильных пунктов для испытания асфальтобетонных смесей FHWA (Федерального дорожного управления). Подготовка образцов и измерительных приборов для процедуры испытания идентичны AASHTO TP 79: «Стандартный метод испытания для определения динамического модуля и числа текучести для горячих асфальтобетонных смесей (HMA) с использованием установки АМРТ» и AASHTO PP 60: «Стандартная практика для подготовки цилиндрических образцов для испытаний ЭХ с использованием вращательного уплотнителя Superpave (SGC), за исключением того, что образцы выпиливают короче, а к образцу приклеивают специальные пластины.

Для проведения циклических испытаний на усталость АМРТ доступны обновлённые комплекты оснастки (винты и торцевые пластины для закрепления образца в установке) и программное обеспечение. Продолжительность испытания обычно составляет менее одного часа, что позволяет получать результаты испытания в течение одного-двух дней. Изготовление и подготовка образцов занимает от двух до трех дней (процесс включает: выпиливание, резку, определение воздушных пустот и приклеивания концевых пластин), но метод занимает значительно меньше времени, чем метод испытания усталости при изгибе в соответствии с AASHTO T 321. Процедура испытания проводится на цилиндрических образцах высотой 100 мм диаметром 130 мм. Испытание также может проводиться на небольших образцах-кернах из покрытия. В процессе подготовки на образец наносят эпоксидную смолу для крепления датчиков с типичной длиной 70 мм. Поскольку циклическое испытание на усталость в АМРТ обеспечивает непосредственную нагрузку при растяжении, образец должен быть прикреплен к торцевым пластинам с помощью полностью отвердевшей эпоксидной смолы. Эта процедура требует использования специального устройства для крепления очищенных концевых пластин, чтобы расположить их параллельно друг другу и избежать преждевременного разрушения. Важно отметить, что в то время пока эпоксидная смола отвердевает, установка АМРТ свободна для других испытаний, и сам образец можно удалить из устройства (обычно через четыре часа). На рисунке 2 показан готовый для испытаний образец рядом со стандартным (высотой 100 мм на 150 мм) образцом (для испытания динамического модуля |E*|). Другими отличиями являются более тяжелые и с большей толщиной торцевые пластины с отверстиями для крепления к установке АМРТ. На рисунке 33 образец приклеен эпоксидной смолой серого цвета и готов для испытания на усталость.

Рис.33. Типичный образец (слева) циклического испытания на усталость установки АМРТ рядом со стандартным образцом для испытания динамического модуля (справа)

Определение температуры испытания основано на простой формуле, связанной с определяемой характеристикой LTPP Bind (с высокой степенью надежности 98%), высокотемпературной характеристикой (HTPG) и низкотемпературной характеристикой (LTPG) для определенного местоположения дорожного покрытия (см. Уравнение на рисунке 34 ниже). Обратите внимание, что максимальная температура тестирования установлена на уровне 21 °C. Температура промежуточного испытания основана на приведенном ниже расчете (чтобы не было пластических деформаций и чтобы смеси не были слишком хрупкими для получения желаемого типа разрушения образца).

Test Temperature (˚C) = ((HTPG+LTPG) /2) – 3

Рис. 34. Определение температуры для циклического испытания на усталость в AMPT

После того, как образцы доводятся до требуемой температуры, образцы плотно прикручиваются к верхним и нижним торцевым частям установки простой отверткой. Когда образец закрепляется в установке AMPT, важно накладывать силовую нагрузку на образец, толчками прижимая привод до тех пор, пока достаточный контакт между торцевой пластиной образца и машиной не окажется на уровне 0,09 кН (20 фунтов на квадратный дюйм). Пользователи должны наблюдать за экраном «Уровни» на своей установке AMPT, чтобы убедиться, что в процессе прикрепления образца не меняется посадочная нагрузка. Если изменяется посадочная нагрузка, привод должен быть перезапущен, чтобы получить требуемое значение 0,09 кН. Затем прикрепляются датчики LVDT и камера закрывается для стабилизации температуры.

Пользователи испытывают образец по меньшей мере тремя различными положенными уровнями напряжения (деформации), введёнными в программное обеспечение. FHWA (Федеральное дорожное управление) разработали справочную таблицу, чтобы помочь техническим специалистам выбрать 300, 500 или 800 микронапряжений (микродеформаций) в качестве первого условия испытания в зависимости от |E *|, измеренного в более ранней части испытаний. После измерения усталостной прочности первого образца следующий уровень напряжения (деформации) определяется путем интерполирования данных из справочной таблицы для разных типов кривых, разработанных на основе базы данных тестирования в FHWA. Эта таблица разрабатывалась для новой версии AASHTO TP 107 в 2017 году.

Программное обеспечение и сбор данных отображают информацию для технических работников в режиме реального времени. По мере того, как асфальтобетонный образец повреждается, напряжение, прикладываемое к образцу, уменьшается, а деформация на образце, измеренная при помощи датчиков LVDT, увеличивается. Программное обеспечение отображает уменьшающуюся кривую модуля и возрастающую кривую фазового угла. Когда образец растрескивается и разрушается, фазовый угол достигает пика и начинает уменьшаться с последующими циклами. Технический работник может затем остановить тест и записать экспериментальные циклы. Затем испытание повторяют на других уровнях напряжения с использованием других образцов из той же асфальтобетонной смеси.

Теоретическое обоснование

Метод циклического испытания на усталость в установке AMPT основан на теории механики сплошных повреждений. Механика сплошного повреждения представляет собой тело как однородную единицу, которая испытывает повреждения в виде жесткости или потери целостности. Примерно 25 лет назад для асфальтобетонных смесей (9) была разработана модель напряжения-деформации на основе моделей, разработанных за последние 40 лет (12, 13) в аэрокосмической промышленности для ракетного топлива, состоящая из асфальтобетона или каучука с твердыми частицами. Модель потребовалась для обеспечения того, чтобы топливо не подвергалось крекингу внутри ракет.

Модель основана на принципах, которые позволяют упростить подход к испытаниям и анализу, сохранить надежность и сократить время тестирования при разных напряжениях и температурах (от месяца до одного-двух дней).

Специалистам рекомендуется ознакомиться с другими источниками для получения дополнительной информации (9–11, 14–23).

Важно учитывать, что, хотя модель опирается на вязкоупругие зависимости свойств материала и другие сложные факторы, исследователи разработали программную платформу, которая позволяет проводить анализ для пользователей. Инженеры, которые хотят узнать больше о программном обеспечении, могут напрямую использовать Приложение AASHTO TP 107

для базовых расчетов, ссылки в этом документе или связаться с FHWA для получения дополнительной информации.

Приборы для испытания на циклическую усталость в установке AMPT

Поскольку испытание на циклическую усталость в AMPT представляет собой специфическую для смеси модель напряжения-деформации, которая фиксирует фундаментальное свойство асфальтобетонных смесей, ее можно применять для моделирования дорожного покрытия несколькими способами. Результаты испытаний и первоначальный анализ могут быть использованы для субъективного ранжирования смесей с точки зрения устойчивости к усталости. Для более продвинутых целей доступен критерий, основанный на энергии разрушения. Это позволяет пользователю объективно заявить, что при определенном числе циклов до разрушения, одна смесь будет испытывать меньше повреждения при повторяющейся нагрузке, чем другая, и, следовательно, будет обладать большей устойчивостью к усталости. Процедура выполняет анализ повреждений при множественных комбинациях температур и частот. Это открывает интерпретацию результатов для любого местоположения и любого типа объектов дорожного покрытия. Вводные данные по структуре необходимы, чтобы иметь полное представление о том, какие дорожные покрытия будут лучше работать с точки зрения усталости.

В рамках проекта 9–38 NCHRP *модель циклической усталости AMPT* также использовалась для прогнозирования *предела усталостной выносливости* для конкретного асфальтобетона позволяющего эксплуатировать «вечное» покрытие. Это направление стало темой многих исследований, авторы которых стремятся спроектировать покрытия, способные прослужить 50 и более лет при незначительном поверхностном ремонте.

Текущие исследования, финансируемые FHWA, используют модель циклического испытания усталости в AMPT с существующими покрытиями для определения напряжений и деформаций в толщинах дорожного покрытия. Эти результаты в сочетании с климатическими и транспортными вводными данными могут использоваться для имитации повреждения покрытия. На рисунке 35 представлена карта участков валидации реализованных проектов при прогнозировании эксплуатационных характеристик путем испытания на циклическую усталость в установке AMPT.

На рисунке 36 представлена сравнительная информация по нескольким проектам. Например, с целью перехода к механико-эмпирической структуре проектирования дорожных покрытий исследователи Бразилии также используют метод испытания на циклическую усталость в AMPT на 44 объектах, финансируемых на национальном уровне.

На рисунке 36 показана перспективная выборка результатов калибровки Национального центра Технологии Асфальта (NCAT); контрольный (C), смеси с открытой гранулометрией (open-graded friction course) (O), покрытие с большим содержанием переработанного асфальтобетона (R), вспененная теплая асфальтобетонная смесь (FW), тёплая асфальтобетонная смесь (WMA) с регенерированным (переработанным) асфальтобетонным покрытием (RW) и тёплая асфальтобетонная смесь (WMA) с химическими добавками (AW). Графики показывают данные в эксплуатационных условиях, предварительную калибровку и результаты после калибровки с точки зрения наличия трещин на поверхности покрытия. Информация о покрытии и данные испытаний были запрограммированы в модели для разработки прогнозирования данных предварительной калибровки. Полученные данные позволяют подтвердить способность установки AMPT получать достоверные результаты испытания на циклическую усталость и использовать AMPT, как инструмент для прогнозирования эксплуатационных характеристик при усталостном растрескивании асфальтобетонных покрытий.

Рис. 35. Карта участков валидации реализованных проектов при прогнозировании эксплуатационных характеристик путем испытания на циклическую усталость в установке AMPT

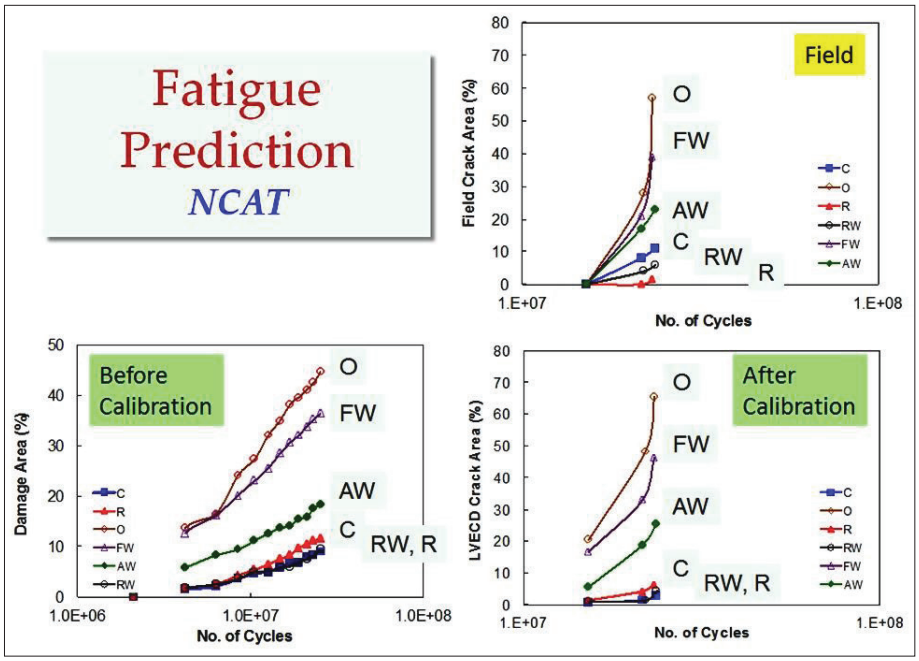


Рис. 36. Результаты калибровки прогнозируемых эксплуатационных характеристик циклического испытания в AMPT для испытаний NCAT (24)

Возможно, наиболее привлекательным элементом методологии циклической усталости AMPT является её потенциал в качестве связующего звена между проектированием покрытия и проектированием асфальтобетонной смеси. Программное обеспечение, разрабатываемое FHWA, может быть не только механистическим инструментом эмпирического проектирования следующего поколения, но и инструментом для разработки спецификации эксплуатационных характеристик асфальтобетонов. Дорожные агентства могут применять этот подход на объектах повышенного риска, чтобы минимизировать усталостное растрескивание и обеспечить значительную отдачу от инвестиций в инфраструктурную сеть.

Литература

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, *Determining the Damage Characteristic Curve of Asphalt Concrete from Direct Tension Cyclic Fatigue Tests*, *AASHTO TP 107*, Washington, D. C., 2014.

2. Brown, E. R., Kandhal, P. S., Roberts, F. L., Kim, Y. R., Lee, D-Y., and Kennedy, T. W., *Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction*, 3rd edition, National Asphalt Pavement Association, Lanham, MD, 2009.

3. Witczak, M. W., Kaloush, K., Pellinen, T., El-Basyouny, M., and Von Quintus, H., *Simple Performance Test for Superpave Mix Design*, *Report 465*, National Cooperative Highway Research Program Project 919, National Research Council, Washington, D. C., 2002.

4. Witczak, M., *Simple Performance Tests: Summary of Recommended Methods and Database*, *Report 547*, National Cooperative Highway Research Program Project 9–19, National Research Council, Washington, D. C., 2005.

5. Bonaquist, R. F., Christensen, D. W., and Stump, III, W., *Simple Performance Tester for Superpave Mix Design: First-Article Development and Evaluation*, *Report 513*, National Cooperative Highway Research Program Project 9–29, National Research Council, Washington, D. C., 2003.

6. Bonaquist, R., *Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice*, *Report 614*, National Cooperative Highway Research Program Project 9–29, National Research Council, Washington, D. C., 2008a.

7. Bonaquist, R., R*uggedness Testing of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests with the Simple Performance Tester*, *Report 629*, National Cooperative Highway Research Program Project 9–29, National Research Council, Washington, D. C., 2008b.

8. Withee, J., Gibson, N., and Harman, T., *TechBrief: Asphalt Mixture Performance Tester, Publication HIF-13–005*, Federal Highway Administration, Washington, D. C., 2013.

9. Kim, Y. R. and Little, D. N. One-dimensional constitutive modeling of asphalt concrete, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 116 (4), pp 751–772, 1990.

10. Daniel, J. S. and Kim, Y. R. Development of a simplified fatigue test and analysis procedure using a viscoelastic damage model, *Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp 619650, 2002.

11. Underwood, B. S., Kim, Y. R., and Guddati, M. N. Improved calculation method of damage parameter in Viscoelastic Continuum Damage Model,» *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 10 (6), pp 459–476, 2010.

12. Schapery, R. A., Fracture Mechanics of Solid Propellants, *Fracture Mechanics*, Edited by N. Perrone, H. Liebowitz, D. Mulville, W. Pilkey, University Press of Virginia, Charlottesville, VA, pp 387–398, 1978.

13. Schapery, R. A. On viscoelastic deformation and failure behavior of composite materials with distributed flaws, *Journal of Advances in Aerospace Structures and Materials*, AD-01, pp 5–20, 1981.

14. Lee, H. J. and Kim, Y. R. Viscoelastic constitutive model for asphalt concrete under cyclic loading, *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 124 (1), pp 32–40, 1998.

15. Chehab, G. R., Kim, Y. R., Schapery, R. A., Witczak, M. W., and Bonaquist, R. Time-temperature superposition principle for asphalt concrete with growing damage in tension state, *Journal of Association of Asphalt Paving Technologists*, Vol. 71, pp 559–593, 2002.

16. Gibson, N. H., Schwartz, C. W., Schapery, R. A., and Witczak, M. W. Viscoelastic, viscoplastic, and damage modeling of asphalt concrete in unconfined compression, *Transportation Research Record*, Vol. 1860, pp 3–15, 2003.

17. Yun, T., Underwood, B. S., and Kim, Y. R. Time-temperature superposition for HMA with growing damage and permanent strain in confined tension and compression, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Volume 22 (5), pp 415–422, 2009.

18. Underwood, B. S., Baek, C., and Kim, Y. R. Simplified Viscoelastic Continuum Damage model as platform for asphalt concrete fatigue analysis, *Transportation Research Record*, Vol. 2296, pp 36–45, 2012.

19. Park, H. J. and Kim, Y. R. Primary causes of cracking of asphalt pavement in North Carolina: field study, *International Journal of Pavement Engineering*, Vol. 16 (8), pp 684–698, 2014.

20. Park, H., Eslamania, M., and Kim, Y. R. Mechanistic evaluation of cracking in in-service asphalt pavements, *Journal of Materials and Structures*, Vol. 47 (8), pp 1339–1358, 2014.

21. Safaei, F., Lee, J., do Nascimento, L. A. H., Hintz, C., and Kim, Y. R. Implications of warm-mix asphalt on long term oxidative aging and fatigue performance of asphalt binders and mixtures, *Journal of Road Materials and Pavement Design*, Vol. 15, pp 45–61, 2014.

22. Norouzi, A., Sabouri, M., and Kim, Y. R., Evaluation of the Fatigue Performance of Asphalt Mixtures with High RAP Content, *Proceedings of the 12th International Conference on Asphalt Pavements*, Raleigh, NC, pp 1069–1077, 2014.

23. Sabouri, M. and Kim, Y. R. Development of a failure criterion for asphalt mixtures under different modes of fatigue loading» *Transportation Research Record*, Vol. 2447, pp 117–125, 2014.

24. Kim, Y. R., Guddati, M., Von Quintus, H., Lee, H., Huber, G., Bonaquist, R., Gibson, N., and Lee, J., *HMA Performance-Related Specification (HMA-PRS),* Performance Specifications for Rapid Renewal (SHRP R07) Workshop, 2015.

Глава 7

ПЕРЕДОВОЙ ЗАРУБЕЖНЫЙ ОПЫТ ОЦЕНКИ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АСФАЛЬТОБЕТОНА И МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

7.1. Опыт Германии. Изменение свойств битумного вяжущего с момента его производства и в течение срока эксплуатации в асфальтобетонном покрытии

В данном проекте исследовали изменения свойств полимерно-битумных вяжущих (ПБВ) в течение срока эксплуатации[12]. В рамках исследований существующее покрытие федеральной трассы B1 было разделено на 7 экспериментальных участков. Длина каждого участка составляла примерно 500 м. Для каждого участка отбирались по 4 образца вяжущих и асфальтобетонных смесей с целью последующего изучения в лабораторных условиях. Образцы асфальтобетонных смесей и асфальтобетона были отобраны в процессе производства, хранения, транспортировки, укладки, а также после 8 лет эксплуатации. Данные образцы исследовали, используя различные методы тестирования для битума и асфальтобетона. В ходе работ было изучено 15 проб ПБВ (марок PmB 45 и PmB 65) с различными значениями вязкости от четырёх производителей и пробы традиционного битума B45 (для сравнения). ПБВ были использованы в верхних слоях асфальтобетонных покрытий (подвергающихся действию УФ-излучения), а также в нижних слоях асфальтобетонных покрытий. Для оценки свойств вяжущего были проведены традиционные для битумов исследования (испытания): определение температуры размягчения методом кольца и шара, пенетрации, температуры хрупкости по Фраасу, растяжимости, дополнительные испытания на пластичность, основанные на определении их рабочих характеристик (модуля сдвига, фазового угола (DSR)). Исследования вяжущих были проведены после его экстрагирования из соответствующей асфальтобетонной смеси. В работе были использованы методы оценки путем инфракрасной спектроскопии.

Результаты исследований показали, что вяжущие подвергаются окислительному и термическому старению уже в процессе производства. В частности, свойства вяжущих значительно изменялись в течение процесс а перемешивания при рабочей температуре. Дальнейшее существенное изменение свойств вяжущих происходило в течение периода эксплуатации в покрытии.

Основной целью дорожного строительства является создание и поддержание покрытий автомобильных дорог в соответствии с потребностями пользователей и обеспечения их безопасности и комфорта передвижения. Транспортная нагрузка на немецкие федеральные трассы резко возросла за последние несколько десятилетий. Это является одной из причин значительного роста объемов использования ПБВ (PmB) взамен традиционных битумов. В 2002 г.

---

[12] Changes of polymer-modified binder properties (production- service life). Sebastian Lipke, Petra Kukies. Federal Highway Research Institute, Bergisch Gladbach, Germany. 5th Eurasphalt and Eurobitume Congress, 13–15th June 2012, Istanbul.

доля ПБВ (PmB), используемых в дорожном строительстве, составляла 13,9%. К 2008 г. было уже 18,2%. Рост применения ПБВ объясняется его улучшенными свойствами: расширенный диапазон пластичности, улучшенные характеристики при низких температурах, адгезия (сцепление) и др. Эти положительные свойства снижают риск образования трещин в холодное время года и увеличивают устойчивость к колееобразованию при высоких температурах, что позволяет прогнозировать увеличение срока службы дорожного асфальтобетонного покрытия. При этом, необходимо обеспечить такие условия, чтобы улучшенные характеристики вяжущих не были потеряны при старении вяжущего в процессе его жизненного цикла.

Старение вяжущих, в дополнение к усталости, является одной из причин, которая приводит к дефектам асфальтобетонного покрытия. Старение необратимо изменяет реологические свойства вяжущего и может привести к значительным разрушениям покрытия. Процессы, происходящие в традиционных дорожных битумах, вызванные старением при производстве смесей, их укладки подробно изучены. Процессы старения ПБВ изучены гораздо меньше.

Цель исследований — расширение и анализ известных данных проекта R&D за 8 лет эксплуатации покрытия, оценка динамики изменения свойств ПБВ в процессе эксплуатации покрытия.

В качестве основного метода испытаний ПБВ был принят метод определения температуры размягчения по кольцу и шару. Данный метод был разработан для исследования характеристик различных типов битумов при высоких температурах. Битумные вяжущие (ПБВ) демонстрируют существенное увеличение значения температуры размягчения по сравнению со значениями данного показателя традиционных дорожных битумов. Данный показатель может колебаться в значительной степени во время производства, хранения, транспортировки и в ходе эксплуатации [1].

Первое значительное изменение исходных свойств вызывается процессом смешения вяжущего с минеральными материалами асфальтобетонной смеси. Хранение асфальтобетонных смесей в горячем виде в бункерах и транспортировка к месту укладки оказывают сравнительно незначительное влияние на характеристики вяжущих марок PmB 45 и битумы B45 (таблица 4, рис. 37). При этом, значение температуры размягчения вяжущего типа (D) в течение 8 лет срока службы покрытия увеличилось на $\Delta T = 22.9\ ^{o}C$, тогда как тип (E) показал увеличение только $\Delta T = 12.9\ ^{o}C$ при равных условиях.

Таблица 4

Сравнение значений температуры размягчения методом кольца и шара: слой 0/22 S

Тип вяжущего	***Тип***	***Значение температуры размягчения (°C)***					
		После доставки	После перемешивания в смесителе	После хранения смеси в бункере	После транспортировки смеси	После укладки и уплотнения смеси	После 8 лет эксплуатации покрытия
B45	(A)	57,0	63,5	63,5	64,5	63,5	71,7
PmB45	(B)	59,0	64,0	64,5	66,0	63,5	73,5
	(C)	55,0	58,5	59,5	59,5	59,0	69,0
	(D)	58,5	65,0	66,0	66,5	65,0	81,4
	(E)	56,0	63,5	62,5	62,5	62,5	68,9
PmB25	(F)	65,0	73,0	77,5	77,5	75,0	84,4
	(G)	64,5	71,0	73,0	73,0	72,5	81,2

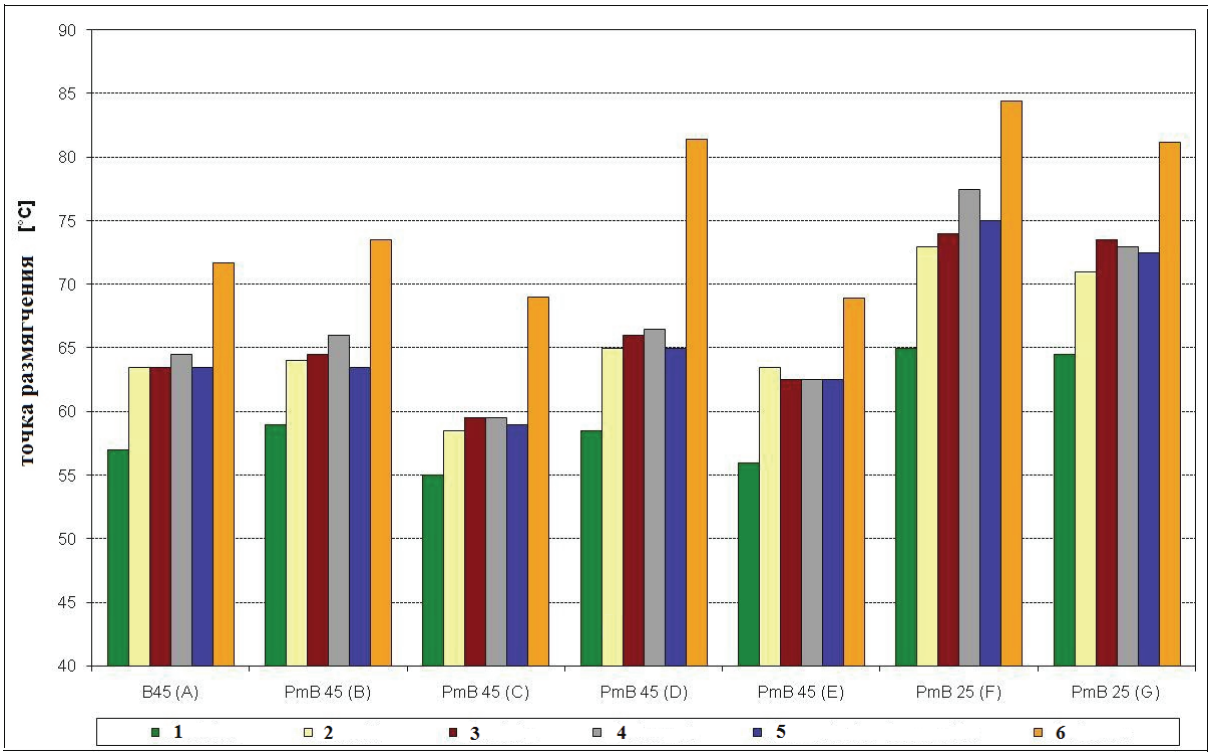


Рис. 37. Сравнительная диаграмма температуры размягчения для различных марок вяжущих (слой 0/22 S): 1 — после поставки; 2 — после перемешивания в смесителе; 3 — после помещения смеси в бункер; 4 — после транспортировки смеси; 5 — после укладки и уплотнения смеси; 6 — после 8 лет эксплуатации покрытия

Для определения изменения вязкости вяжущего проводили испытания по методу глубины проникания иглы при 25 °C в соответствии с DIN EN 1426. Результаты исследований показывают снижение глубины проникания иглы в процессе эксплуатации для всех типов битумов (B45) (таблица 5, рис. 38). Это зависимость особенно заметна на этапе приготовления асфальтобетонных смесей и после 8 лет эксплуатации. В процессе хранения смеси в бункере, транспортировки, укладки и уплотнения значения изменились незначительно. Резкое снижение по сравнению с исходным значением после 8 лет эксплуатации было установлено для продуктов (D) и (G).

Таблица 5

Сравнение значений пенетрации при 25 °C (глубины проникания иглы): слой 0/22 S

Тип вяжущего	Продукт	Пенетрация при 25 °C (1/10 мм)					
		После доставки	После перемешивания в смесителе	После помещения смеси в бункер	После транспортировки смеси	После укладки и уплотнения смеси	После 8 лет эксплуатации покрытия
B45	(A)	36	25	26	25	27	18
PmB45	(B)	38	29	27	25	30	16
	(C)	44	33	30	33	32	19
	(D)	47	34	34	32	35	15
	(E)	48	34	36	36	3	20
PmB25	(F)	20	18	16	15	17	11
	(G)	36	29	24	25	26	11

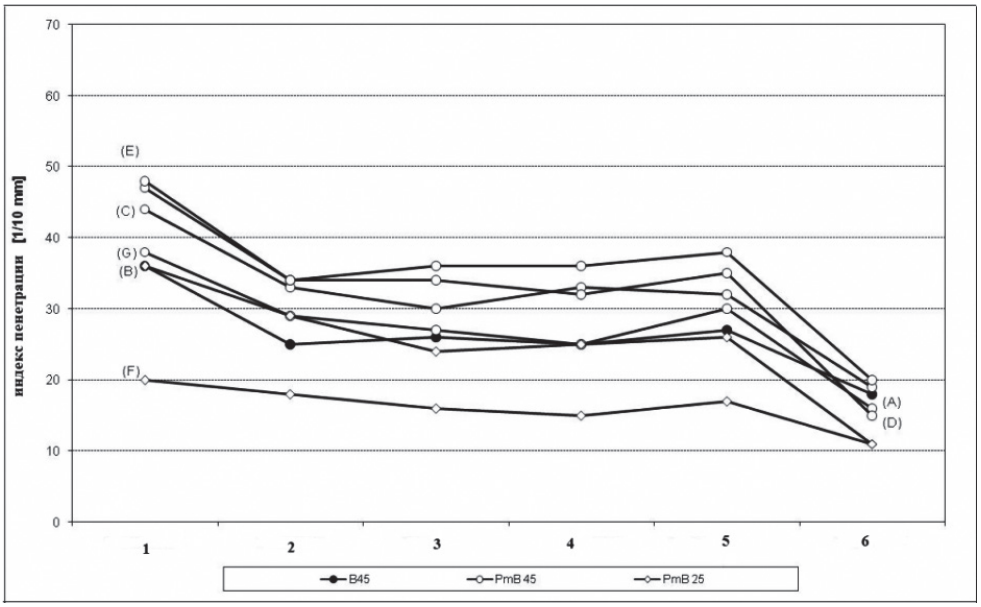


Рис. 38. Сравнительная диаграмма пенертации при 25 °C для различных марок вяжущих (слой 0/22 S): 1 — после поставки; 2 — после перемешивания в смесителе; 3 — после помещения смеси в бункер; 4 — после транспортировки смеси; 5 — после укладки и уплотнения смеси; 6 — после 8 лет эксплуатации покрытия

Для исследования низкотемпературных характеристик битумных материалов были проведены испытания по Фраасу в соответсвии с DIN EN 12593. Чем ниже показатель температуры хрупкости вяжущего по Фраасу, тем больше предел прочности на разрыв битумов и ниже риск возникновения трещин в асфальтобетоне при низких температурах.

Результаты испытаний показывают непрерывное увеличение температуры хрупкости по Фраасу в процессе эксплуатации вяжущего (таблица 6, рис. 39). Результаты исследований вяжущих спустя 8 лет эксплуатации показали кардинальное ухудшение характеристики. Марка PmB 25 показывает чёткое ухудшение характеристик при низких температурах, т. к. результаты исследований для (F) и (G) находятся в пределах положительных температур. Вывод: старение вяжущих в процессе эксплуатации приводит к увеличению трещинообразования конечного продукта (асфальтобетона).

Таблица 6

Сравнение значений температуры хрупкости по Фраасу: слой 0/22 S

Тип вяжущего	Продукт	Значение температуры хрупкости по Фраасу (°C)					
B45	(A)	–11	–8	–9	–7	–10	–1,2
PmB45	(B)	–10	–11	–10	–12	–12	–1,6
	(C)	–13	–10	–8	–10	–10	–1,1
	(D)	–18	–15	–17	–13	–14	–3,1
	(E)	–14	–13	–14	–14	–14	–3,1
PmB25	(F)	–7	–7	–5	–4	–4	3,9
	(G)	–15	–12	–12	–10	–12	0,9

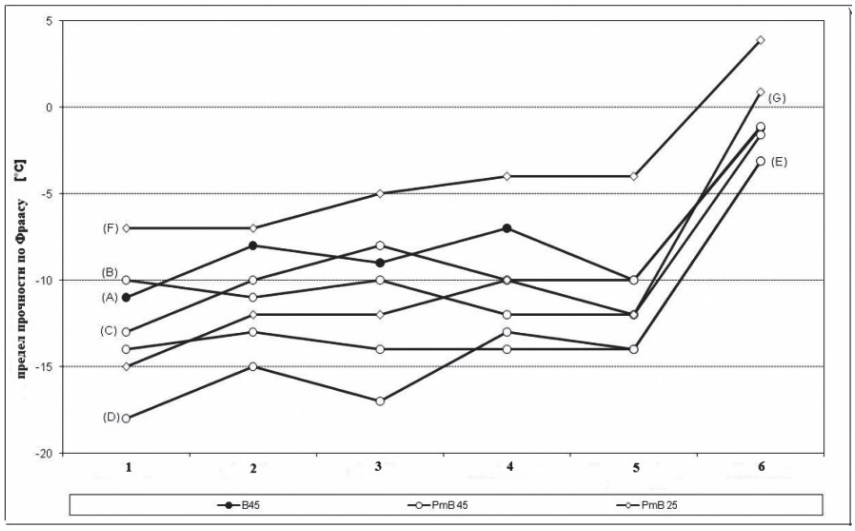


Рис. 39. Сравнительная диаграмма температуры хрупкости по Фраасу для различных марок вяжущих (слой 0/22 S): 1 — после поставки; 2 — после перемешивания в смесителе; 3 — после помещения смеси в бункер; 4 — после транспортировки смеси; 5 — после укладки и уплотнения смеси; 6 — после 8 лет эксплуатации покрытия

Очевидно, что различные вяжущие демонстрировали различную растяжимость в период их срока эксплуатации. Различия в свойствах также могут быть обнаружены на этапах производства и обработки отдельных битумных продуктов. Тип (C), например, не показал изменений, т. к. значения измерений были выше предела возможностей измерительного устройства. Другие продукты типа PmB демонстрировали значительное снижение пластичности, в частности, после перемешивания в смесителе. Дальнейшее изучение полученных данных показывает значительное снижение пластичности вяжущих после 8 лет эксплуатации. Поведение эластичных ПБВ показывает высокую устойчивость к деформациям. Например, битум (A) после 8 лет эксплуатации показал особенно низкую дуктильность по сравнению с начальными значениями в исходном состоянии (рис. 40). Битум (A) не является модифицированным вяжущим, что могло бы объяснить существенное снижение пластических характеристик.

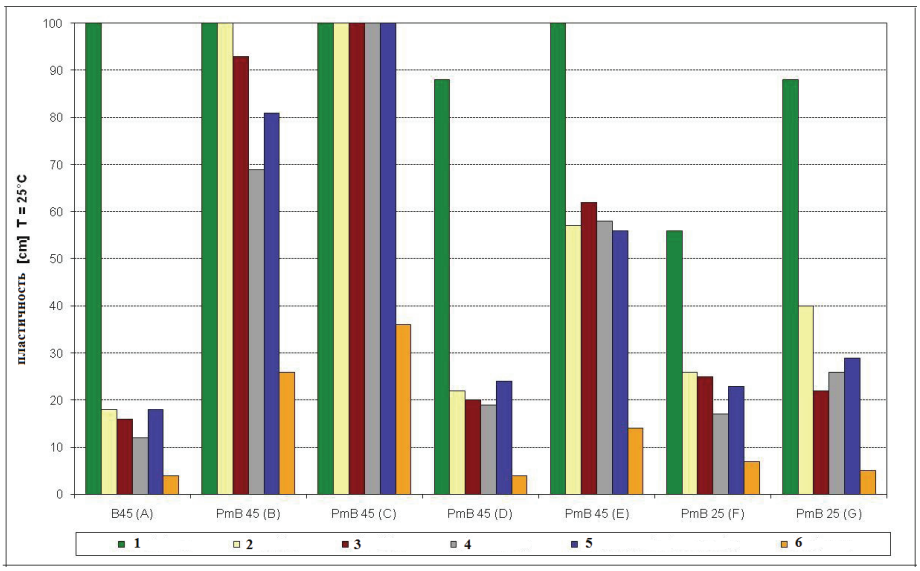


Рис. 40. Растяжимость (пластичность) вяжущих при 25ºC: слой 0/22 S: 1 — после поставки; 2 — после перемешивания в смесителе; 3 — после помещения смеси в бункер; 4 — после транспортировки смеси; 5 — после укладки и уплотнения смеси; 6 — после 8 лет эксплуатации покрытия

Измерения с помощью динамического сдвигового реометра были выполнены при двух температурных режимах:

— при температуре 20 °С, что имеет важное значение при изучении поведения материала на усталость;
— при температуре 50 °С для оценки устойчивости к деформациям при высоких летних температурах.

Результаты данного теста описывают две важные характеристики. Одной из них является сложный модуль сдвига G*(Па), который описывает жёсткость вяжущего. Другой является фазовый угол сдвига δ(°), который является мерой вязко-упругих свойств образца.

Результаты многочисленных национальных и международных исследований показывают, что вяжущие, которые имеют высокое значение модуля G* и малое значение фазового угла δ, особенно подходят для производства битумов с высокой устойчивостью к деформациям (таблица 7). Таким образом, более высокое значение G*/sin δ было принято в качестве критерия высокой устойчивости вяжущих к постоянной деформации (усталостным характеристикам).

Предполагалось, что использование полимеров в ПБВ должно улучшить устойчивость к деформациям при высоких температурах. Однако это улучшение в сравнении с дорожными битумами наблюдается не всегда. Значительные отличия можно найти в случае вяжущих марок PmB 45. Практически все вяжущие данного типа имеют значительно более низкие значения G*/sin δ в процессе производства и после 8 лет эксплуатации, что подтверждает их меньшую устойчивость к деформациям. Вяжущие типов (F) и (G) PmB 25 показывают сравнительно более высокие значения характеристик материалов после 8 лет эксплуатации.

Таблица 7

Сравнение значений отношения G* /sin δ (20°C): слой 0/22 S

Тип вяжущего	Продукт	Значение отношения G*/ sinδ (кПа), 20°C					
		После доставки	После перемешивания в смесителе	После помещения смеси в бункер	После транспортировки смеси	После укладки и уплотнения смеси	После 8 лет эксплуатации покрытия
B45	(A)	8.799	12.541	12.918	15.040	12.087	28.246
PmB45	(B)	6.686	13.524	9.919	7.815	7.158	21.087
	(C)	5.657	7.898	11.433	6.674	7.236	22.367
	(D)	3.146	6.430	7.278	6.488	5.884	34.230
	(E)	3.424	5.538	5.706	5.383	5.798	15.900
PmB25	(F)	12.342	23.457	27.228	26.230	23.086	48.902
	(G)	5.874	8.791	9.906	9.961	9.479	43.961

Таблица 8

Сравнение значений отношения G* /sin δ (50°C): слой 0/22 S

Тип вяжущего	Продукт	Значение отношения G*/sinδ (кПа), 50°C					
		После доставки	После перемешивания в смесителе	После помещения смеси в бункер	После транспортировки смеси	После укладки и уплотнения смеси	После 8 лет эксплуатации покрытия
B45	(A)	65	196	176	267	185	695
PmB45	(B)	69	119	156	152	111	359
	(C)	35	73	113	82	66	247
	(D)	39	83	115	93	76	796
	(E)	36	76	69	77	68	224

Тип вяжущего	Продукт	Значение отношения G*/sinδ (кПа), 50°C					
		После доставки	После перемешивания в смесителе	После помещения смеси в бункер	После транспортировки смеси	После укладки и уплотнения смеси	После 8 лет эксплуатации покрытия
PmB25	(F)	181	462	608	788	548	133
	(G)	72	124	199	163	162	780

Инфракрасная спектроскопия (ИС) может быть использована для исследования вяжущих на наличие типичных молекулярных компонентов, называемых функциональные группы, таких как найденные в полимерах. Определение содержания полимеров или других компонентов вяжущего требует знания его молекулярной структуры. Определённые функциональные группы поглощают инфракрасное излучение при определённой длине волны (идентификация). Концентрация полимера может быть определена с помощью закона Ламберта-Бера.

Результаты ИС оцениваются путём определения высоты пика поглощения карбонильных связей (таблица 9). Карбонильная группа состоит из атома углерода и атома кислорода, соединённых двойной связью. Карбонильные связи являются индикатором окислительного старения битума, т. е. чем бóльше различия наблюдали в поглощении восстановленного вяжущего и вяжущего в исходном состоянии, тем более активно шёл процесс окисления (старения).

Результаты исследований подтверждают, что наибольшее отличие наблюдали в случае битумного продукта (G). Этот тип битума показал высоту поглощения карбонильных связей 0.01 ещё в исходном состоянии. После 8 лет эксплуатации высота полосы поглощения составляла 0.102. Кроме того, результаты других исследований, таких как температура хрупкости по Фраасу и температура размягчения по кольцу и шару подтверждают, что тип вяжущего (G) наиболее подвержен окислению (старению).

Таблица 9

Оценка высоты пика карбонильных связей: слой 0/22 S

Тип вяжущего	Продукт	Высота пиков карбонильных связей		
		После доставки	После 8 лет эксплуатации	Разница между адсорбцией (поглощением)
B45	(A)	0,008	0,072	0,064
PmB45	(B)	0,031	0,079	0,048
	(C)	0,000	0,071	0,071
	(D)	0,000	0,083	0,083
	(E)	0,014	0,062	0,048
PmB25	(F)	0,022	0,082	0,060
	(G)	0,010	0,102	0,092

Выводы

Результаты, полученные в Брауншвейгском университете прикладных наук, показывают, что вяжущие подвергаются тепловому и окислительному процессу уже на этапах производства и обработки. Было установлено, что первое значительное изменение свойств вяжущего происходит в процессе смешения в смесительной установке. Второе значительное изменение происходит, когда вяжущее находится в покрытии в процессе его эксплуатации. Во время производства асфальта битум подвергается значительному воздействию кислорода воздуха, поскольку его поверхность непрерывно изменяется (т. е. постоянно контактирует с кислородом при пере-

мешивании). Это приводит к окислению. Данный процесс зависит от типа смесительной установки. Много второстепенных условий также влияют на хрупкость битума в процессе производства асфальтобетонных смесей. Например, заполнитель, который был нагрет до высокой температуры, может оказывать неблагоприятное воздействие, поскольку тонкая плёнка вяжущего на зёрнах заполнителя может затвердевать слишком быстро и потерять вяжущие свойства. Одним из важных факторов снижения термического окисления (замедления старения) является строгое соблюдение температурных режимов при производстве асфальтобетонных смесей. Короткий период хранения смеси в горячих бункерах объясняет, почему свойства вяжущих незначительно изменились при хранении, но температура хранения и воздействие воздуха также играют важную роль.

Стандартные исследования вяжущих показали преимущества ПБВ по сравнению с традиционным битумом.

Исследования при помощи реометра динамического сдвига при тестовой температуре 50°С показали, что значения фазового угла δ коррелируют со значениями измерений растяжимости.

Количественное исследование полимеров проводили с помощью инфракрасной спектроскопии. Характерные ИК-спектры позволяют идентифицировать различные полимеры и определить достаточно точно их концентрацию. Однако, инфракрасные спектры не позволили оценить количественных изменений в ПБВ связанных, как с производством, в процессе перемешивания смесей, их транспортировки, укладке и уплотнении, так и после 8 лет эксплуатации. Рекомендовано применение дополнительных методов исследования, например, гель-проникающая хроматография (GPC), УФ-спектроскопия, определение асфальтенов, метод (BBR) с изгибающейся балкой.

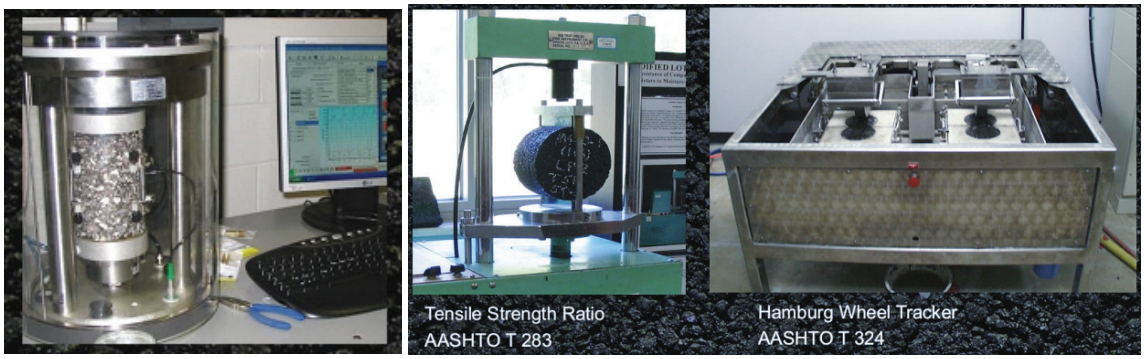
Оценка данного исследования показала, что стандартные методы исследования вяжущих не способствуют достоверному прогнозированию эксплуатационных характеристик асфальтобетона.

Литература

1. Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bitumen während Herstellung, Lagerung Transport und Einbau von Asphaltmischgut, RENKEN, P., HAGNER, T., FEßER, A., Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Forschung Straßenbau und Straßenbautechnik, Heft 809, 2001.

2. Chemisch-physikalische Charakterisierung von Normbitumen und polymermodifizierten Bitumen, KROTMANN, E., FRIEMEL-GÖTTLICH, B. F., PETERS, A., Bundesanstalt für Straßenwesen, 2000.

3. Veränderung der Eigenschaften polymermodifizierter Bitumen während der Liegezeit, Lipke, S., Schriftenreihe der Bundesanstalt für Straßenwesen, Abteilung Straßenbautechnik, 2010.



7.2. Опыт США. Оценка эффективности применения адгезионных добавок в асфальтобетонных смесях и асфальтобетоне

С конца 1970-х гг. был проведен целый ряд исследований с целью более подробного изучения явления сцепления в асфальтобетонных смесях. В результате за последние 30 лет в области материалов и технологий произошли изменения, направленные как на улучшение влагостойкости материалов, так и повышение эффективности испытаний их эксплуатационных качеств в неблагоприятных условиях повышенной влажности. В связи с такими изменениями было проведено исследование с целью оценки эффективности существующих добавок, повышающих сцепление горячих асфальтобетонных смесей, используемых при устройстве дорожных покрытий[13]. В ходе реализации данного проекта был построен экспериментальный участок для полевых испытаний, в процессе которых использовались три различных адгезионных добавки (повышающих сцепление), вводимых в традиционную смесь для устройства верхнего слоя дорожных покрытий по системе Superpave®. Кроме того, был проведен ряд лабораторных исследований эксплуатационных качеств материалов на разных стадиях эксплуатации с целью сравнения в долгосрочной перспективе эффективности гашеной извести, жидких добавок и добавок, повышающих сцепление в теплых асфальтобетонных смесях. В ходе исследования было проведено несколько циклов замораживания-оттаивания: 0, 1, 5, 10. Результаты показали, что гашеная известь обладает наибольшей прочностью на растяжение и наибольшим значением предела прочности на растяжение (англ. tensile strength ratio, TSR), а также выявлено, что только при такой обработке показатель TSR соответствовал как минимум 80% от требуемого значения во всех случаях комбинаций циклов замораживания-оттаивания. При 5 и 10 циклах замораживания-оттаивания материалы были значительно менее водоустойчивы (более чувствительны к влаге), чем при воздействии одного цикла замораживания-оттаивания. Теплые асфальтобетонные смеси с применением адгезионной добавки (WMX) обладали низкой начальной прочностью на растяжение, однако со временем их прочность повышалась.

В 1969 г. из-за проблемы, связанной с недостаточной коррозионной стойкостью асфальтобетона в дорожных покрытиях, Департаментом транспорта штата Джорджия (англ. Georgia DOT) были установлены требования к жидким адгезионным добавкам (обеспечивающим сцепление битума к поверхности каменного минерального материала) вводимым в битумное вяжущее при производстве горячих асфальтобетонных смесей. Коррозионная стойкость асфальтобетона определялась степенью адгезии между битумным вяжущим и минеральными компонентами под воздействием воды (1).

В 1980 г. в штате Джорджия столкнулись с разрушением дорожных покрытий в результате высоких температур воздуха в летний период эксплуатации автомобильных дорог. Это

[13] Дональд Уотсон, Джейсон Р. Мур, Адам Дж. Тейлор и Питер Ву (EFFECTIVENESS OF ANTISTRIP AGENTS IN ASPHALT MIXTURES, Donald Watson, Jason R. Moore, Adam J. Taylor, and Peter Wu). Источник: Transportation Research Record. — 2013. — №. 2370. — PP 128–136. — Англ.

стало поводом к проведению исследования дорожных покрытий, в ходе которого был осуществлен 81 проект, с участием разных штатов. Визуальное обследование участков показало поверхностное разрушение в 68% случаев, а в 24% случаев разрушение носило умеренный характер. По итогам проведенных работ в 1982 г. Департаментом транспорта штата Джорджия было принято решение об использовании гашеной извести в качестве добавки, повышающей водостойкость смеси.

Начиная с 1982 года отмечается прогресс как в области применяемых материалов, так и технологий, с точки зрения улучшения водостойкости материалов, а также повышения эффективности испытаний, позволяющих прогнозировать эксплуатационные качества конечного продукта (асфальтобетона) в неблагоприятных условиях повышенной влажности. В связи с этим проведено исследование с целью оценки эффективности существующих адгезионных добавок для горячих асфальтобетонных смесей, используемых при устройстве дорожных покрытий.

Цели проекта

Проектом предусматривалось проведение серии полевых и эксплуатационных испытаний для изучения трех адгезионных добавок, вводимых в традиционную смесь Superpave® для устройства верхнего слоя дорожного покрытия, а также выполнение ряда лабораторных испытаний эксплуатационных качеств материалов на разных стадиях старения с целью прогнозирования в долгосрочной перспективе эффективности влияния различных типов адгезионных добавок.

Объем исследования

Для выполнения исследования был построен опытный участок на автомобильной дороге (юг штата Джорджия) с применением трех различных адгезионных добавок: жидкой добавки (LAS), гашеной извести и новой добавки в теплые смеси (WMX). Отбор образцов-кернов осуществлялся сразу после строительства и после 2 лет эксплуатации. Образцы испытывались после нескольких циклов замораживания-оттаивания, с целью определения степени снижения водостойкости смесей. Образцы также были испытаны методом «гамбургского колеса» с целью оценки их устойчивости к колееобразованию и коррозионной стойкости. В лабораторных условиях образцы подвергались испытаниям по определению динамического модуля упругости (E*) и числа текучести (FN).

Вопросам воздействия воды (влаги) на эксплуатационные характеристики дорожных асфальтобетонных покрытий уделялось огромное внимание с XX в. и изучалось на протяжении 70 лет, причем первые документальные отчеты по проведенным исследованиям относятся еще к 1932 г. (2). Характерным разрушением является отслоение (шелушение), т. е. постепенное отделение пленок битумного вяжущего от поверхности минерального материала за счет потери адгезии, в основном под действием воды или влаги (1, 3).

Было разработано множество испытаний, имитирующих процесс поверхностного разрушения. Научно-исследовательский проект NCHRP 4–8 (3), касающийся прогнозирования разрушения асфальтобетона под воздействием влаги (4), был реализован в 1978 г., в рамках которого была начата разработка процедуры лабораторных испытаний для оценки чувствительности асфальтобетонных смесей к влаге. Данный метод испытаний известен как метод испытаний по Лоттману, и он предшествовал методу испытаний по **AASHTO T 283**[14] на чувствительность к влаге. Следует также упомянуть еще один ряд исследований (5–9).

По методу NCHRP 4–8 (3) для моделирования состояния влажности при полевых испытаниях первоначально использовалось только вакуумное насыщение. Однако Лоттманом, а также Шмидтом и Графом (10) было установлено, что вакуумное насыщение лабораторного образца не моделирует процесс, происходящий с образцом-керном из покрытия. Сравнение разрушений образцов в сухом состоянии после вакуумного насыщения рассматривалось относительно

[14] Основа для разработки ПНСТ 113–2016 «Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения водостойкости и адгезионных свойств»

краткосрочного показателя, на основании которого моделировались повреждения дорожных покрытий, полученные в результате их водонасыщения в полевых условиях. Для определения долгосрочного показателя необходимо было провести циклы замораживания-оттаивания с целью моделирования эффекта от воздействия окружающей среды и интенсивности движения (11). Для улучшения корреляции между лабораторными и полевыми результатами испытаний использовался коэффициент прочности (12), определенный по соотношению прочности водонасыщенных образцов к прочности образцов в сухом состоянии. Было выявлено, что показатель предела прочности на растяжение (TSR) менее 0,70 получен для смесей с большей степенью разрушений в результате воздействия влаги.

Второй этап исследования NCHRP 4–8 (3) заключался в апробации разработанной методики семью дорожными агентствами на восьми опытных участках, построенных в период 1975–1977 гг. (11). На шести из восьми опытных участках наблюдалось разрушение при уменьшении показателя TSR ниже 0,80.

Оценка эффективности воздействия адгезионных добавок

В проведенном Себаалой с соавт. исследовании сравнивали результаты лабораторных испытаний 15 смесей, приготовленных с использованием региональных минеральных заполнителей (из пяти штатов) и обработанных тремя различными способами: без адгезионной добавки, с 0,5% жидкой адгезионной добавки и 1% гашеной извести (13). Для ускоренного водонасыщения проводили до 15 циклов замораживания-оттаивания. Затем полученные эксплуатационные характеристики материалов использовались для расчета дорожных конструкций на 20-летний срок эксплуатации с целью выполнения анализа затрат по трем видам обработки, применяя программное обеспечение AASHTO для Руководства по механико-эмпирическому проектированию дорожных одежд (англ. Mechanistic-Empirical Pavement Design Guide, MEPDG). На основе результатов определения показателя TSR было установлено, что обе добавки — гашеная известь и жидкая адгезионная добавка — способствуют повышению водостойкости. Однако прочность смесей необработанных или обработанных жидкой добавкой значительно снижалась после нескольких циклов замораживания-оттаивания, тогда как при обработке гашеной известью высокие значения прочности минеральных заполнителей из всех пяти источников сохранялись после всех 15 циклов (13).

Сравнение показателя прочности TSR в лабораторных условиях

Методология исследования

При выполнении исследования использовали три вида адгезионной обработки. В качестве стандартного материала применяли гашеную известь (HL) в количестве 1,0% от массы заполнителя в сухом состоянии, а также жидкую адгезионную добавку (далее — LAS), отобранную из перечня 26 материалов, разрешённых к применению в штате Джорджия (Georgia's QPL) (15). Третья адгезионная добавка — добавка, повышающая сцепление в теплых асфальтобетонных смесях (далее — WMX), используемая в лабораторных исследованиях и считающаяся перспективным новым продуктом двойного назначения, разработанным как для теплой смеси, так и в качестве адгезионной добавки.

При проведении данного исследования было выполнено испытание на определение показателя TSR в условиях воздействия влаги в соответствии с методом GDT 66 (16). Существует три основных отличия метода GDT от метода AASHTO T 283:

1. Образцы подвергают вакуумному насыщению при 26 °C под воздействием давления (67 кПа) в течение 30 мин.

2. После выдерживания образца в теплой воде при температуре 140°F (60 °C), такие водонасыщенные образцы вместе с неводонасыщенными образцами выдерживают в воде (водяной бане) при 55°F (12,8 °C±2 °C) в течение 2 часов.

3. Образцы испытываются при частоте нагружения с частотой 0,065 дюйм/мин. (1,65 мм/мин.).

Минимальное требуемое значение предела прочности на растяжение (TSR) для асфальтобетонной смеси, в соответствии со спецификациями Департамента транспорта штата Джорджия, составляет 0,80 (что указывает на 20%-ное уменьшение прочности на косвенное растяжение), при этом ни один из образцов не может иметь прочность при раскалывании ниже 60 фунт/дюйм^2 (413 кПа). Кроме того, считается, что смесь соответствует требованиям показателя TSR, равным менее 0,80, но более 0,70, при условии если показатель прочности при раскалывании превышает 100 фунт/дюйм^2 (689 кПа).

Дополнительные циклы замораживания-оттаивания

Минеральные заполнители от двух разных производителей испытывались с тремя добавками, а испытания по оценке показателя прочности при растяжении были выполнены после 1, 5 и 10 циклов замораживания-оттаивания по методу GDT 66. В одной из последних публикаций Себаали с соавт. отмечается целесообразность дополнительных циклов замораживания-оттаивания (до 15 циклов) для дискриминантного анализа результатов оценки водостойкости (13). Для дальнейшего изучения были выбраны Минеральный заполнитель А, шелушение для которого ранее не отмечалось, и Минеральный заполнитель В, для которого ранее отмечалось поверхностное шелушение в покрытии. Гранулометрический состав с наибольшим диаметром частицы был равен ½ дюйма (12,5 мм).

В таблице 10 приведены сводные данные по средним значениям показателя прочности на растяжение для каждой комбинации минерального заполнителя, адгезионной добавки и количества циклов замораживания-оттаивания. Затем на основании этих средних значений рассчитывалось значение показателя TSR.

Таблица 10

Сводные данные по средним значениям показателя прочности на растяжение, TSR

Минеральный заполнитель	Адгезионная добавка	Количество циклов замораживания-оттаивания	Прочность на растяжение водонасыщенного образца (фунт/дюйм^2)	Прочность на растяжение неводонасыщенного образца (фунт/дюйм^2)	Значение предельной прочности на растяжение, TSR (%)	соответствие/ несоответствие
A	HL	1	161,2	124,7	129,2	соответствие
A	HL	5	120,4	124,7	96,5	соответствие
A	HL	10	140,8	124,7	112,9	соответствие
A	LAS	1	116,7	118,3	98,6	соответствие
A	LAS	5	93,4	118,3	79,0	несоответствие
A	LAS	10	99,9	118,3	84,5	соответствие
A	WMX	1	135,9	121,3	112,0	соответствие
A	WMX	5	90,8	121,3	74,9	несоответствие
A	WMX	10	82,3	121,3	67,8	несоответствие
B	HL	1	120,9	122,1	99,1	соответствие
B	HL	5	122,9	122,1	100,7	соответствие
B	HL	10	132,3	122,1	108,4	соответствие
B	LAS	1	103,1	116,0	88,9	соответствие
B	LAS	5	87,5	116,0	75,4	несоответствие
B	LAS	10	87,4	116,0	75,3	несоответствие

Минеральный заполнитель	Адгезионная добавка	Количество циклов замораживания-оттаивания	Прочность на растяжение водонасыщенного образца (фунт/дюйм^2)	Прочность на растяжение неводонасыщенного образца (фунт/дюйм^2)	Значение предельной прочности на растяжение, TSR (%)	соответствие/ несоответствие
B	WMX	1	94,4	120,6	78,3	несоответствие
B	WMX	5	72,5	120,6	60,1	несоответствие
B	WMX	10	67,2	120.6	55,7	несоответствие

На основании статистического анализа результатов были сделаны следующие выводы:

- Тип используемой адгезионной добавки — наиболее значимая переменная. Результаты, полученные при использовании добавок LAS и WMX, статистически не отличаются друг от друга.
- Образцы, содержащие гашеную известь (HL), имели статистически более высокую прочность при раскалывании, чем образцы, содержащие добавки LAS и WMX. Разница в наборах данных составляла примерно 30 фунт/дюйм^2.
- Образцы, после 0 и 1 циклов замораживания-оттаивания имели статистически более высокую прочность при раскалывании, чем образцы, после 5 и 10 циклов замораживания-оттаивания. Средняя разница в прочности двух типов образцов составляет около 20 фунт/дюйм^2 (138 кПа). Такой результат обоснован тем, что большее количество циклов замораживания-оттаивания должно нанести больший ущерб испытуемым образцам. Однако после 5 циклов замораживания-оттаивания не происходит значительного снижения прочности на растяжение образца.
- При 5 и 10 циклах замораживания-оттаивания образцы были значительно менее водостойкими, чем при одном цикле замораживания-оттаивания.
- Образцы минерального заполнителя А имели статистически более высокую прочность при раскалывании, чем образцы с минеральным заполнителем В.

Испытания по определению показателя прочности на растяжение

Для определения показателя прочности на растяжение были отобраны как образцы-керны, так и образцы асфальтобетонной смеси, приготовленные в смесительной установке, согласно методу GDT 66, принятому в штате Джорджия, для определения чувствительности к влаге (водостойкости). Сравнительные результаты приведены в табл. 11.

Таблица 11

Сравнительные результаты испытаний образцов из покрытия и асфальтобетонных смесей

	Образцы-керны			Смеси, приготовленные в смесительной установке		
Добавка	Контрольный образец	Водонасыщенный образец	Показатель TSR, %	Контрольный образец	Водонасыщенный образец	Показатель TSR, %
Жидкая адгезионная обработка (LAS)	97,1	86,6	89,2	139,8	137,1	98,0
Добавка, повышающая сцепление в теплых асфальтобетонных смесях (WMX)	94,3	67,6	71,7	125,2	108,2	86,4
Гашеная известь (HL)	100,7	104,2	103,5	142,6	156,2	109,5

Гамбургское испытание на колееобразование

Гамбургское испытание проводилось для определения чувствительности смесей к колееобразованию и водостойкости. Испытания проводили в соответствии со стандартом AASHTO T 324–04, однако по запросу Департамента транспорта штата Джорджия, водонасыщение половины образцов производилось в вакууме в течение 30 мин., а затем они подвергались одному циклу замораживания-оттаивания с целью оценки их эксплуатационных качеств в более суровых условиях, чем типичные для гамбургского испытания. Испытания образцов проводились при нагрузке на колесо 158 ± 1 фунт (71,7 ± 0,4 кг) на 10 000 циклов (20 000 проходов) при их выдерживании в воде (водонасыщении) при температуре 50 °C (122 °F). Испытание обычно прекращалось при общей глубине колеи, равной 0,5 дюйма (12,5 мм), или после 20 000 проходов колеса. Было установлено, что отслоение более 5 000 циклов (10 000 проходов) является хорошим показателем влагостойкой смеси (17). В таблице 12 приведены требования штата Техас по Гамбургскому испытанию на колееобразование с привязкой к верхнему значению вяжущего по PG.

Таблица 12

Требования штата Техас по Гамбургскому испытанию на колейность

Верхнее значение вяжущего по PG	Минимальное количество проходов колеса до образования колеи глубиной, равной 0,5 дюйма (12,5 мм) Температуре испытания — 62 °C
64 или ниже	10 000
70	15 000
76 или выше	20 000

Из данных табл. 13 следует, что для всех исходных образцов смесей, приготовленных в смесительной установке, глубина колеи не превышала 0,5 дюйма (12,5 мм) после 10 000 проходов, однако в случае с образцами смесей с добавкой WMX шелушение происходило до завершения 10 000 проходов. Это указывает на то, что смесь с применением добавки WMX, может быть более чувствительна к влаге сразу после строительства, по сравнению с другими добавками.

Таблица 13

Первоначальные результаты Гамбургского испытания на колееобразование образцов смесей, приготовленных в установке

Образец	PG	Адгезионная добавка	Воздушные пустоты (%)	Полная глубина колеи при 10 000 проходах колеса, дюйм	Момент отслоения (циклы)
15B	67–22	Добавка жидкая LAS	7,1	0,187	Не установлен
16A	67–22	Добавка жидкая LAS	6,5	Не установлено	Не установлен
16B	67–22	Добавка жидкая LAS	7,4	0,130	Не установлен
15A	67–22	Добавка жидкая LAS	7,5	Не установлено	Не установлен
17A	67–22	Добавка жидкая LAS	7,1	0,168	Не установлен
18B	67–22	Добавка жидкая LAS	6,6	Не установлено	Не установлен
20	67–22	Гашеная известь (HL)	7,6	0,055	Не установлен
21	67–22	Гашеная известь (HL)	7,5	Не установлено	Не установлен
22	67–22	Гашеная известь (HL)	6,9	0,062	Не установлен
41	67–22	Гашеная известь (HL)	7,5	Не установлено	Не установлен

Образец	PG	Адгезионная добавка	Воздушные пустоты (%)	Полная глубина колеи при 10 000 проходах колеса, дюйм	Момент отслоения (циклы)
43	67–22	Гашеная известь (HL)	7,2	0,101	Не установлен
44	67–22	Гашеная известь (HL)	7,0	Не установлено	Не установлен
49	67–22	Добавка WMX	7,7	0,394	5,300
24	67–22	Добавка WMX	7,9	Не установлено	Не установлен
26	67–22	Добавка WMX	7,8	0,292	Не установлен
47	67–22	Добавка WMX	8,2	Не установлено	Не установлен
50	67–22	Добавка WMX	7,2	0,404	6,700
48	67–22	Добавка WMX	8,1	Не установлено	Не установлен

***Примечание**: Стандартное отклонение и среднее количество воздушных пустот: добавка LAS = 0,4 и 7,0 соответственно; гашеная известь = 0,3 и 7,3 соответственно; добавка WMX = 0,4 и 7,8 соответственно. Стандартное отклонение и средняя общая глубина колеи при 10000 проходов, дюймы: добавка LAS = 0,029 и 0,162 соответственно; гашеная известь = 0,025 и 0,073 соответственно; добавка WMX = 0,062 и 0,333 соответственно.*

Испытание образцов после двух лет эксплуатации

Для оценки изменения эксплуатационных характеристик материалов в процессе эксплуатации производился отбор образцов-кернов через два года службы покрытия.

Испытание на определение прочности на растяжение

Образцы-керны из смеси, обработанной гашеной известью, через два года имеют более высокую прочность на растяжение (рис. 41).

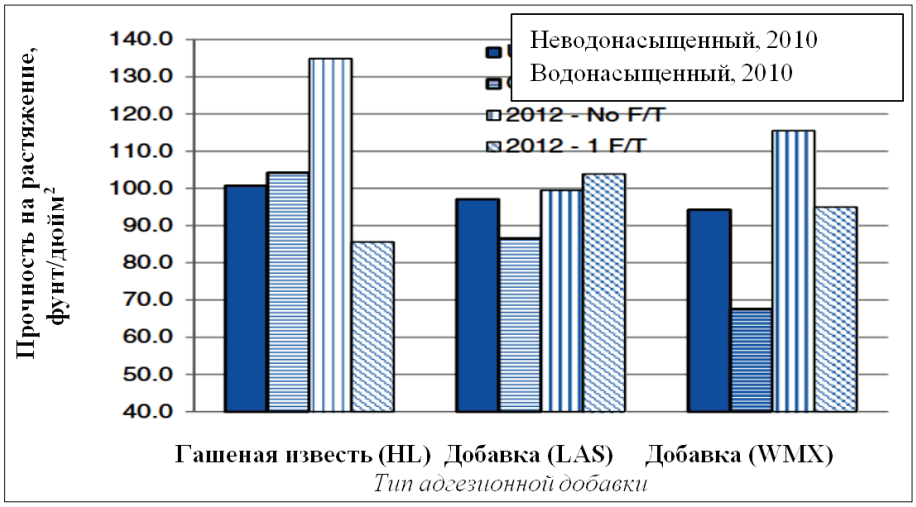


Рис. 41. Прочность на растяжение образцов-кернов, отобранных из покрытий в ходе полевых испытаний

Несмотря на то, что испытание проводилось после двух зимних периодов эксплуатации покрытия, дополнительно образцы подвергались одному циклу замораживания-оттаивания. Как показали результаты испытания, жидкая адгезионная добавка LAS и добавка WMX характеризуются большей прочностью, чем гашеная известь после дополнительного цикла замораживания-оттаивания. Следует особо отметить, что прочность кернов из минерального заполнителя, обработанного добавкой WMX, резко увеличилась с течением времени. Это означает, что, хотя изначально материалы, обработанные добавкой WMX, имели недостаточную проч-

ность на растяжение из-за более мягкого вяжущего, добавка WMX с течением времени позволила повысить ее до уровня добавок LAS и WMX. На основе результатов, полученных для гашеной извести через два года эксплуатации, отмечается резкое сокращение прочности на растяжение после одного дополнительного цикла замораживания-оттаивания. При использовании добавки LAS получены стабильные приемлемые результаты с дополнительным циклом замораживания-оттаивания или без него.

Гамбургское испытание на колееобразование

Гамбургское испытание также проводилось на образцах-кернах, отобранных на опытных участках автомобильных дорог после двух лет эксплуатации. Испытание проводили в соответствии с AASHTO T 324, за исключением дополнительного выдерживания (замораживания-оттаивания), описанного выше. Было отмечено, что эксплуатационные характеристики материала с применением LAS были ниже по сравнению с другими добавками. Образцы из покрытия с гашеной известью и WMX характеризовались одинаково положительно как после одного, так и трех циклов замораживания-оттаивания. Что касается обработки LAS, разрушение образцов происходило после одного цикла замораживания-оттаивания, что соответствовало критериям не менее 10 000 проходов для достижения образования колеи глубиной ½ дюйма. Испытание гамбургским колесом было прекращено после 7 700 проходов колеса ввиду образования колеи глубиной 1 дюйм. Колееобразование образцов после трех циклов замораживания-оттаивания не происходило так значительно, однако после 15 476 проходов отмечалось образование колеи глубиной ½ дюйма.

Испытания образцов-кернов, отобранных на участках, обработанных как гашеной известью, так и WMX, показали, что они выдерживали более 20 000 проходов колеса с точки зрения образования колеи и воздействию циклами замораживания-оттаивания. Такие результаты подтверждают, что уровень эксплуатационных свойств с применением WMX со временем повышается и в конечном итоге качество такого материла сопоставимо с материалами, обработанными другими добавками.

Динамический модуль упругости (установка для испытания эксплуатационных качеств асфальтобетонных смесей AMPT)

Образцы для испытаний на AMPT были подготовлены в соответствии с AASHTO PP 60–09. Приготовление смесей производилось при рабочей температуре 300 F (149 °C), а затем готовые образцы выдерживались в течение 4 часов при температуре 275 °F (135 °C), в соответствии с процедурой кратковременного механического старения AASHTO R30–02. Было приготовлено три образца для каждого типа смеси. Содержание воздушных пустот — не более 7,0 ± 0,5%. Кроме того, образцы, подготовленные для определения динамического модуля упругости, использовались и для определения числа текучести.

Методика испытаний по определению динамического модуля упругости

Данные испытания проводятся на высокоточной измерительной системе AMPT. В ходе испытаний осуществляется количественная оценка измерений деформаций асфальтобетона в широком диапазоне температур, а также степени или частоты нагружения (AASHTO PP 61–10). Согласно данной методике, использовали высококачественное вяжущее марки PG 67–22. Испытание на определение динамического модуля упругости проводилось при температуре 104 °F (40 °C) в соответствии с AASHTO TP 79–11 на образцах при неограниченном сжатии. Коэффициент вариации значений динамического модуля упругости при определенных температурах и частотах составил не более 13%. По полученным данным была построена мастер-кривая динамического модуля упругости.

Результаты испытаний по определению динамического модуля упругости

В таблице 14 приведены коэффициенты мастер-кривой динамического модуля упругости для каждой исследуемой смеси.

Таблица 14

Коэффициенты мастер-кривой динамического модуля упругости

Минеральный заполнитель	Адгезионная добавка	Количество циклов замораживания-оттаивания	Макс. E* (кфунт/дюйм²)	Мин. E* (кфунт/дюйм²)	Beta	Gamma	EA	R^2	Se/Sy
A	HL	0	3,142.1	5.48	–1.173	–0.503	198,534.0	.991	0.07
A	LAS	0	3,166.3	3.64	–1.165	–0.506	202,523.9	.997	0.04
A	WMX	0	3,160.0	4.49	–1.139	–0.476	201,358.3	.997	0.04
A	HL	1	3,139.7	9.33	–1.034	–0.536	183,912.9	.979	0.10
A	LAS	1	3,157.0	5.05	–1.056	–0.534	195,875.7	.994	0.05
A	WMX	1	3,170.1	4.01	–1.072	–0.464	198,016.3	.996	0.05
B	HL	0	3,177.3	5.49	–1.157	–0.523	198,793.6	.995	0.05
B	LAS	0	3,177.4	4.65	–1.008	–0.476	198,826.0	.996	0.04
B	WMX	0	3,184.5	4.09	–1.120	–0.472	184,876.2	.993	0.06
B	HL	1	3,185.2	4.88	–1.132	–0.515	193,761.4	.996	0.05
B	LAS	1	3,175.0	4.51	–0.972	–0.477	199,578.9	.997	0.04
B	WMX	1	3,184.5	5.49	–1.009	–0.467	197,784.4	.997	0.04

Примечание: *EA — энергия активации (определяется при помощи программного обеспечения Solver, Se — стандартная ошибка оценки, Sy — стандартное отклонение логарифма средних измеренных значений динамического модуля.*

Результаты по определению числа текучести

Испытание по определению числа текучести выполняется с помощью AMPT в соответствии с AASHTO PP 79–11. Образец асфальтобетона подвергается воздействию циклического нагружения, при этом системой AMPT регистрируется деформация образца при каждом дополнительном цикле нагружения и определяется температура, напряженное состояние, девиаторная нагрузка (девиаторное напряжение), распределенная нагрузка (распределенное напряжение) и число циклов нагружения. Для каждого цикла время приложения нагружения составляет 0,1 с с последующим периодом отдыха 0,9 с. Число текучести определяется как количество циклов, после которых наступает разрушение образца. Определяется как переходный момент от устойчивого состояния колееобразования (вторичное колееобразование) к более быстрому разрушению (третичная текучесть), см. рис. 42.

Рис. 42. Типичная кривая числа текучести

Образцы испытывали при неограниченном сжатии с девиаторным напряжением, равным 87 фунтов/ дюйм^2 (600 кПа), при температуре 144 °F (62 °C).

Число текучести используется для определения уровня интенсивности движения, который образец может выдержать. Параметры испытания соответствуют требованиям NCHRP 09–33 для оценки устойчивости к колееобразованию горячих асфальтобетонных смесей путем определения числа текучести (18). Такие же параметры испытаний рекомендуются документом NCHRP Project 09–43 (19) для теплых асфальтобетонных смесей. Несмотря на то, что параметры испытаний одинаковы, рекомендуемые минимальные значения числа текучести для заданного уровня интенсивности движения отличаются для горячих и теплых асфальтобетонных смесей. Для данного исследования был испытан набор из трех образцов из каждой комбинации минерального заполнителя, адгезионной добавки и циклов замораживания-оттаивания (всего 12 наборов). Образцы были изготовлены в соответствии с AASHTO PP 60–09; содержание воздушных пустот — до 7% ± 0,5%. В таблице 8 приведены сводные результаты испытания по определению числа текучести, в том числе среднее число текучести и стандартное отклонение числа текучести (модель Франкена), рекомендуемый уровень интенсивности движения, который может выдержать смесь (в млн эквивалентных одноосных нагрузок, ESALs). Согласно AASHTO TP 79–11, коэффициент изменения числа текучести должен быть не более 20%. Из таблицы 15 следует, что вариативность для этого набора данных падает ниже этого порогового значения для всех, кроме одной смеси (минеральный заполнитель А с добавкой WMX, 0 циклов замораживания-оттаивания). Этот набор данных включал один образец с очень высоким числом текучести (в два раза больше числа текучести других образцов).

Таблица 15

Сводные результаты испытания по определению числа текучести

Минеральный заполнитель	Адгезионная добавка	Циклы замораживания-оттаивания	Среднее число текучести	Стандартное отклонение числа текучести	CV (%)	(MESALs)
A	HL	0	72,7	13,2	18,2	от 3 до <10
A	LAS	0	30,7	2,5	8,2	<3
A	WMX	0	97,3	44,0	45,2	от 3 до <10
A	HL	1	61,3	1,5	2,5	от 3 до <10
A	LAS	1	24,7	4,0	16,4	<3
A	WMX	1	73,3	5,5	7,5	от 3 до <10
B	HL	0	41,3	3,1	7,4	<3
B	LAS	0	39,3	5,5	14,0	<3
B	WMX	0	57,7	2,5	4,4	от 3 до <10
B	HL	1	38,7	7,0	18,2	<3
B	LAS	1	30,3	3,2	10,6	<3
B	WMX	1	57,7	6,4	11.1	от 3 до <10

Примечание: *CV– коэффициент вариации; MESALs — млн эквивалентных одноосных нагрузок. Серым выделен результат, показывающий превышение допустимых значений.*

На основании полученных результатов можно сделать следующие выводы:

- Шесть из двенадцати образцов смеси были пригодны для дорог с интенсивностью движения, соответствующей расчётным нагрузкам от 3 до 10 млн. ESAL, остальные — только для дорог с меньшей интенсивностью движения (менее 3 млн. ESAL).
- Несмотря на то, что статистический анализ показал, что наличие или отсутствие цикла замораживания — оттаивания является значимым фактором *(р-значение = .028 < α = .05),* эта переменная не влияла на уровень интенсивности движения, который может выдержать конкретная смесь. Например, смесь с минеральным заполнителем А и добавкой WMX была подходящей для дороги с расчетными нагрузками от 3 до 10 млн. ESAL, как после цикла замораживания — оттаивания, так и без него.
- Смеси с добавкой WMX характеризовались самыми высокими значениями числа текучести в сравнении с другими добавками.
- Смеси с добавкой LAS характеризовались самыми низкими значениями числа текучести в сравнении с другими добавками.
- За исключением смесей с LAS, смеси с минеральным заполнителем А обладают более высокой устойчивостью к колееобразованию по сравнению со смесями на основе минерального заполнителя В.

Результаты исследования

Данное исследование заключалось в проведении лабораторных испытаний образцов смесей как приготовленных в лабораторных условиях, так и полученных в ходе полевых испытаний. Образцы-керны отбирались на опытных участках сразу после строительства, а также через два года эксплуатации. На разных образцах и при различных уровнях выдерживания в течение нескольких циклов замораживания-оттаивания были проведены такие испытания, как испытание прочности на растяжение, гамбургское испытание на колееобразование, испытание по определению динамического модуля упругости и числа текучести.

Лабораторные испытания прочности на растяжение

Испытания по определению водостойкости проводились при 0, 1, 5 и 10 циклах замораживания-оттаивания. Результаты испытаний при 0 и 1 цикле замораживания-оттаивания были одинаковыми, а результаты при 5 и 10 циклах оказались схожими с полученными при меньшем количестве циклов, при этом соответствовали наиболее высоким значениям прочности. Результаты при 5 и 10 циклах замораживания-оттаивания были значительно более репрезентативными, чем полученные при одном цикле замораживания-оттаивания.

Полевые испытания

В ходе испытаний на определение динамического модуля упругости, проведенных при 39 °F (4 °C) и частоте 10 Гц, для десяти из двенадцати смесей, обработанных гашеной известью, были получены более высокие результаты. В ходе испытания, проведенном при низкой частоте, равной 0,01 Гц, и при высокой температуре, равной 104 °F (40 °C), т. е. в условиях, характерных для колееобразования, также были получены более высокие результаты для образцов, обработанных гашеной известью, однако результаты были статистически эквивалентными для девяти из двенадцати образцов. Число текучести для теплой асфальтобетонной смеси, обработанной новой добавкой (WMX), было наиболее высоким независимо от количества циклов замораживания-оттаивания. Число текучести для каменного материала (А) составляло примерно 1/3 от числа циклов замораживания-оттаивания до разрушения для случаев, когда использовались жидкие адгезионные материалы LAS, чем когда использовались гашеная известь или WMX-добавка. Для образцов каменного материала (В), использование как гашеной извести, так добавки LAS дало аналогичные результаты, что составило всего 2/3 от числа циклов замораживания-оттаивания до разрушения, как и для добавки WMX.

Выводы

- В ходе экспериментальных работ материалы подвергались воздействию нескольких циклов замораживания-оттаивания (0, 1, 5 и 10 циклов). Гашеная известь (HL) имела наивысшую прочность при растяжении и самые высокие значения предела прочности (TSR) и оказалась единственной добавкой, использование которой обеспечило минимально допустимых 80% значений предела прочности (TSR) для всех комбинаций циклов замораживания-оттаивания. Напротив, среднее значение для всех случаев использования добавки (WMX) при пяти или более циклах замораживания-оттаивания не соответствовало критерию.
- При 5 и 10 циклах замораживания-оттаивания образцы были значительно более чувствительны к влаге (менее водостойкие), чем при одном цикле.
- Испытания по определению динамического модуля упругости показали, что смеси, обработанные гашеной известью (HL), обладали более высокими характеристиками, однако в большинстве случаев результаты испытаний были статистически эквивалентными.
- Испытание по определению числа текучести показало лучшие результаты при использовании добавки WMX. Во всех случаях использование добавки LAS дало самые низкие результаты.
- Обработанные добавкой WMX смеси показали низкие значения начальной прочности на растяжение, но прочность этих смесей со временем улучшилась.

Литература

1. Kennedy, T., F. Roberts, and K. Lee. Evaluation of Moisture Effects on Asphalt Concrete Mixtures. In Transportation Research Record 911, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1983, pp. 134–143.

2. Nicholson, V. Adhesion Tension in Asphalt Pavements, Its Significance and Methods Applicable in Its Determination. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 3, 1932, pp. 28–49.

3. Tunnicliff, D., and R. Root. NCHRP Report 274: Use of Anti-Stripping Additives in Asphaltic Concrete Mixtures: Laboratory Phase. TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1984.

4. Lottman, R. NCHRP Report 192: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete. TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1978.

5. Andersland, O. B., and W. Goetz. Sonic Test for Evaluation of Stripping Resistance in Compacted Bituminous Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 25, 1956, p. 148.

6. Skog, J., and E. Zube. New Test Methods for Studying the Effects of Water Action on Bituminous Mixtures. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 32, 1963, pp. 380–411.

7. Field, F., and W. Phang. Stripping in Asphaltic Concrete Mixes: Observations and Test Procedures. Journal of the Canadian Technical Asphalt Association, Vol. 12, 1967, pp. 61–88.

8. Brown, E., and R. Kuntze. A Study of Stripping in Asphalt Pavements. Report RR 177. Department of Transportation and Communications, Ontario, Canada, 1972.

9. Jimenez, R. Testing for Debonding of Asphalts from Aggregates. Report AHD-RD-10–123. Research Division of Arizona Highway Department, 1973.

10. Schmidt, R., and P. Graf. Effect of Water on Resilient Modulus of Asphalt-Treated Mixes. Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Vol. 41, 1972, pp. 118–162.

11. Lottman, R. NCHRP Report 246: Predicting Moisture-Induced Damage to Asphaltic Concrete: Field Evaluation. TRB, National Research Council, Washington, D. C., 1982.

12. Lottman, R. The Moisture Mechanism That Causes Asphalt Stripping in Asphaltic Concrete Mixtures. Research Project R-47. Idaho Department of Highways and University of Idaho, Moscow, 1971.

13. Sebaaly, P., E. Hajj, D. Little, S. Shivakolunthar, T. Sathanathan, and K. Vasconcelos. Evaluating the Impact of Lime on Pavement Performance. University of Nevada, Reno, 2010.

14. Sebaaly, P. E., E. Hitti, and D. Weitzel. Effectiveness of Lime in Hot-Mix Asphalt Pavements. In Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, No. 1832, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2003, pp. 34–41.

15. QPL-26, Heat Stable Anti-Stripping Additives. http://dot.ga.gov/doing business/Materials/qpl/Documents/qpl26.pdf. Accessed June 2012.

16. GDT 66-Evaluating the Moisture Susceptibility of Bituminous Mixtures by Diametral Tensile Splitting. http://dot.ga.gov/doingbusiness/ TheSource/gdt/gdt066.pdf. Accessed June 2012.

17. Texas DOT Standard Specifications, Section 340.4. A. Table 6. http://ftp. dot.state.tx.us/pub/txdot-info/des/specs/specbook.pdf. Accessed July 2012.

18. Advanced Asphalt Technologies, LLC. NCHRP Report 673: A Manualfor Design of Hot Mix Asphalt with Commentary. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2011.

19. Bonaquist, R. NCHRP Report 691: Mix Design Practices for Warm Mix Asphalt. Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D. C., 2011.

7.3. Повышение эксплуатационных характеристик асфальтобетона (ЭХ) путем армирования асфальтобетонных смесей синтетическими волокнами

Для повышения долговечности асфальтобетонных покрытий необходимо решить ряд задач: обеспечить устойчивость асфальтобетона к трещинообразованию в осенне-зимне-весенний период, повысить его сопротивляемость к сдвиговым нагрузкам в летний период наряду с увеличением усталостной долговечности.

Для этого как за рубежом, так и в России выполняются широкие исследования в области улучшения качества асфальтобетона или за счет повышения физико-механических свойств дорожных битумов, или за счет улучшения свойств асфальтобетона путем повышения требований к составляющим его компонентам: щебню, песку, минеральному порошку. В последние годы качество асфальтобетона удается улучшить за счет применения взамен нефтяных дорожных битумов полимерно-битумных вяжущих по ГОСТ Р 52056–2003 и других модифицирующих добавок, а также путем изменения структуры самого асфальтобетона при введении в него различных модификаторов, способствующих увеличению его устойчивости к возникновению разрушений и деформаций. Интересным и заслуживающим внимания в этом направлении является применение различных видов волокон в составе асфальтобетонной смеси.

Известно множество видов волокон: минеральные базальтовые диабазовые, металлические, целлюлозные, стекловолокна, синтетические. Все эти виды волокон различаются по своей природе, размерам, особенностям применения и эффекту воздействия на свойства материала.

Основные технические характеристики различных видов волокон, применяемых в настоящее время в разных областях строительства, приведены в табл. 16.

Из всех представленных видов следует выделить синтетические волокна, которые характеризуются достаточно высокой прочностью, водостойкостью, износостойкостью, эластичностью, устойчивостью к воздействию химических реагентов.

Таблица 16

Характеристики различных видов волокон

Волокно	Плотность, г/см^3	Модуль упругости, МПа	Прочность на растяжение, МПа	Удлинение при разрыве, %
Полипропиленовое	0,9	3500–8000	400–700	10–25
Полиамидное	0,9	1900–2000	720–750	24–25
Полиэтиленовое	0,95	1400–4200	600–720	10–12
Акриловое	1,1	2100–2150	210–420	25–45
Нейлоновое	1,1	4200–4500	770–840	16–20
Вискозное сверхпрочное	1,2	5600–5800	660–700	14–16
Полиэфирное	1,4	8400–8600	730–780	11–13
Хлопковое	1,5	4900–5100	420–700	3–10
Карбоновое	1,63	280000–380000	1200–4000	2,0–2,2
Углеродное	2,00	200000–250000	2000–3500	1,0–1,6
Стеклянное	2,60	7000–8000	1800–3850	1,5–3,5
Асбестовое	2,60	68000–70000	910–3100	0,6–0,7
Базальтовое	2,60–2,70	7000–11000	1600–3200	1,4–3,6
Стальное	7,80	190000–210000	600–3150	3–4

В настоящее время известно большое количество разных видов армирующих материалов (фиброволокон) органического и неорганического происхождения, которые применяются в большей степени при производстве бетонов.

Применение синтетических волокон в асфальтобетоне в отечественной практике мало изучено. Исследования, проводимые в соответствии со стандартными методами испытаний, не позволяют оценить существенных преимуществ дисперсно-армированного асфальтобетона по сравнению с традиционным асфальтобетоном. Кроме того, рекомендуемое количество синтетических волокон (фиброволокна) в асфальтобетонных смесях находится в пределах 0,05–1,5% от массы минеральной части, в зависимости от вида применяемых волокон. Поэтому для подтверждения эффективности применения синтетических волокон в асфальтобетонных смесях необходимы дополнительные сравнительные исследования материала с использованием нестандартных методов испытаний и современных средств измерения.

Армирование асфальтобетонных смесей синтетическими волокнами позволяет создать в асфальтобетоне пространственную решетку дисперсной арматуры из синтетических волокон, улучшить распределение в асфальтобетоне напряжений от подвижной нагрузки за счет более

совершенной пространственной решетки дисперсной арматуры и тем самым увеличить долговечность асфальтобетонного покрытия. При этом следует отметить, что одним из основных определяющих факторов, позволяющих повысить физико-механические показатели асфальтобетона, является оптимально подобранный состав асфальтобетонной смеси.

В данном разделе приведен перевод статьи по теме, каким образом оценивается эффективность введения смеси синтетических волокон в асфальтобетоне с использованием современных методов испытаний эксплуатационных характеристик (ЭХ).

***Опыт США*. Оценка эффективности дисперсно-армированных асфальтобетонных смесей с помощью современных методов испытаний**

Задачей настоящего исследования являлась оценка свойств материалов традиционной (контрольной) и дисперсно-армированной смесей с применением современных методов испытаний для определения характеристик материалов. Лабораторная экспериментальная программа включала трехосное испытание прочности на сдвиг, определение динамического (комплексного) модуля, испытания для определения постоянной деформации при повторном приложении нагрузки, усталости, распространения трещин и косвенного определения прочности при растяжении[15]. Проводилось сравнение данных поведения в эксплуатации дисперсно-армированной и контрольной смесей. Результаты показали, что волокна несколькими уникальными путями улучшают эксплуатационные показатели смеси в отношении прогнозируемых крупных разрушений: постоянной деформации, усталостного трещинообразования и температурного трещинообразования.

Волокна использовались для улучшения эксплуатационных показателей асфальтобетонных смесей в отношении постоянных деформаций и усталостного трещинообразования [1,2]. Последние разработки в дорожной отрасли, касающиеся лабораторных испытаний по определению характеристик материалов, послужили мотивацией для данного исследования с целью переоценки поведения синтетических волокон в асфальтобетонных смесях. Применяемые волокна представляли собой смесь полипропиленовых и арамидных волокон. Особый интерес представляли лабораторные испытания, которые были включены как часть проекта 9–19 Национальной объединенной программы дорожных исследований (NCHRP) и «Руководство по механо-эмпирическому проектированию дорожных одежд (MEPDG) [3,4].

В литературе было найдено мало исследований, сообщающих об экспериментах с применением синтетических волокон в асфальтобетоне (АС).

Буэно и др. (Bueno et al.) изучали влияние добавления произвольно распределенных синтетических волокон на механическую реакцию перемешиваемой в холодном состоянии, плотно подобранной асфальтобетонной смеси с использованием испытания Маршалла, а также с помощью статических и циклических трехосных испытаний [1]. Результаты показали, что добавление волокон вызвало небольшие изменения параметров прочности смеси при трехосном испытании на сдвиг. Ли и др. (Lee et al) производили оценку влияния волокон на сопротивление асфальтобетона (АС) усталостному трещинообразованию [2]. Было установлено, что увеличение энергии разрушения представляет собой потенциал для увеличения срока службы асфальтобетонной смеси при усталости.

В исследовании Фитцджеральда (Fitzgerald) сообщалось, что добавление углеродных волокон в асфальтобетонную смесь, вероятно, оказывает благоприятный эффект на её свойства, от улучшения механических свойств до снижения электрического сопротивления, определяемого с помощью методологии испытания электрического удельного сопротивления [5]. Однако это исследование не включало обширных лабораторных механических испытаний на сме-

[15] Kamil Elias Kaloush, Krishna Prapoorna Biligiri, Waleed Abdelaziz Zeiada, Maria Carolina Rodezno, and Jordan Xavier Reed.Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced material characterization tests. Journal of Testing and Evaluation, Vol. 38, No. 4. Paper ID JTE102442. Available online at: www.astm.org.

сях, модифицированных углеродными волокнами. Кливен (Cleven) подверг асфальтобетонные смеси, армированные углеродными волокнами, механическим испытаниям, которые включали определение диаметрального модуля упругости (resilient modulus), испытание постоянной деформации при повторных нагрузках, испытание усталости балок при изгибе, а также косвенное определение прочности при растяжении [6]. Наблюдения показали, что модифицированные асфальтобетонные смеси являются более жесткими, обладают более высоким сопротивлением постоянным деформациям и более высокой прочностью при растяжении при низких температурах. Однако образцы, модифицированные углеродными волокнами, не показали какого-либо улучшения поведения при усталости, оцениваемого посредством испытания балочки под нагрузкой в четверти пролета или испытания податливости ползучести при низкой температуре. Джароми и Ходаи (Jahromi and Khodai) также исследовали характеристики и свойства асфальтобетонных смесей, армированных углеродными волокнами, с помощью лабораторных испытаний, таких как устойчивость по Маршаллу, косвенное растяжение, ползучесть и косвенное испытание растяжения при повторных нагрузках с целью определения сопротивления усталости [7]. Они сообщили, что добавление углеродных волокон приводило к увеличению устойчивости смеси, уменьшению текучести и увеличению пустот в смеси. Они также установили, что добавление волокон улучшало срок службы смесей при усталости и поведение при постоянных деформациях.

Другие исследователи (Mahrez and Karim) использовали стекловолокно в щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМА). Они установили, что применение стекловолокна в асфальтобетонных смесях давало изменчивые результаты устойчивости по Маршаллу и что добавление стекловолокна фактически понижало устойчивость и жесткость смеси [8]. В другом исследовании в 2007 г. [9] эти авторы использовали испытание на стенде с движущимся колесом для определения сопротивления ползучести и колееобразованию асфальтобетонных смесей, армированных стекловолокном. Они сообщили, что включение стекловолокна приводило к получению более высокого модуля упругости[16] (удельной работы упругой деформации) и более высокому сопротивлению постоянной деформации и колееобразованию. В работе [10] (Putman and Amirkhanian) изучалась возможность использования волокон из отходов шин и ковров в смесях ЩМА. В исследовании проводилось сравнение эксплуатационных показателей смесей ЩМА, содержащих волокна из шинных и ковровых отходов, и смесей с обычно применяемыми целлюлозными и другими полиэфирными волокнами. Не было обнаружено каких-либо значительных различий в отношении постоянных деформаций или влагочувствительности в смесях, содержащих волокна из отходов, по сравнению со смесями с целлюлозными или полиэфирными волокнами. Однако они сообщили, что шинные, ковровые и полиэфирные отходы значительно улучшают ударную вязкость (прочность) смесей по сравнению с целлюлозными волокнами.

В работе [11] (Chowdhury et al) оценивались два типа волокон из старых шин для того, чтобы определить, могут ли они быть использованы в различных типах асфальтобетонных смесей в качестве заменителей применяемых в настоящее время целлюлозных и минеральных волокон. Исследователи провели испытания трех различных типов смесей: щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (ЩМА), смеси для проницаемого пористого слоя (PFC) и крупнозернистой смеси имеющей высокое содержание вяжущего, с использованием двух различных типов волокон из шинных отходов, одного типа целлюлозных волокон, а также контрольной смеси без волокон. Для оценки смесей были проведены лабораторные испытания для определения стекания вяжущего, определения динамического модуля и косвенного определения прочности при растяжении, а также гамбургское испытание на стенде с движущимся колесом. В большинстве случаев смеси, содержащие волокна из шин, превосходили смеси, содержащие целлюлозные волокна и смеси без волокон. Результаты испытания стекания вяжущего четко показали,

[16] resilient modulus

что волокна из старых шин могут быть использованы в смесях ЩМА и PFC для замены целлюлозных волокон с целью предотвращения стекания битума в процессе строительства.

a)

b)

Рис. 43. (а) Состояние покрытия до укладки слоя усиления. (в) Подготовка поверхности путем фрезерования кромки покрытия

a)

b)

Рис. 44. (а) Изображение армирующих волокон в увеличенном масштабе: полипропилен (более светлая окраска) и арамид (более темная окраска). (в) Изображение дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси в увеличенном виде

В работе [12] (Wu et al) изучались динамические характеристики трех асфальтобетонных смесей, модифицированных целлюлозными, полиэфирными и минеральными волокнами с нормой расхода 0,3%; 0,3% и 0,4%, соответственно. Результаты экспериментов показали, что модифицированные волокнами асфальтобетонные смеси имеют более высокий динамический модуль по сравнению с контрольной смесью.

В настоящем исследовании осуществлялся небольшой проект по восстановлению дорожной одежды, который координировался с городом Тэмп (City of Tempe), штат Аризона. Проект восстановления включал строительство экспериментальных участков со слоем усиления из контрольной асфальтобетонной смеси, а также смеси, армированной синтетическими волокнами. Традиционная асфальтобетонная смесь плотно подобранного состава была выбрана для укладки на подъездной дороге Эвергрин (Evergreen Drive), расположенной к востоку от объездной дороги 101 и к северу от Университетского проезда в Тэмпе, Аризона. На этом дорожном участке укладывались две смеси: контрольная смесь без волокон и смесь, содержащая 1 фунт (450г) волокон/ 1 тонну смеси**.** Волокна представляли собой патентованную смесь из полипропиленовых и арамидных волокон, предоставленную изготовителем из Пенсильвании. Волокна добавлялись в асфальтобетонную установку периодического действия в Финиксе. На рисунке 43 показано состояние дорожного участка до укладки слоя усиления. Никакой ремонтной работы, в основном, не проводилось и 2-дюймовый (5 см) слой усиления укладывался на сильно разрушенном участке подъездной дороги Эвергрин. Выполнялось только фрезерование кромки покрытия для обеспечения соответствия окончательного уровня слоя усиления с бордюром. Опытные участки с волокнами и без волокон располагались для проведения непосредственного полевого сравнения эксплуатационных показателей с учетом транспортного потока и типов нагрузок (например, автобусов). Приблизительно 1500 фунтов (680 кг) каждой смеси было привезено в лаборатории университета штата Аризона (ASU). Приготовление образцов включало уплотнение вращающихся (gyratory) образцов диаметром 150 мм для трехосных испытаний. Кроме того, были приготовлены и уплотнены балочные образцы в соответствии с протоколами испытаний AASHTO TP8 [13–15]. Эксплуатационные показатели обеих смесей оценивались с помощью современных методов испытаний для определения характеристик материалов, в число которых входили следующие: трехосное испытание прочности при сдвиге, определение динамического модуля, определение постоянной деформации при повторных нагрузках, испытание балочек на усталость при изгибе, определение C* линейного интеграла для оценки энергии разрушения и распространения трещин и косвенное испытание растяжения по диаметру для оценки температурного трещинообразования.

Задача исследования

В задачи настоящего исследования входила оценка свойств материалов традиционной (контрольной) асфальтобетонной смеси и армированных полипропиленовыми/арамидными волокнами асфальтобетонных смесей с помощью наиболее современных лабораторных испытаний, принятых в дорожной отрасли [4]. Ставилась цель оценить, как отличаются свойства материалов дисперсно-армированной смеси по жесткости, постоянной деформации и характеристикам трещинообразования. Важным аспектом этой работы было выявление метода лабораторного испытания, который позволяет наилучшим образом установить преимущество процесса модификации синтетическими волокнами.

Материалы

Характеристики волокон

Как указано выше, волокна в настоящем исследовании представляли собой смесь синтетических волокон, спроектированную для применения в горячей асфальтобетонной смеси (HMA). На рисунке 44(a) показаны типичные волокна, содержащиеся в 1-фунтовом (~445г) мешке, смесь арамидных (желтая окраска) и полипропиленовых (желтовато-коричневая окраска) волокон. В таблице 17 представлены физические свойства обоих типов волокон. Волокна предназначены для армирования смесей HMA в трех измерениях и устройства слоев усиления покрытий.

Таблица 17

Физические характеристики волокон

Свойство	Материалы	
	Полипропилен	Арамид
	Крученое фибриллированное волокно	Многофиламентное волокно
Удельный вес	0,91	1,45
Прочность при растяжении (МПа)	483	3000
Длина (мм)	19	19
Окраска	Желтовато-коричневая	Желтая
Кислото-щелочестойкость	Инертные	Хорошо стойкие
Температура распада (°C)	157	>450

Характеристики смеси

Применялись технические условия города Финикс (PHX C-3/4) на асфальтобетонные смеси с номинальным максимальным размером минерального материала ¾ дюйма (19 мм). Для приготовления смеси использовалось битумное вяжущее PG 70–10. Теоретические значения максимального удельного веса контрольной и дисперсно-армированной смесей составляли 2,428 и 2,458, соответственно. Расчетное содержание битумного вяжущего было 5,0% для контрольной смеси и такое же содержание битума было использовано для дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси. Эталонное (контрольное) содержание воздушных пустот как в контрольной, так и в дисперсно-армированной асфальтобетонной смесях составляло 7,0%. На рисунке 2(b) представлена крупным планом рыхлая асфальтобетонная смесь, которая была распределена по столу при подготовке к проведению испытания Райса (Rice) для определения плотности. Можно было видеть невооруженным глазом, что волокна хорошо распределены в смеси. Смеси повторно нагревались и уплотнялись для получения гирационных (gyratory) образцов 150x170 мм^2. Процесс повторного нагревания и уплотнения является обычно принятым в дорожной отрасли для лабораторной оценки полевых смесей, несмотря на некоторое старение смесей. Из каждой гирационной пробы (plug) были высверлены цилиндрические об-

разцы; концы были отпилены для того, чтобы получить окончательные образцы диаметром 100 мм и высотой 150 мм для трехосных испытаний. Кроме того, для оценки трещинообразования при усталости были приготовлены балочные образцы. Для оценки температурного трещинообразования были приготовлены дисковые образцы в соответствии с «Методом испытания для косвенного определения ползучести при растяжении асфальтобетонных смесей для оценки температурного трещинообразования», представленным в отчете NCHRP 465 [4]. Аналогичные дисковые образцы были приготовлены для испытания распространения C*-трещин.

Испытания контроля качества, проведенные на 15 произвольно выбранных лабораторных уплотненных образцах, показали, что среднее содержание битума составляло 4,94% при стандартном отклонении 0,36%. Кроме того, было также установлено, что гранулометрический состав минерального материала соответствует проектному диапазону для всех сит.

Лабораторные испытания, результаты и анализ

Трехосные испытания прочности при сдвиге

Трехосное испытание прочности при сдвиге было признано в качестве стандартного испытания для определения прочности материалов за период более 50 лет. Результаты этих испытаний обеспечивают фундаментальную основу, которая может быть использована при анализе устойчивости асфальтобетонных смесей. Это объясняется тем, что напряжения, действующие на лабораторный образец в процессе испытания, моделируют состояние напряжений, имеющих место в покрытии при условии, что удовлетворены определенные граничные условия и геометрические параметры образца.

Проводились трехосные испытания прочности при трех состояниях напряжений, одно без ограничения и два с ограничением, для контрольной и дисперсно-армированной асфальтобетонной смесей. Испытания выполнялись на цилиндрических образцах диаметром 4 дюйма (100 мм) и высотой 6 дюймов (150 мм). Температура при проведении испытаний составляла 130°F (54,4°C). Использовалось ограничивающее давление 20 и 40 фунтов/кв.дюйм (138 и 276 кПа). При каждом уровне ограничения использовались два дублирующие образца. Образцы нагружались по оси до разрушения при скорости деформации 1,27 мм/мм/мин.

На рисунке 45(a) приведен график огибающей разрушения Мора-Кулона, представленной когезией «c» и углом внутреннего трения «φ» испытываемых смесей. Классически параметры c и φ являются показателями прочности смесей. Чем выше значение c, тем выше сопротивление смеси напряжениям сдвига. Кроме того, чем выше значение φ, тем выше способность асфальтобетонной смеси развивать прочность при приложении нагрузок и, следовательно, тем меньше вероятность постоянной деформации. Значение c дисперсно-армированной смеси было выше (34,3 фунта/кв.дюйм)[17], чем контрольной смеси (27,4 фунта/кв.дюйм). Влияние волокон на значение φ было меньше, 48° для дисперсно-армированной смеси по сравнению с 47° для контрольной смеси. Поскольку значение φ является свойством минерального материала, следовательно, не ожидалось какого-либо значительного изменения, так как обе смеси имели одинаковый гранулометрический состав.

На рисунке 45(b) приведен пример сравнения испытаний, проведенных с обеими смесями при уровне ограничения 20 футов/кв.дюйм (138 кПа). Представлены кривые до и после развития максимальных напряжений в процессе испытания. Для дисперсно-армированной смеси наблюдалось, что период развития максимального напряжения и время его возникновения были выше по сравнению с этими показателями для контрольной смеси (поведение, которое отнесено за счет влияния волокон в смеси). Волокна обеспечивают это дополнительное повышение сопротивления асфальтобетонной смеси постоянной деформации и замедляют возникновение разрушений при сдвиге. Кроме того, вычислялись суммарные площади под кривой для испытываемых смесей; величина этих площадей может быть интерпретирована в качестве

[17] 1 фунт/кв.дюйм = 0,0703 кг/кв.см

показателей остаточной энергии смесей для сопротивления распространению трещин после максимального напряжения. Во всех этих испытаниях дисперсно-армированная смесь показала более высокую остаточную энергию, чем контрольная смесь.

Испытание для определения остаточной деформации при повторных нагрузках

Испытание с повторной нагрузкой или показателя ползучести (FN) — это динамическое испытание ползучести для определения характеристик постоянной деформации дорожных материалов. Это испытание было тщательно документировано в отчете NCHRP [4]. В этом испытании выполняется несколько тысяч повторных приложений динамической нагрузки и регистрируется суммарная постоянная деформация, включая начало третьей стадии (FN), как функция числа циклов нагружения за период испытания. Испытания проводились на цилиндрических образцах диаметром 4 дюйма (100 мм) и высотой 6 дюймов (150 мм). Прилагалась haversine[18] пульсирующая нагрузка со временем выдержки (время покоя) 0,1 и 0,9 сек.

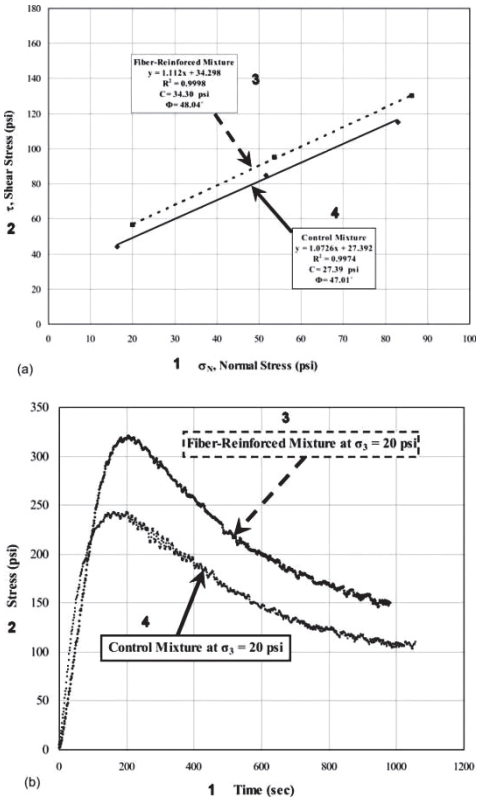
В таблице 18 представлена сводка результатов испытаний FN при 130°F (54,44°C). Было установлено, что значения FN дисперсно-армированных смесей были в 15 раз выше, чем контрольных смесей. Средние значения постоянной осевой деформации были 0,78% и 0,51% для контрольной и дисперсно-армированной смесей, соответственно. В этих испытаниях наблюдались две характеристики дисперсно-армированной смеси: более длительный период выносливости (усталостной прочности) на второй стадии и постепенное (меньшее) накопление постоянной деформации после текучести на третьей стадии (третичной текучести). На рисунке 46 представлены значения угла наклона кривой деформации для обеих смесей на третьей стадии. Можно видеть, что контрольная смесь имеет более высокий угол наклона кривой деформации по сравнению с дисперсно-армированной смесью. Более низкие значения угла наклона кривой деформации на третьей стадии означают, что в этом образце сохраняется больше энергии и что эта смесь обладает более высоким потенциалом сопротивления разрушению при сдвиге и, следовательно, сопротивления постоянной деформации.

*Испытание динамического модуля E**

Зависимость напряжения — деформация для асфальтобетонной смеси под действием непрерывной синусоидальной нагрузки определяется её комплексным динамическим модулем (E*). В документе MEPDG динамический модуль E* асфальтобетонной смеси определяется в соответствии с AASHTO TP 62–03. Для каждой смеси испытывались по три образца диаметром 100 мм и высотой 150 мм при температуре 14, 40, 70, 100 и 130°F (–10; 4,4; 21; 37,8 и 54,4°C) и частоте нагружения 25; 10; 5; 1; 0,5 и 0,1 Гц. Испытания E* проводились с использованием контролируемого синусоидального напряжения, которое вызывало деформации меньше чем 150 микродеформаций. На рисунке 47(a) представлены средние сводные кривые E* как для контрольной, так и дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси. Этот рисунок может быть использован для общего сравнения смесей, но конкретное сравнение значений комбинаций температура — частота необходимо выполнять отдельно. Это означает, что нельзя сравнивать непосредственные значения на вертикальной оси для конкретных логарифмических приведенных значений времени. Как показано на рисунке, дисперсно-армированная смесь имела более высокие значения модулей, чем контрольная смесь, при всех температурах и частотах испытания. Разность ниже при наиболее низкой температуре вследствие доминирующего влияния вяжущего. При более высоких температурах, когда вяжущее становится мягче, минеральные материалы определяют упругое поведение асфальтобетонных смесей и армирующий эффект волокон может повысить значение модуля при высоких температурах. Кроме того, арамидные волокна обладают уникальным отрицательным значением температурного коэффициента в том отношении, что они сжимаются при повышенных температурах и, таким образом, играют положительную роль в сопротивлении деформациям. На рисунке 47(b) представлено непосредственное сравнение для выбранных значений температуры испытания

[18] Тригонометрическая функция

40,100 и 130°F (4,4; 37,8 и 54,4°C) и частоты нагружения 10 Гц. Можно видеть, что значения модуля дисперсно-армированных смесей выше, чем контрольной смеси. В частности, в условиях высокой температуры потенциал сопротивления колееобразованию в полевых условиях будет выше для дисперсно-армированной смеси по сравнению с контрольной смесью.



На рисунке:

(a)
1. σ_N, Нормальное напряжение (фунт/кв. дюйм)
2. ε, Напряжение при сдвиге (фунт/кв. дюйм)
3. Дисперсно-армированная смесь
4. Контрольная смесь

(b)
1. Время (сек)
2. Напряжение (фунт/кв.дюйм)
3. Дисперсно-армированная смесь σ3 =20 фунтов/кв. дюйм
4. Контрольная смесь σ3=20 фунтов/кв.дюйм

Рис. 45. Сравнение (a) огибающих Мора-Кулона и (b) кривых напряжение-время при уровне ограничения 20 фунтов/кв. дюйм

Таблица 18

Сводка результатов испытаний для определения постоянной деформации при повторной нагрузке

Тип смеси	σ_d (фунт/кв.дюйм)	FN (циклы)	Осевая постоянная деформация ε_p (%) при разрушении
Контрольная	15	436	0,84
	15	241	0,56
	15	166	0,95
	Среднее	281	0,78
	Стандартное отклонение	139	0,20
	Коэффициент вариации	49,6	25,8
Дисперсно-армированная	15	3336	0,47
	15	3466	0,60
	15	5916	0,46
	Среднее	4239	0,51
	Стандартное отклонение	1453	0,08
	Коэффициент вариации	34	15,3

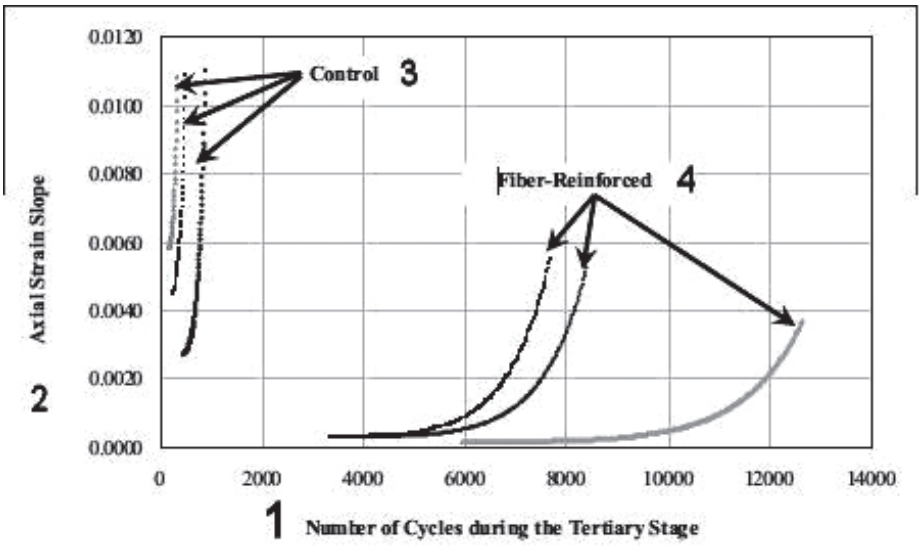
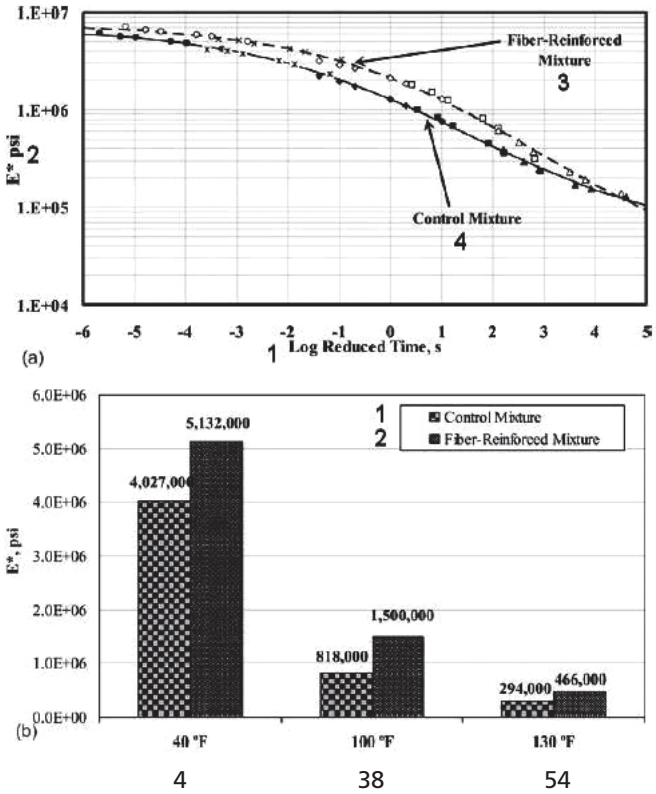


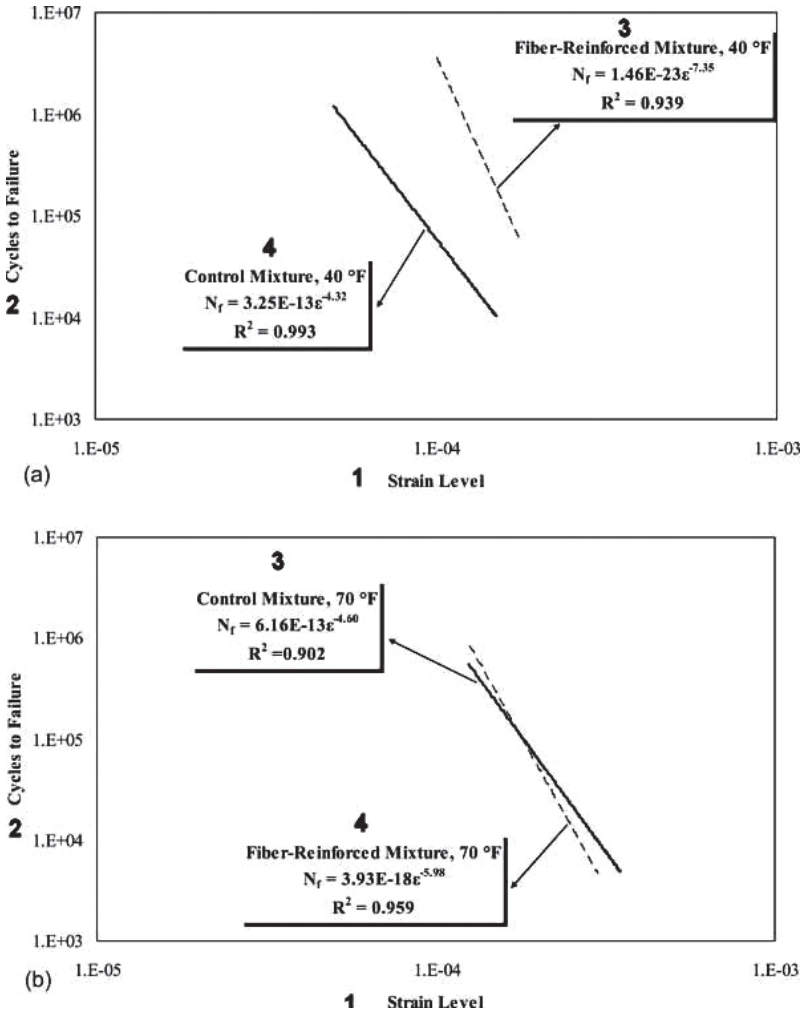
Рис. 46. Угол наклона кривой осевой деформации на третьей стадии для контрольной и дисперсно-армированной смесей: 1 — Число циклов на третьей стадии; 2 — Угол наклона кривой осевой деформации; 3 — Контрольная смесь; 4 — Дисперсно-армированная смесь



На рисунке:
(a)
1 Логарифмическое приведенное время, сек.
2 E*, фунт/кв.дюйм
3 Дисперсно-армированная смесь
4 Контрольная смесь

(b)
1 Контрольная смесь
2 Дисперсно-армированная смесь

Рис. 47. (а) Сводные кривые динамического модуля при отсутствии ограничения; (в) Сравнение измеренных значений динамического модуля при 10 Гц



На рисунке:

(a)
1. Уровень деформации
2. Циклы разрушения
3. Дисперсно-армированная смесь
4. Контрольная смесь

(b)
1. Уровень деформации
2. Циклы разрушения
3. Контрольная смесь
4. Дисперсно-армированная смесь

Рис. 48. Сравнение усталостных зависимостей для обоих типов смесей при (a) 40°F и (b) 70°F

Испытание на усталостное трещинообразование

Усталостное трещинообразование вследствие нагружения является одним из главных типов разрушения, имеющих место в системах нежестких дорожных одежд. Действие повторных транспортных нагрузок, вызывающих напряжения растяжения и сдвига в связных слоях, в конечном счете, приводят к потере конструктивной целостности материала укрепленного слоя. Усталость будет вызывать образование трещин в местах, где имеют место критические деформации и напряжения растяжения. Наиболее распространенной формой модели для прогнозирования числа повторных приложений нагрузок до развития усталостного трещинообразования является нижеприведенная функция деформации растяжения и жесткости смеси (модуля) [13]:

$$N_f = k_1\left(\frac{1}{\varepsilon_1}\right)^{k_2}\left(\frac{1}{E}\right)^{k_3} = k_1\left(\varepsilon_t\right)^{-k2}\left(E\right)^{-k3},$$

где: N_f = число повторных приложений нагрузки до развития усталостного трещинообразования;

ε_t = деформация растяжения в критическом месте;

E = жесткость материала;

k_1, k_2, k_3,= лабораторные калибровочные параметры.

В этом исследовании были приготовлены балочные образцы для испытаний на усталость при изгибе с нагружением четверти пролета. Балочки уплотнялись в лаборатории до требуемой плотности (7% содержание воздушных пор). Они распиливались до требуемых размеров:

ширина 2,5 дюйма (63,5 мм), высота 2,0 дюйма (50,8 мм) и длина 15 дюймов (381 мм). Полный диапазон испытаний использовался для каждой смеси: постоянная деформация, шесть-восемь уровней и один дубликат для каждой температуры испытания. Испытания проводились при трех уровнях температуры: 40, 70, 100°F (4,4; 21 и 38,8°C). Первоначальная жесткость при изгибе измерялась на 50-м цикле нагружения. Срок службы при усталости или разрушение при контролируемой деформации определялось как число циклов, соответствующее 50% уменьшению первоначальной жесткости, как это требуется AASHTO TP8 и SHRP M-009 [14,15].

Были разработаны усталостные зависимости для обоих типов смесей. Были также вычислены уравнения регрессии для каждой температуры ($N_f = k_1 \varepsilon^{k_2}$), наряду с коэффициентом смешанной корреляции (R^2) для каждой зависимости. На рисунках 48 (a) и 48 (b) представлено сравнение усталостных зависимостей для контрольной и дисперсно-армированной асфальтобетонных смесей при 40 и 70°F. Как можно видеть при 40 °F срок службы при усталости (усталостная долговечность) больше для дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси. При 70 °F кривые усталости сравнимы для обеих смесей; контрольная смесь имеет более высокую усталостную долговечность при высоких значениях деформации, тогда как дисперсно-армированная смесь — при более низких значениях деформации. Аналогичная тенденция также наблюдается для усталостной зависимости при 100°F.

Эта тенденция представляет интерес и может быть объяснена следующим образом. Для любого дисперсно-армированного материала преимущество армирования получают, если прочность при растяжении армирующего элемента (в данном случае арамидных волокон) выше, чем армируемого материала (или асфальтобетонной смеси). Это также справедливо при рассмотрении прочности при сдвиге, а также прочности сцепления. Прочность при растяжении арамидных волокон равна 3000 МПа (таблица 17), что выше, чем прочность при растяжении асфальтобетонной смеси. В испытании усталости при изгибе с нагрузкой в четверти пролета напряжение сдвига в средней трети, где имеет место разрушение, равно нулю; следовательно, в этом испытании арамидные волокна не влияют на прочность при сдвиге. При более высоких температурах смесь является мягкой, а прогнозируемая прочность сцепления между асфальтобетонной смесью и арамидными волокнами является низкой по сравнению с прочностью сцепления при более низких температурах, когда смесь более жесткая.

Таблица 19

Сводка коэффициентов регрессии для обобщенного уравнения усталости

Тип смеси	50% первоначальной жесткости, E_o при N=50 циклам			
	k_1	k_2	k_3	R^2
Контрольная	2,3496	2,3601	1,3853	0,914
Дисперсно-армированная	6,48E-22	7,8357	1,0839	0,988

Несмотря на высокую прочность при растяжении арамидных волокон, прочность сцепления при повышенных температурах будет фактором, способствующим получению полных преимуществ присутствия волокон в смеси. Следовательно, предполагается, что усталостная долговечность при более низкой температуре (40°F) будет выше для дисперсно-армированной смеси по сравнению с контрольной смесью. Однако по мере повышения температуры влияние арамидных волокон уменьшается (на сопротивление усталости) и можно ожидать лишь небольшое улучшение.

Был проведен статистический анализ для того, чтобы определить значительно ли отличаются две кривые усталости. Использовался ковариационный анализ [16, 17]. Результаты при 95% уровне доверия показали, что имеется значительное различие между линиями усталости при 40°F, тогда как при 70 и 100°F значительного различия между линиями усталости не имеется.

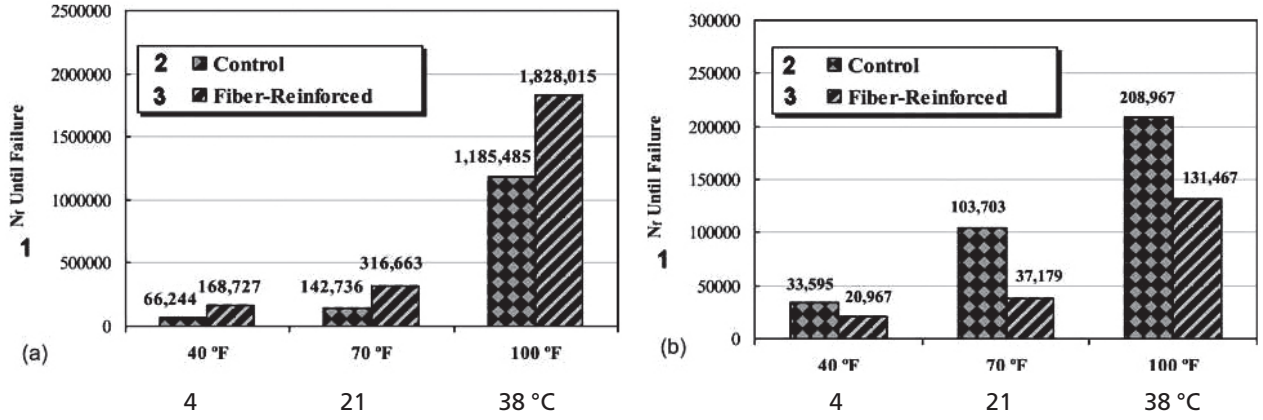
Результаты при 40°F показали, что дисперсно-армированная асфальтобетонная смесь будет иметь более высокое сопротивление усталостному трещинообразованию, чем традиционная смесь.

В таблице 19 представлены коэффициенты k_1, k_2 и k_3 обобщенной модели усталости для обеих смесей (при 50% уменьшении первоначальной прочности). Первоначальная жесткость измерялась при N-50 циклов. Эти обобщенные усталостные зависимости показывают отличные показатели точности для обеих смесей.

Пример сравнения усталостной долговечности обеих смесей вычислялся с применением коэффициентов регрессии k_1, k_2 и k_3 при 40, 70 и 100°F и для двух различных уровней деформации. Результаты приведены на рисунках 49 (a) и 49 (b). При уровне 150 микродеформаций (рисунок 49 (a)) дисперсно-армированная смесь показывает в ~1,5–2,5 раза более высокую усталостную долговечность по сравнению с контрольной смесью при различных температурах испытания, тогда как при уровне 200 микродеформаций (рисунок 49 (в)) контрольная смесь показывает в~1,5–2,5 раза более высокую усталостную долговечность по сравнению с дисперсно-армированной. Этот сдвиг в прогнозируемой усталостной долговечности говорит о том, что поведение дисперсно-армированной смеси будет лучше на тех дорогах, где скорости движения выше. Кроме того, этот тип испытаний усталости при постоянной деформации может быть неудовлетворительным в случае более жесткого материала, такого как дисперсно-армированная смесь.

Испытание температурного трещинообразования

Стандартный метод испытания для определения податливости ползучести и прочности горячих асфальтобетонных смесей (HMA) с помощью прибора косвенного испытания растяжения согласно AASHTO TP9–02 использовался для оценки низкотемпературного трещинообразования контрольной и дисперсно-армированной смесей [18, 19]. На рисунке 50 представлены результаты испытания прочности на растяжение для обеих смесей. Прочность дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси в 1,5 раза выше, чем контрольной смеси. Более высокое температурное трещинообразование можно ожидать для смесей с более низкими значениями прочности при растяжении [4]. В сущности, предполагается, что волокна в смеси играют важную роль в обеспечении сопротивления смеси HMA температурному трещинообразованию.



На рисунке: 1. Число циклов до разрушения; 2. Контрольная; 3. Дисперсно-армированная

Рис. 49. Число циклов до разрушения, прогнозируемое для обеих смесей при всех температурах испытания: (a) 150 микродеформаций и (b) 200 микродеформаций

Рассмотрение суммарной энергии разрушения — это другое полезное сравнение на основе этого испытания. Эти результаты приведены на рисунке 51. Энергия разрушения возрастала для обеих смесей с повышением температуры. При всех температурах испытания дисперсно-армированная смесь имела постоянно более высокую энергию разрушения, чем контрольная

смесь. Вообще, более низкое температурное трещинообразование следует ожидать по мере того, как возрастает энергия разрушения [4].

Испытание для определения распространения трещин — C линейного интеграла*

Механика разрушения обеспечивает основополагающие принципы, которые определяют возникновение и распространение трещин в материалах. Острые внутренние или поверхностные надрезы, которые существуют в различных материалах усиливают распределение местных напряжений. Если энергия, накопленная вблизи надреза, равна энергии, необходимой для образования новых поверхностей, то может произойти развитие трещины. Материал вблизи трещины ослабляется, энергия деформации расходуется как поверхностная энергия и трещина возрастает на бесконечно малую величину. Если скорость освобождения энергии деформации равна сопротивлению развитию трещины (вязкости разрушения), то рост этой трещины происходит в условиях устойчивого состояния и разрушение неизбежно [20].

Концепция механики разрушения была введена в асфальтобетон Majidzaden [21]. Abdulshafi применил энергетический подход (C*-линейный интеграл для прогнозирования усталостной долговечности покрытий с использованием возникновения трещин, распространения трещин и разрушения [22]. В последующих исследованиях использовались дисковые образцы с надрезом для применения концепции J-интеграла к разрушению и усталости асфальтобетонных покрытий [23, 24].

*Параметры C**

Определение зависимости между J-интегралом и параметрами C* — это метод её экспериментального измерения. J — это скорость энергии а C* — это скорость энергии или интеграл мощности. Интерпретация скорости энергии J обсуждалась в работах [24, 25] (Ricl and Begleu and Landes). J можно интерпретировать как энергетическую разность между двумя одинаково нагруженными телами, имеющими длины трещин, различающиеся приращениями (инкрементно)

$$J = \frac{dU}{da},$$

где: U = потенциальная энергия;

a = длина трещин;

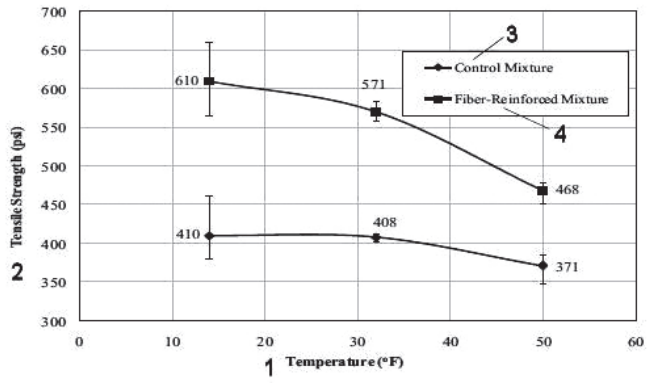
C* может быть вычислено аналогичным образом с использованием интерпретации скорости (нормы) мощности.

При использовании этого подхода C* является разностью мощностей между двумя одинаково нагруженными телами, имеющими длины трещин, различающиеся приращениями (инкрементно).

$$C^* = \frac{dU^*}{da},$$

где: U^* = скорость мощности или энергии, определяемая для нагрузки p и перемещения u по уравнению

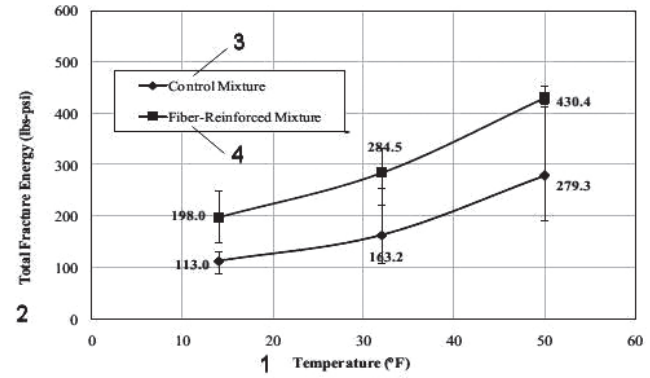
$$U^* = \int_0^u \mathrm{pdu}$$



На рисунке:

1. Температура (°F)
2. Прочность при растяжении (фунты/кв. дюйм)
3. Контрольная смесь
4. Дисперсно-армированная смесь

Рис. 50. Сравнение результатов прочности при растяжении



На рисунке:

1. Температура (°F)
2. Суммарная энергия разрушения (фунты-фунты/кв. дюйм)
3. Контрольная смесь
4. Дисперсно-армированная смесь

Рис. 51. Сравнение результатов суммарной энергии

*Метод определения C**

Дисковые образцы были приготовлены из гирационных проб (plugs) способом, аналогичным процессу приготовления образцов IDT. В каждом дисковом образце вырезался прямоугольный клин для принятия нагрузочного устройства, как показано на рисунке 52. Испытания проводились при 70°F (21°C). Для каждого испытываемого образца измерялась нагрузка, прилагаемая с постоянной скоростью перемещения, и изменение длины трещины во времени. Скорость перемещения составляла 0,005; 0,01; 0,015; 0,02 и 0,025 дюймов/мин. как для контрольной, так и для дисперсно-армированной смесей. Эти данные использовались для определения нагрузки как функции скорости перемещения для различных длин трещин. Мощность вводимой скорости энергии, U*, измерялась как площадь под кривой скорости перемещения нагрузки. Скорость энергии, U*, затем была представлена в виде графика зависимости от длины трещин для различных скоростей перемещения, а углы наклона этих кривых представляли C*-интеграл. C*-интеграл был представлен графически как функция скорости перемещения. И, наконец, данные C*-интеграла были представлены графически как функция скорости роста трещин, как показано на рисунке 53. Из этого рисунка можно видеть, что дисперсно-армированная смесь имеет более высокие значения C*-интеграла и угла наклона кривой по сравнению с контрольной смесью. Это показывает, что дисперсно-армированная смесь имеет значительно более высокое сопротивление распространению трещин. Уникальное наблюдение за образцами дисперсно-армированной смеси после испытания состояло в том, что эти образцы никогда не раскалываются; их было трудно расколоть вручную, тогда как образцы контрольной смеси раскалывались в конце испытания.

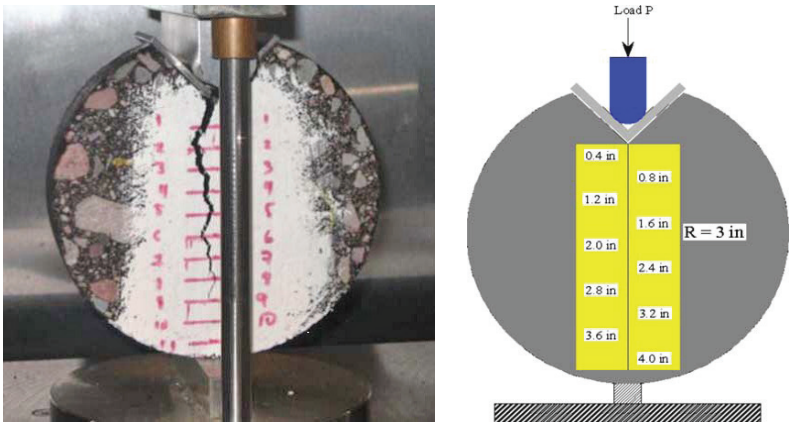


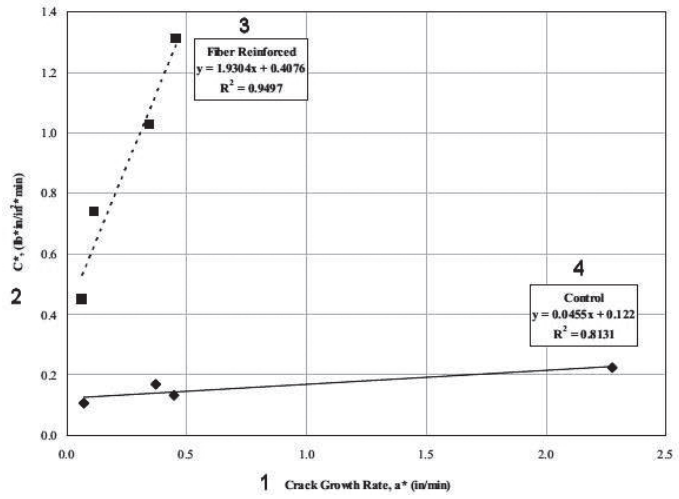
*Рис. 52. Типичная компоновка испытания C**

Проектирование и рассмотрение толщины покрытия

Результаты предыдущих лабораторных испытаний использовались в качестве входных данных компьютерной программы MEPDG [3]. Это было сделано для прогнозирования эксплуатационных показателей в соответствии с MEPDG и для оценки воздействия на различную толщину покрытий. Было выполнено по десять прогонов для каждой контрольной и дисперсно-армированной смеси при следующих условиях:

- Два уровня движения; годовая среднесуточная интенсивность движения (AADT) 1500 и 1700, которая представляет средний и высокий уровни движения.
- Пять толщин асфальтобетонного слоя, 2–6 дюймов (50–150 мм), уложенного на основание постоянной толщины, равной 8 дюймам (200 мм).
- Климатические условия: Финикс, Аризона, США.
- Расчетный срок службы 10 лет.

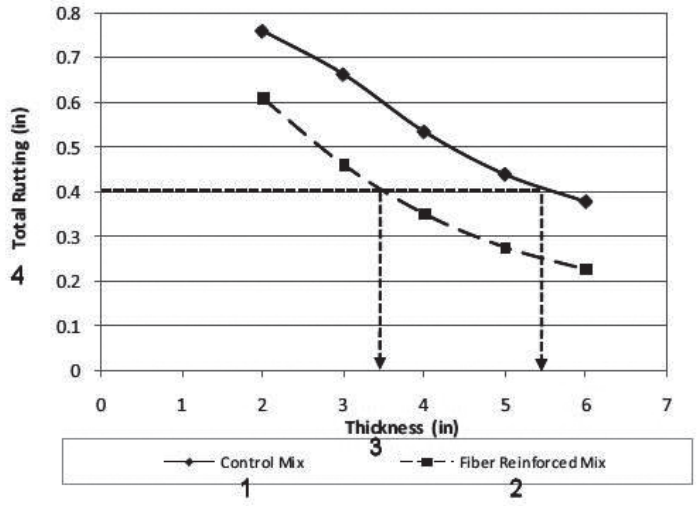
Разрушениями, оцениваемыми в виде выходных данных, были колееобразование и усталостное трещинообразование. Тренды зависимостей разрушение-толщина были весьма аналогичны, но с различными амплитудами. На рисунке 54 представлена зависимость между суммарным колееобразованием и толщиной для обеих смесей при 7000 AADT (~50 миллионов ESAL (приложений эквивалентной нагрузки на одиночную ось)). Можно видеть, что для того, чтобы критерий колееобразования на превышал 0,4 дюйма в течение расчетного периода 10 лет, требуемая толщина покрытия из контрольной асфальтобетонной смеси равна 5,5 дюйма, тогда как требуемая толщина из дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси составляет 3,5 дюйма — экономия 2 дюйма на общей толщине асфальтобетонного слоя. Эта экономия составляла 1,5 дюйма для более низкого уровня движения 1500 AADT. На рисунке 55 показано усталостное трещинообразование, прогнозируемое с помощью MEPDG. Результаты показывают аналогичные тренды в том отношении, что более низкое усталостное трещинообразование прогнозируется для дисперсно-армированной смеси. Однако результаты также зависят от толщины асфальтобетонного слоя. С увеличением толщины асфальтобетонного слоя выше 2 дюймов усталостное трещинообразование возрастает до максимальной толщины 3–4 дюйма. Усталостное трещинообразование уменьшается при толщине выше 4 дюймов вследствие более низких деформаций растяжения, ожидаемых в подошве асфальтобетонного слоя. График находится в соответствии с наблюдениями в руководстве MEPDG, в котором указывается, что в случае систем дорожных одежд с очень тонкими асфальтобетонными слоями усталостное трещинообразование может не вызывать озабоченности вследствие сжимающего характера деформаций в асфальтобетонном слое [3].



На рисунке:

1. Скорость роста трещин, a* (дюйм/мин)
2. C* (фут*дюйм/кв.дюйм*мин)
3. Дисперсно-армированная
4. Контрольная

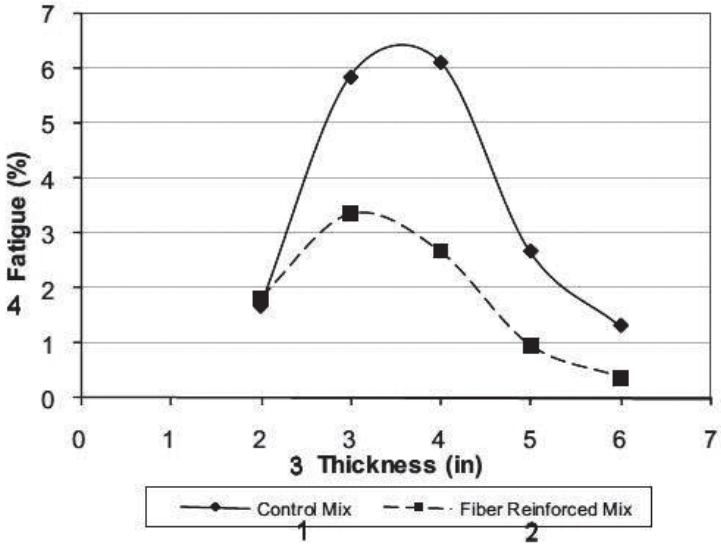
Рис. 53. Зависимость между C линейным интегралом и скоростью роста трещин*



На рисунке:

1. Контрольная смесь
2. Дисперсно-армированная смесь
3. Толщина (дюймы)
4. Суммарное колееобразование (дюйм)

Рис. 54. Оценка колееобразования покрытия с помощью MEPDG



На рисунке:

1. Контрольная смесь
2. Дисперсно-армированная смесь
3. Толщина (дюймы)
4. Усталость (%)

Рис. 55. Оценка усталостного трещинообразования покрытия с помощью MEPDG

Выводы

Результаты лабораторных испытаний в этом исследовании показали, что применение смеси полипропиленовых и арамидных волокон в асфальтобетонной смеси улучшает эксплуатационные показатели смеси несколькими уникальными путями, кратко изложенными ниже.

— Дисперсно-армированная смесь показала более высокое сопротивление деформации сдвига, что можно видеть по результатам трехосного испытания прочности при сдвиге. Следует отметить, что пост-пиковое разрушение в случае дисперсно-армированной смеси имело более высокую остаточную энергию и постепенное понижение прочности, эффект, который был отнесен за счет влияния волокон в смеси.

— Испытания постоянной деформации для дисперсно-армированной смеси показали более низкое накопление постоянной деформации по сравнению с контрольной смесью. Результаты FN (число текучести), или начала третьей стадии, были в 5 раз выше, чем для контрольной смеси. В этих испытаниях для дисперсно-армированной смеси наблюдались две характеристики: более длительный период усталостной прочности на второй ступени кривой постоянной деформации и постепенное (меньшее) накопление постоянной деформации за пределами третичного потока. Обе эти характеристики были отнесены за счет присутствия и мобилизации волокон, распределенных в смеси.

— Измеренные значения динамического модуля E* были выше для дисперсно-армированной смеси. Различие между двумя смесями было меньше при наиболее низкой температуре (20% увеличение) вследствие доминирующего влияния вяжущего и меньшего влияния волокон. Наибольшее различие наблюдалось при 38°C (на 80% выше), где согласно наблюдениям армирующий эффект волокон был наиболее высоким. При 54°C возрастание модуля было также значительным, приблизительно 50%.

— Испытание усталостного трещинообразования характеризовалось тем, что в отличие от других испытаний, уровень деформации держался постоянным. Результаты при 4°C показывают, что дисперсно-армированная смесь будет иметь более высокое сопротивление усталостному трещинообразованию, чем традиционная смесь. При 21°C усталостная долговечность была выше для контрольной смеси при высоких значениях деформации, тогда как дисперсно-армированная смесь имела более высокую усталостную долговечность при более низких значениях деформации. Сдвиг в прогнозируемой усталостной долговечности говорит о том, что поведение дисперсно-армированной смеси будет лучше на дорогах с более высокими скоростями движения. Эти результаты были подтверждены прогоном компьютерной программы MEPDG, как показано на рисунке 55.

— Прочность при растяжении и энергия разрушения, измеренные с помощью косвенного испытания по диаметру (IDT), показали, что при всех температурах испытания дисперсно-армированная смесь имела наиболее высокие значения, увеличение на 25–50% для прочности на растяжение и 50–75% для энергии разрушения. Прогнозируется более низкое температурное трещинообразование по мере возрастания прочности при растяжении и энергии разрушения.

— Зависимости между скоростью развития трещин и значениями C* линейного интеграла показала, что дисперсно-армированная смесь обладает приблизительно в 40 раз более высоким сопротивлением распространению трещин, чем контрольная смесь.

— Результаты лабораторных испытаний, выполненных современными методами, были использованы как входные данные в MEPDG.

Прогоны MEPDG продемонстрировали, что улучшение свойств и эксплуатационных показателей смеси обеспечивает экономию на толщине асфальтобетонных слоев. Применение дисперсно-армированной смеси приводило к уменьшению колееобразования и усталостного трещинообразования. Что касается критериев разрушения в отношении колееобразования, то при применении дисперсно-армированной асфальтобетонной смеси может быть достигнуто

30–40% уменьшение толщины асфальтобетонного слоя. Это значение будет несколько варьироваться в зависимости от интенсивности движения, используемой при анализе. Анализ также подтвердил, что усталостное трещинообразование, вероятно, не будет проблемой при использовании конструкции с тонкими асфальтобетонными слоями. Однако можно видеть, что наибольший потенциал уменьшения усталостного трещинообразования имеют асфальтобетонные слои покрытия толщиной 3–5 дюйма (7,6–12,7 см).

Как и предполагалось, вследствие минимальной подготовки покрытия при укладке асфальтобетонного слоя усиления некоторое количество трещин присутствовало на обоих опытных участках покрытия. Полевое обследование состояния покрытия (включая два летних периода) показало, что контрольный опытный участок имел в три раза большее количество трещин малой интенсивности (глубины) по сравнению с опытными участками из дисперсно-армированной смеси.

Литература

1. Bueno, B. S., Silva, W. R., Lima, D. C., and Minete, E., "Engineering Properties of Fiber Reinforced Cold Asphalt Mixes. Technical Note," *J. Environ. Eng.*, Vol. 129, No. 10, 2003, pp. 952–955.

2. Lee, S. J., Rust, J. P., Hamouda, H., Kim, Y. R., and Borden, R. H., "Fatigue Cracking Resistance of Fiber-Reinforced Asphalt Concrete," *Text. Res. J.*, Vol. 75, No. 2, 2005, pp. 123–128.

3. NCHRP, "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures," *Final Report, Report No.* 1–37A, National Research Council, Washington, D. C., March 2004.

4. Witczak, M. W., Kaloush, K. E., Pellinen, T., El-Basyouny, M., and Von Quintus, H., "Simple Performance Test for Superpave Mix Design," *NCHRP Report No.* 465, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., 2002.

5. Fitzgerald, R. L., 2000, "Novel Applications of Carbon Fiber for Hot Mix Asphalt Reinforcement and Carbon-Carbon Preforms," M. S. thesis, Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI.

6. Cleven, M. A., 2000, "Investigation of the Properties of Carbon Fiber Modified Asphalt Mixtures," M. S. thesis, Department of Chemical Engineering, Michigan Technological University, Houghton, MI.

7. Jahromi, S. G. and Khodai, A., "Carbon Fiber Reinforced Asphalt Concrete," *Arabian J. Sci. Eng.*, Vol. 33, No. 2B, 2008, pp. 355–364.

8. Mahrez, A., Karim, M. R., and Katman, H. A., "Prospect of Using Glass Fiber Reinforced Bituminous Mixes," *Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS, Bangkok),* Vol. 5, 2003, pp. 784–807.

9. Mahrez, A. and Karim, M. R., "Rutting Characteristics of Bituminous Mixes Reinforced with Glass Fiber," *Eastern Asia Society for Transportation Studies (EASTS, Bangkok),* Vol. 6, 2007, pp. 2168–2172.

10. Putman, B. J. and Amirkhanian, S. N., "Utilization of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures," *Resour. Conserv.Recycl.*, Vol. 42, No. 3, 2004, pp. 265–274.

11. Chowdhury, A., Button, J. W., and Bhasin, A., "Fibers from Recycled Tire as Reinforcement in Hot Mix Asphalt," *Report No.* SWUTC/06/167453–1, Texas Transportation Institute, TexasA&M University System, April 2006.

12. Shaopeng, W., Qunshan, Y., Ning, L., and Hongbo, Y., "Effects of Fibers on the Dynamic Properties of Asphalt Mixtures," *Journal of Wuhan University of Technology — Materials Science Edition*, Vol. 22, 2007, pp. 733–736.

13. AASHTO 2006, "Standard Method T321–03: Determining the Fatigue Life of Compacted Hot-Mix Asphalt (HMA) Subjected to Repeated Flexural Bending," American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.

14. SHRP Designation M-009, 1994, “Standard Method of Test for Determining the Fatigue Life of Compacted Bituminous Mixtures Subjected to Repeated Flexural Bending,” National Research Council, Washington, DC.

15. SHRP-A-404, 1994, “Fatigue Response of Asphalt-Aggregate Mixes,” Asphalt Research Program, Institute of Transportation Studies, University of California, Berkeley. Strategic Highway Research Program, National Research Council, Washington, D. C.

16. Neter, J. andWasserman, W., *Applied Linear Statistical Models, Regression, Analysis of Variance, and Experimental Design*, R. D. Irwin, Homewood, IL, 1974.

17. Motulsky, H. and Christopoulos, A., *Fitting Models to Biological Data Using Linear and Nonlinear Regression, A Practical Guide to Curve Fitting*, GraphPad Software, Inc., San Diego, CA, 2003.

18. Witczak, M. W., “Harmonized Test Methods for Laboratory Determination of Resilient Modulus for Flexible Pavement Design, Volume II — Asphalt Concrete Material,” *Final Project Report, Project No.* 1–28A, NCHRP, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D. C., May 2003.

19. AASHTO TP9–02 (Draft Test Protocol), 2002, “Standard Test Method for Determining the Creep Compliance and Strength of Hot Mix Asphalt (HMA) Using the Indirect Tensile Test Device,” American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C.

20. Mamlouk, M. S. and Mobasher, B., “Cracking Resistance of Asphalt Rubber Mix Versus Hot-Mix Asphalt,” *Road Mater. Pavement Des.*, Vol. 5, No. 4, 2004, pp. 435–452.

21. Majidzadeh, K., “Application of Fracture Mechanics for Improved Design of Bituminous Concrete,” *Report No.* FHWARD-76–91, Federal Highway Administration, Washington, D. C., 1976, Vol. 1 and 2.

22. Abdulshafi, O., 1983, “Rational Material Characterization of Asphaltic Concrete Pavements,” Ph. D. Dissertation, Ohio State University, Columbus, OH.

23. Abdulshafi, A. and Kaloush, K. E., “Modifiers for Asphalt Concrete,” *Report No.* ESL-TR-88–29, Air Force Engineering and Services Center, Tyndall Air Force Base, Florida, 1988.

24. Rice, J. R., “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks,” *J. Appl. Mech.*, Vol. 35, 1968, pp. 379–386.

25. Begley, J. W. and Landes, J. D., “Fracture Toughness,” *Proceedings of the 1971 National Symposium on Fracture Mechanics. Part II, ASTM STP 514*, 1972, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 1–20.

7.4. Опыт Новой Зеландии. Оценка эксплуатационных характеристик теплого асфальтобетона с высоким содержанием асфальтобетонного гранулята

Применение теплой асфальтобетонной смеси (ТАС) (англ. Warm mix asphalt, WMA) в области дорожного хозяйства постепенно расширяется, поскольку по сравнению с горячей асфальтобетонной смесью (ГАС) (англ. hot mix asphalt HMA) имеет ряд преимуществ: низкое потребление энергии, более низкая эмиссия вредных веществ и возможность использования большего количества асфальтобетонного гранулята, АГ (англ. reclaimed asphalt pavement, RAP) в составе смесей. Введение АГ в состав ТАС может способствовать получению преимуществ с точки зрения устойчивости и повышения эксплуатационных характеристик ТАС. В рамках представленного исследования оценивались эксплуатационные характеристики ТАС, с добавкой АГ в различном количестве, от 0 до 70% по массе ТАС. Эксплуатационные характеристики асфальтобетона сравнивались с эталонной (контрольной) ГАС. В качестве вяжущего исполь-

зовался битум одной марки с пенетрацией 80/100 и два типа добавок: химическая теплая добавка и омолаживающая добавка, а именно, Evotherm и Sylvaroad TM RP1000, соответственно. Были выполнены испытания по определению вязкости битума и механических свойств смесей, таких как влагостойкость, усталостное растрескивание и устойчивость к колееобразованию. В ходе данного исследования проводилось испытание прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца с целью возможности его применения при испытаниях образцов асфальтобетонного покрытия.

Результаты лабораторных испытаний показали, что эти две добавки способствовали уменьшению вязкости битума[19]. С точки зрения влагостойкости, характеристики смесей с химической добавкой (Evotherm) более высокие по сравнению с другими смесями. Что касается усталостного растрескивания, то только смесь ТАС с добавкой Sylvaroad оказалась более устойчивой, чем контрольная смесь ГАС при увеличении количества циклов нагружения. В отношении устойчивости к колееобразованию, увеличение содержания АГ значительно способствует повышению эксплуатационных характеристик смесей ТАС. Смеси ТАС без АГ выдерживали меньшее количество циклов, достигая максимальной глубины колеи, по сравнению с ГАС. Все смеси ТАС с АГ показали значительно более высокую устойчивость к колееобразованию, чем ГАС. Изучение испытания прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца показало, что для образцов диаметром 100 мм подходит глубина надреза от 5 до 15 мм. Величины косвенных пределов прочности, определяемые в ходе испытания прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца, и величины, определяемые по методу на косвенное растяжение, являются сопоставимыми.

Технологии теплых асфальтобетонных смесей (ТАС) разрабатывались с конца 1990-х (Янг и др., 2012) [1] и постепенно получили распространение в области дорожного хозяйства. Материалы ТАС *обычно производятся при температурах в пределах 110 °С и 142 °С,* что относительно ниже, чем температуры смешивания традиционных ГАС, обычно в пределах от 140 °С к 180 °С (Д'Анджело и др., 2008).

При более низких температурах смешивания ТАС выбросы вредных веществ значительно сокращаются по сравнению с традиционными ГАС, что наносит меньший вред окружающей среде. Кроме того, ТАС обеспечивает уплотнение при более низких температурах, *хотя при этом гарантируется удобоукладываемость смесей*, что расширяет границы как время перевозки, так и строительного сезона, что особенно важно для стран с холодным климатом. Для уплотнения ТАС при более низких температурах требуется меньше времени для охлаждения, что сокращает период времени до укладки следующего слоя или период до открытия движения на дороге (Zaumanis, 2010) [2]. ТАС также позволяет экономить энергозатраты вследствие более низких температур смешивания.

Ежегодно во всем мире миллионы тонн асфальтобетонных покрытий. Только в одной Европе ежегодно фрезеруется более чем 50 млн тонн старого асфальтобетона (Динис-Альмейда и др., 2012) [3]. Переработка старых асфальтобетонных покрытий может дать многочисленные преимущества, такие как сокращение использования новых материалов, освобождение пространства на полигонах для складирования материалов старых асфальтобетонных покрытий и снижения затрат на продукт. В последние годы введение *повторно используемых материалов асфальтобетонных покрытий* (англ. reclaimed asphalt pavement, RAP) в ТАС стало важной темой для исследователей и практиков, так как RAP — асфальтобетонный гранулят (АГ) может способствовать повышению устойчивости эксплуатационных характеристик ТАС по сравнению с ГАС.

[19] Lu Xuan. EVALUATION OF WARM MIX ASPHALT PERFORMANCE INCORPORATING HIGH RECLAIMED ASPHALT PAVEMENT: Thesis for the Degree of Master of Engineering in Transportation [University of Canterbury]. — Canterbury. — 2016. — 152 P.

Хотя использование ТАС и АГ является многообещающим и экономически эффективным, *применение ТАС с высоким содержанием АГ в качестве структурного асфальтобетонного слоя в верхних слоях конструкции дорожной одежды, которая подвергается высоким напряжениям, достаточно ограничено во всем мире* и, в особенности, в Новой Зеландии и Австралии. Поэтому проведение данного исследования было целесообразно для изучения использования высокого содержания АГ в теплых асфальтобетонных смесях. Цели представленного исследования следующие:

— изучение эффективности применения теплых добавок в ТАС;
— изучение эффективности применения АГ в ТАС, путем оценки физико-механических характеристик ТАС и смесей ТАС-АГ при сравнении с контрольной смесью ГАС;
— исследование способов позволяющих увеличить содержание АГ в ТАС;
— исследование способов позволяющих улучшить эксплуатационные характеристики ТАС и смесей ТАС-АГ;
— изучение возможности применения метода испытаний на полукруглый изгиб (SCB) на образцах диаметром 100 мм, используя состав смеси АС10;
— изучение влияния глубины разреза на механические свойства материалов по результатам испытаний SCB.

Влагостойкость

В течение срока службы асфальтобетонное покрытие подвергается воздействию воды (влаги) в окружающей среде. Со временем вода, проникая в асфальтобетон, вызывает нарушение когезии между вяжущим и минеральными наполнителями. Такие процессы обуславливают ухудшение эксплуатационных свойств асфальтобетона, известных как чувствительность к влаге или разрушение от воздействия влаги. Непрерывное разрушение и отслоение частиц асфальтобетона могут привести к шелушению и образованию выбоин, как показано в рисунке 56.

Рис. 56. Повреждение асфальтобетонного покрытия от воздействия воды (влаги)

Добавление повторно используемого материала асфальтобетонного покрытия (асфальтобетонного гранулята, АГ) в смеси ТАС может вызывать ряд вопросов, связанных с влагостойкостью. Например, АГ может не быть абсолютно сухим, или вяжущее в АГ может недостаточно эффективно работать, приводя только к частичному обволакиванию минерального заполнителя (Чжао и др., 2015) [4]. Некоторые ученые исследовали влагостойкость ТАС при применении АГ и пришли к заключению, что при добавлении АГ в большом количестве обеспечивается влагостойкость смесей на приемлемом уровне (Динис-Альмейда и др., 2012; Холм и др., 2013; Роджерс, 2011; Шу и др., 2012) [3, 5, 6]. Однако другие исследователи пришли к противополож-

ному выводу и высказывали опасения относительно чувствительности к влаге ТАС с высоким содержанием АГ (Го и др., 2014; Nejad и др., 2014; Mallick, 2008) [7, 8, 9].

Чувствительность к влаге обычно определяется отношением пределов прочности асфальтобетона при испытании образцов в сухом и влажном состоянии. Испытание по определению прочности при косвенном растяжении является достаточно простым и обычно используется в лабораторных испытаниях (рисунок 57). Испытание может быть выполнено на образцах диаметром 100 ± 2 мм с толщиной 65 ± 1 мм или на образцах диаметром 150 ± 2 мм с толщиной 85 ± 1 мм (AG: PT/T232, 2007).

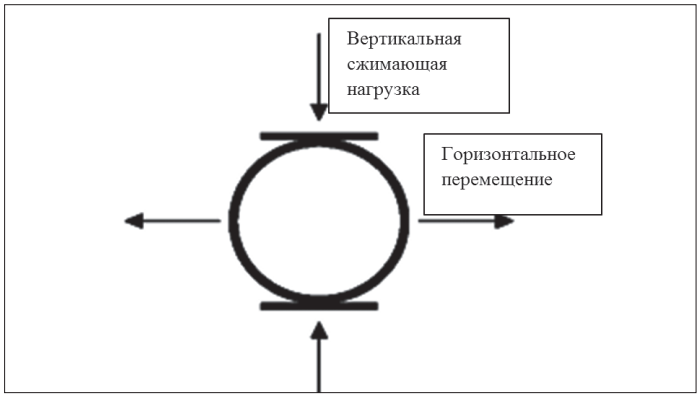


Рис. 57. Испытание по определению прочности при косвенном растяжении

Усталостная прочность

Усталостное растрескивание является одним из основных повреждений асфальтобетонных покрытий. *Усталостное растрескивание обычно происходит при резкой смене температур, вследствие воздействия повторяющихся транспортных нагрузок, вызывающих растягивающие напряжения и деформации в асфальтобетонных покрытиях.* Под воздействием циклических (повторных) напряжений образовываются микротрещины. После ряда воздействий транспортных нагрузок микротрещины развиваются и распространяются в покрытии. Обычно, начало образования трещин происходит в основании асфальтобетонных слоев, а затем они распространяются вверх, отражаясь на поверхности покрытия (рис. 58). Нисходящие усталостные трещины носят также распространенный характер в тонких слоях асфальтобетонных покрытий из-за высокого давления воздуха в шине транспортных средств (ТС).

Существует множество лабораторных методов испытаний для оценки усталостной прочности асфальтобетона, такие как испытание прочности на растяжение при изгибе, испытание на прочность при усталости в цикле «растяжение-сжатие», и испытание прочности при косвенном растяжении. Из упомянутых испытаний испытание прочности на растяжение при изгибе является наиболее широко распространенным.

Рис. 58. Усталостное растрескивание дорожного покрытия

Устойчивость к колееобразованию

Колееобразование или постоянная деформация — является одним из основных повреждений нежестких асфальтобетонных покрытий и происходит, прежде всего, при высоких температурах под воздействием транспортных нагрузок. Колееобразование представляет собой ухудшение состояния по полосе наката дорожного покрытия. При воздействии каждой единицы транспортной нагрузки, возникает незначительная постоянная деформация в дорожном покрытии. Незначительные по глубине микроколеи трансформируются в колею большей глубины, что вызывает такое повреждение асфальтобетонного покрытия, как колейность.

Был проведен большой объем лабораторных исследований, показывающих, что ТАС обычно характеризуются меньшей устойчивостью к колееобразованию, чем ГАС (Мо и др., 2012; Чжао и др., 2012) [10, 11]. Было проведено сравнительное обследование опытных участков с применением ТАС и ГАС, ходе которого было установлено, что после двух лет эксплуатации, устойчивость к колееобразованию ТАС аналогична ГАС (Чжан, 2010) [12]. Однако двухлетний период слишком короткий по сравнению с общим сроком службы асфальтобетонного покрытия, чтобы прийти к заключению, что ТАС аналогичны ГАС в отношении устойчивости колееобразования.

Был проведен целый ряд исследований, результаты которых показали, что включение АГ в ТАС способствует улучшению устойчивости смесей к колееобразованию, и что чем больше содержание АГ в ТАС, тем выше их устойчивость к колееобразованию, что обусловлено высокой жесткостью старого вяжущего, содержащегося в АГ (Холм и др., 2013; Ли и др., 2009; Малик и др., 2008; Нейяд и др., 2014; Роджерс, 2011; Шу и др., 2012; Чжао и др., 2013) [5, 8, 9, 14, 15, 16].

Таким образом, устойчивость смесей ТАС-АГ к колееобразованию является предметом дальнейших исследований. В лабораторных условиях, колейность асфальтобетона может оцениваться в ходе испытаний по определению динамического модуля упругости, динамической ползучести или в результате воздействия колёсной нагрузкой.

Испытание по определению динамического модуля упругости

Испытание по определению динамического (комплексного) модуля упругости выполняется путем приложения циклической одноосной, синусоидальной нагрузки при различных частотах и температурах с измерением восстанавливаемых напряжения и деформаций, возникающих в асфальтобетонных образцах. Данный тип испытаний может использоваться для оценки вязкоупругих свойств образцов материала, путем измерения угла фазы, определяемого как отставание (сдвиг фаз) между пиковым напряжением и пиковой деформацией (рис. 59). Данный вид испытания позволяет оценить устойчивость к постоянной деформации эксплуатируемых дорожных покрытий.

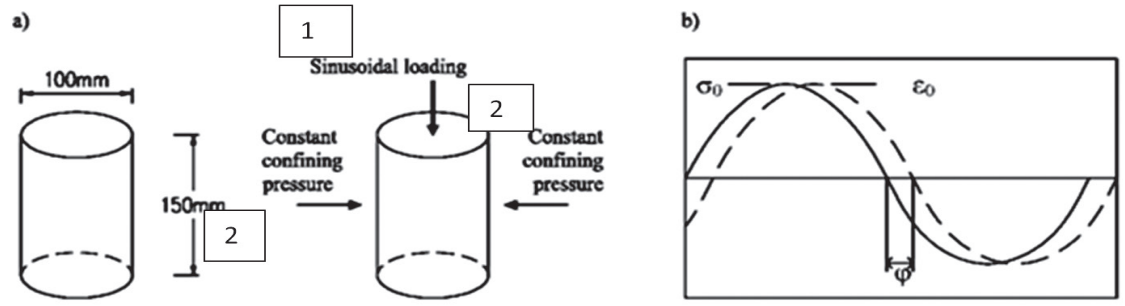


Рис. 59 (a) образец и (b) параметры, устанавливаемые в ходе испытания по определению динамического (комплексного) модуля: 1 — синусоидальное нагружение; 2 — постоянное всестороннее давление

Испытание по определению динамической ползучести

Испытание по определению динамической ползучести является несложным испытанием для изучения устойчивости к колееобразованию асфальтобетонных смесей. Существует два режима испытания: при ограничивающем и неограничивающем давлении. Образцы имеет те же размеры, что и образцы, которые используются для испытания при определении динамического модуля упругости. Могут использоваться опытные образцы, прошедшие испытания по определению динамического модуля. Тем не менее, следует тщательно выявлять любые признаки повреждения, поскольку минимальное повреждение может повлиять на результат испытания.

В процессе испытания образец подвергается циклическому воздействию осевой сжимающей нагрузки с импульсом *с*, форма которого описывается функцией вида 1-cos / 2 (0,1 с каждую 1 с). Для режима при ограничивающем давлении в ходе испытаний создается постоянное ограничивающее давление. Для режима при неограничивающем давлении прикладывается только осевая сжимающая нагрузка. Для последующего анализа регистрируются постоянные осевые деформации и количество циклов нагружения, как показано на рис. 60.

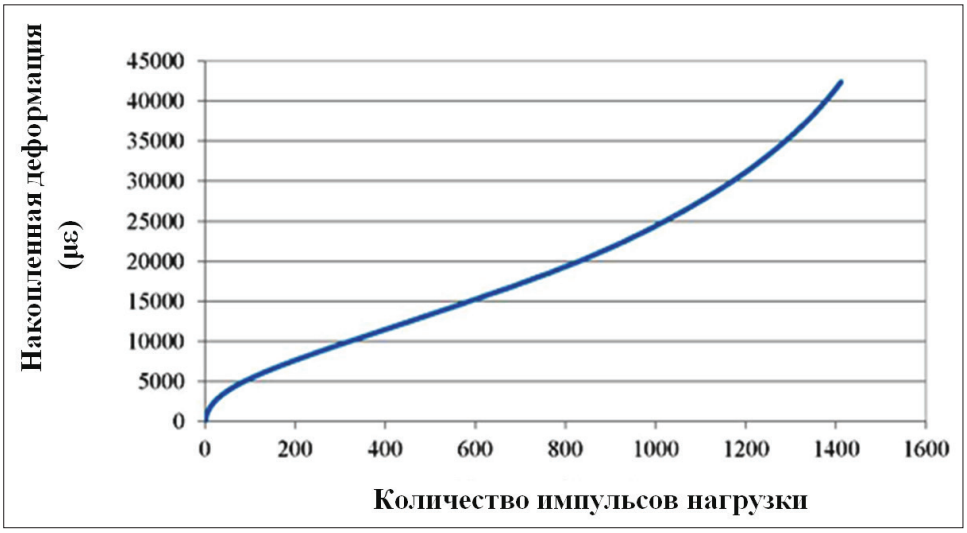


Рис. 60. Типичный результат испытания по определению динамической ползучести

Испытание колёсной нагрузкой

Существует несколько типов оборудования для испытания колёсной нагрузкой (рисунок 61), такие как:

— «Гамбургское колесо» (англ. Hamburg Track Tracking Device, HWTD);
— анализатор асфальтобетонного покрытия (Asphalt Pavement Analyzer, APA);
— французское устройство для испытания на колееобразование (French Wheel Tracker) и др.

Процедура таких испытаний заключается в моделировании влияния интенсивности движения на дорожное покрытие в процессе эксплуатации. При приготовлении образца его помещают в испытательное устройство и выдерживают при заданной температуре до испытания (термостатируют). На этапе испытания нагруженное колесо перемещается вперед — назад по подготовленному образцу. На протяжении всего испытания регистрируется количество циклов нагружения и глубина колеи. Полученные значения могут быть отображены в графическом виде для оценки устойчивости к колееобразованию асфальтобетонных смесей.

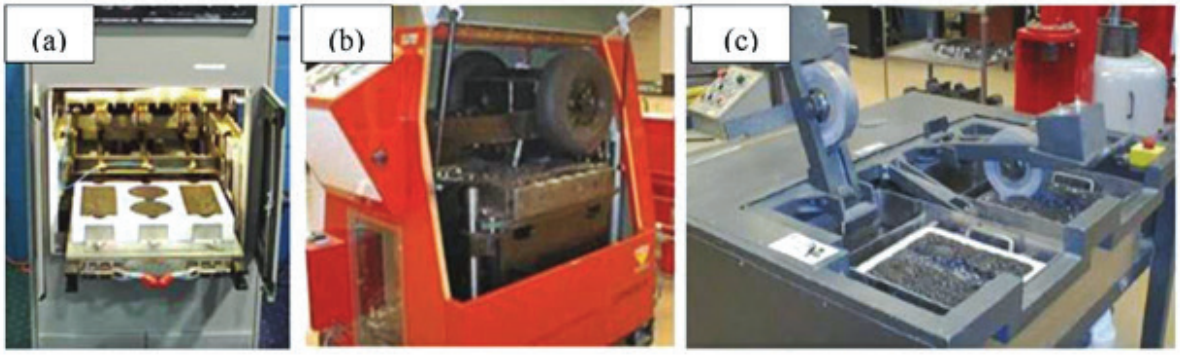


Рис. 61. (a) анализатор асфальтобетонного покрытия; (b) французское устройство для испытания на колееобразование (Pavementinteractive, 2011); (c) «Гамбургское колесо» (Stuart and Youtcheff, 2001)

Испытание по методу SCB на полукруглый изгиб (semi-circular bending)

Как обсуждалось ранее, усталостное трещинообразование в основном вызвано повторяющимися растягивающими напряжениями и деформациями, связанными с интенсивностью движения (Artamendi and Khalid, 2006; Huang et al., 2013) [17], или с изменением температуры в дорожном покрытии, вызывающим образование температурных напряжений и являющимся причиной трещинообразования (Artamendi and Khalid, 2006; Li and Marasteanu, 2010) [17, 18]. Разрушение в результате трещинообразования происходит в два этапа:

1 — возникновение трещин;

2 — распространение трещин (Huang et al., 2013) [19].

Поскольку разрушение в результате трещинообразования значительно влияет на качество эксплуатации и срок службы дорожных одежд, для проектирования дорожного покрытия необходимо точно понимать механизм трещинообразования и (Lancaster et al., 2013) [20]. Асфальтобетонные смеси являются сложными композиционными материалами, а их свойства представляют собой совокупность вязких и упругих характеристик. Эксплуатационные характеристики асфальтобетона существенно зависят от степени нагружения и температурных воздействий, что в свою очередь усложняет процесс анализа процесса трещинообразования (Lancaster et al., 2013) [20].

Трещинообразование в дорожных одеждах преимущественно связано с прочностью на растяжение асфальтобетонных смесей (Huang et al., 2005) [21]. Таким образом, многие исследователи пытались определить прочность на растяжение асфальтобетона, используя такие методы испытаний, как:

— косвенное испытание на растяжение (IDT[20]);
— испытание на изгиб с приложением сосредоточенной нагрузки в трех или четырёх точках;
— испытание на трещиностойкость на образцах-дисках (disk-shaped compact tension test, DCT[21]) (Lancaster et al., 2013) [20].

Среди указанных методов испытаний метод IDT широко применяется для определения прочности при растяжении асфальтобетонных смесей (Арабани и Фердоуси (Arabani, Ferdowsi), 2009; Huang et al., 2005) [21, 22] из-за его простоты, а также потому, что образцы-керны могут быть легко взяты из существующих дорожных одежд, или изготовлены в лабораторных условиях. Несмотря на то, что испытание IDT не представляет сложности, оно имеет некоторые недостатки, такие как постоянная деформация, наблюдаемая по местам нагружения, а напряженное состояние во время испытания достаточно сложно охарактеризовать, таким образом,

[20] IDT — Indirect Tensile Test — косвенное испытание на усталость при растяжении; испытание на косвенное растяжение

[21] Испытания на образцах в виде дисков, нагруженных сжимающими по диаметру силами.

реально оценить фактические эксплуатационные качества дорожных одежд не представляется возможным (Arabani, Ferdowsi, 2009; Huang et al., 2005) [21, 22]. Кроме того, следует учесть недостаточную повторяемость испытания, а также значительный коэффициент вариации (Arabani и Ferdowsi, 2009) [22].

В последние годы было разработано и широко применяется испытание на полукруглый изгиб (Semi-circular bend, SCB). Испытание SCB было первоначально разработано для определения сопротивления разрушению в механике горных пород (Huang et al., 2013) [19] и успешно использовалось для анализа параметров разрушения асфальтобетонных смесей (Моленаар с сотр. (Molenaar et al.), 2002) [23]. Испытание SCB постепенно привлекает все больше внимания со стороны исследователей и инженеров благодаря своей простоте, повторяемости и последовательности в изучении характеристик трещинообразования асфальтобетонных смесей (Саха и Билигири (Saha, Biligiri), 2015) [24].

В ходе исследований (Arabani, Ferdowsi, 2009) [22] использовались образцы для испытания SCB диаметром 100 мм с целью сравнения полученных результатов с данными испытаний IDT и устойчивости по Хвиму[22]. Авторы пришли к выводу, что результаты трех испытаний совпали. Это указывает на то, что при проведении испытаний возможно использование образцов диаметром 100 мм. Однако, согласно двум существующим стандартам испытания по методу SCB — EN 12697–44: 2010 (EN12697–44: 2010), а также AASHTO TP 105–13 (AASHTO-TP-105-13, 2013) — используются образцы диаметром 150 мм. Для испытания IDT образцы диаметром 100 мм могут использоваться для асфальтобетонных смесей с номинальным размером зерен наполнителя 10 мм и 14 мм, согласно стандартам Новой Зеландии и Австралии. Вопрос заключается в том, подходят ли образцы диаметром 100 мм для испытания по методу SCB. До сих пор исследования о применимости образцов диаметром 100 мм для испытаний SCB не проводились. Кроме того, необходимо изучить влияние длины надреза образцов на механические характеристики испытания SCB для образцов диаметром 100 мм с целью получения информации о подходящей длине разреза для испытания по методу SCB с использованием образцов диаметром 100 мм. Схема испытания по методу SCB приведена на рисунке 62.

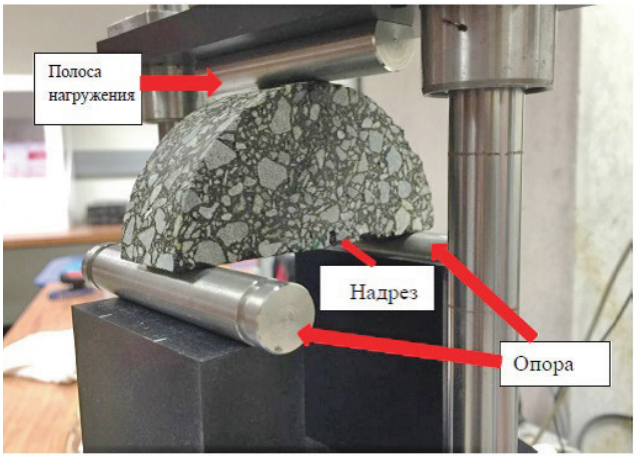


Рис. 62. Схема испытания полукруглого образца с надрезом по методу SCB

Метод проектирования смеси

В ходе данного исследования для уплотнения образцов асфальтобетонной смеси использовался гираторный компактор (вращательный уплотнитель), представленный на рисунке 63. При проектировании асфальтобетонных смесей были приготовлены образцы высотой 85 мм

[22] Метод тестирования на сопротивление деформации и плотности зернового состава битумных смесей посредством Аппаратуры Хвима.

и диаметром 150 мм. В соответствии со стандартом AS / NZS 2891.2.2: 2014 (AS / NZS, 2014b), давление плунжера составляло 240 кПа, а угол вращения — 3°.

Рис. 63. Гираторный компактор (вращательный уплотнитель)

Согласно стандартам Австралии и Новой Зеландии, давление плунжера, равное 240 кПа, намного меньше, чем рекомендованное методом Superpave, равное 600 кПа. Однако угол вращения, согласно стандартам Австралии и Новой Зеландии, составляет 3 °, что намного больше угла вращения, рекомендованного методом Superpave (1,25 °). Бóльший угол вращения компенсирует более низкое давление плунжера. *Разница в уплотнении для разных уровней интенсивности движения* — это количество вращений, которое указано в «Спецификации для асфальтобетона плотного гранулометрического состава и щебеночно-мастичного асфальтобетона NZTA M10: 2014» (NZTA, 2014) (англ. Specification for dense graded and stone mastic asphalts). В ходе данного исследования уровню высокой интенсивности движения соответствовало 120 вращений уплотнителя.

Экспериментальные испытания

Экспериментальная программа испытаний состоит из испытания вяжущего и испытаний механической прочности смеси. В первой части, в испытаниях вяжущего, для изучения консистенции вяжущего и влияния добавок на вязкость вяжущих, как модифицированных, так и немодифицированных, измеряли вязкость исходного вяжущего и длительно состаренного вяжущего. Испытания механической прочности охватывали изучение влагостойкости смесей, усталостного растрескивания, устойчивости к колееобразованию и тест SCB.

Испытание на влагостойкость было проведено для исследования способности смесей противостоять повреждению от влаги, используя метод непрямого растяжения. Испытание на усталостное растрескивание было проведено для оценки поведения асфальтобетона при многократной нагрузке с использованием метода испытаний на усталость при изгибе. Динамический модуль, динамическая ползучесть и испытание «нагруженное колесо» были использованы для оценки колееустойчивости смесей при высоких температурах дорожного покрытия. Испытание полуцилиндров на изгиб (тест SCB) было исследовано для дальнейшего изучения трещиностойкости смесей и возможности применения данного испытания для оценки прочности на разрыв асфальтобетона вместо метода определения прочности при непрямом

растяжении. Повторяемость и механические свойства, полученные из испытания SCB, сравнили с данными испытаний модуля упругости и прочности при непрямом растяжении. Результаты экспериментальных испытаний приведены в таблице 20 ниже.

Таблица 20

Результаты экспериментальных испытаний

Испытание	Стандарт/Отчёт	Цель (параметр)	Количество образцов
Испытания вяжущего	ASTM D4402/D4402M-13 and ASTM D2872–12	Реология	1
Влагостойкость асфальтобетона	AG: PT/T232	Повреждение от влаги	6
Усталость	AG: PT/T232	Усталостные трещины	3
Динамический модуль	NCHRP 614	Колееобразование	3
Динамическая ползучесть	NCHRP 629	Колееобразование	3
«Нагруженное колесо»	AG: PT/T231	Колееобразование	2
Модуль упругости	AS 2891.13.1–1995	Испытание SCB	3
ITS (прочность при непрямом растяжении)	ASTM D6931–12	Испытание SCB	3
SCB (испытание полуцилиндров на изгиб)	-	Трещиностойкость	3

Косвенный метод испытания по определению прочности при растяжении (ITS). Испытание на влагостойкость

Чувствительность к влаге исследовалась с использованием отношения прочности при растяжении (tensile strength ratio, TSR) в соответствии с AG: PT/ T232 (AG: PT / T232, 2007). Были изготовлены цилиндрические образцы диаметром 150 мм и высотой 85 мм. Целевой показатель содержания воздушных пустот — 8,0 ± 1,0%. Для каждой смеси было изготовлено шесть образцов, которые разделены на сухие и влажные (рисунок 64 a). Среднее значение целевого показателя содержания воздушных пустот каждой партии образцов поддерживалось на уровне 8,0% с максимальной разницей между двумя партиями — 0,5%. Партию сухих образцов асфальтобетона выдерживали в сушильном шкафу при 25 °C в течение двух часов, а затем перед косвенным испытанием на прочность при растяжении измеряли их высоту. Для подготовки партии влажных образцов, их сначала насыщали водой под вакуумом до 55–80% (рисунок 64 b). Затем их выдерживали в воде в течение 24 часов в водяной бане с контролируемой температурой при 60 °C (рисунок 64 c). Затем образцы выдерживали при 25 °C в течение двух часов перед измерением высоты и косвенным испытанием на прочность при растяжении. Косвенное испытание на растяжение (рисунок 64 d) проводили при 25 °C, а скорость перемещения составляла 50 мм/мин. Чувствительность к влаге (TSR) рассчитывалась, как отношение среднего значения косвенной прочности при растяжении влажных образцов (ITS) к среднему значению прочности при растяжении образцов в сухом состоянии (ITS), выраженное в процентах (*the ITS test was conducted according to ASTM D6931–12 «Standard Test Method for Indirect Tensile (IDT) Strength of Bituminous Mixtures' (ASTM, 2012))*.

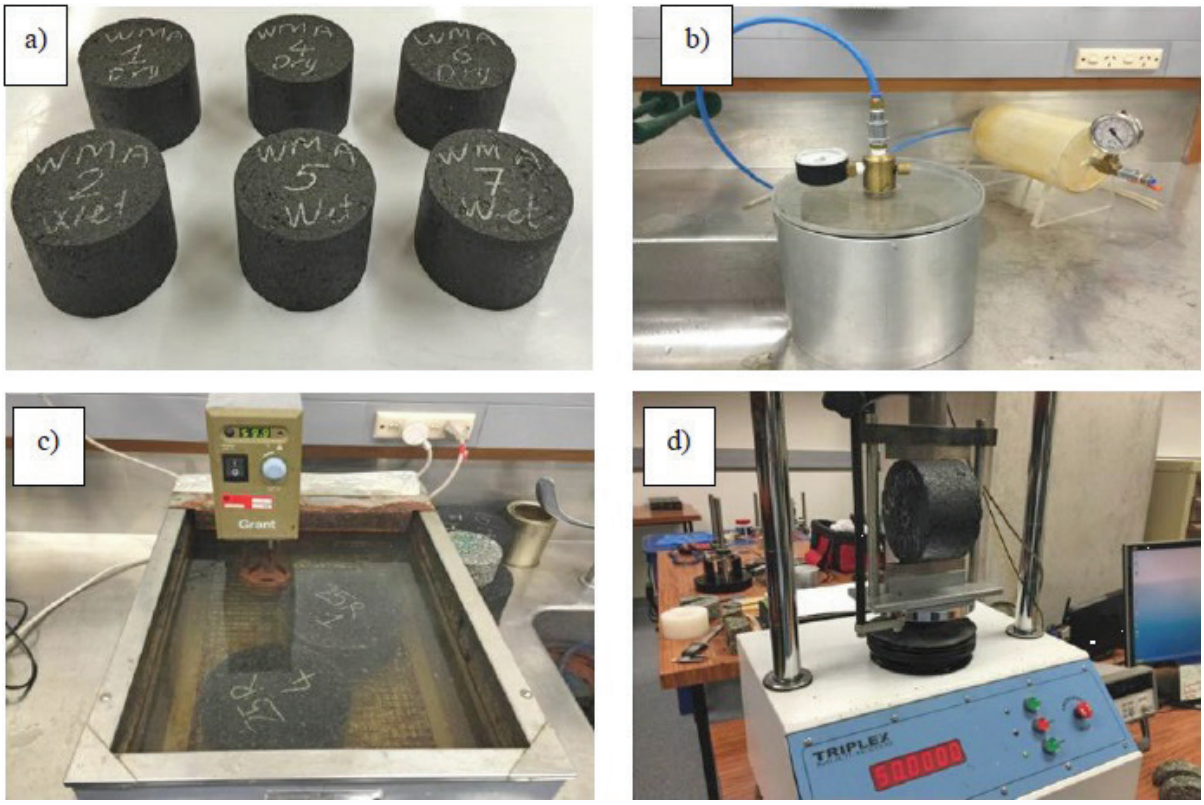


Рис. 64. Подготовка образцов и испытание на влагостойкость. (a) Подготовка 6 образцов, 3 – для тестирования во влажном состоянии и 3 – в сухом состоянии; b) вакуумная установка для насыщения образцов водой; (c) подготовка образцов (термостатирование) для испытаний во влажном состоянии; (d) метод косвенного испытания на прочность при растяжении

Значение прочности при растяжении, полученное в результате испытания, было рассчитано, согласно уравнению:

$$S_t = \frac{2 \cdot 1000 \cdot P}{\pi \cdot D \cdot h_c},$$

где: S_t = предел прочности при растяжении, кПа;
P = пиковая нагрузка, N
D = диаметр образца, мм;
h_c = высота образца, мм

Испытание на усталость образцов-балочек при изгибе

Для оценки сопротивления усталостной трещиностойкости асфальтобетона использовали испытание на усталость образцов-балочек при изгибе. Образцы были изготовлены и протестированы в соответствии с AG: PT/T233 «Усталостная долговечность уплотнённых битумных смесей» (AG: PT/T233, 2006). Для всех смесей были изготовлены образцы-плиты, как указано на рисунке 65 a, размером 305x405x75 мм. Эти образцы-плиты были затем распилены на балочки размером 50 мм в высоту, 65 мм в ширину и 405 мм в длину, как указано на рисунке 65 b.

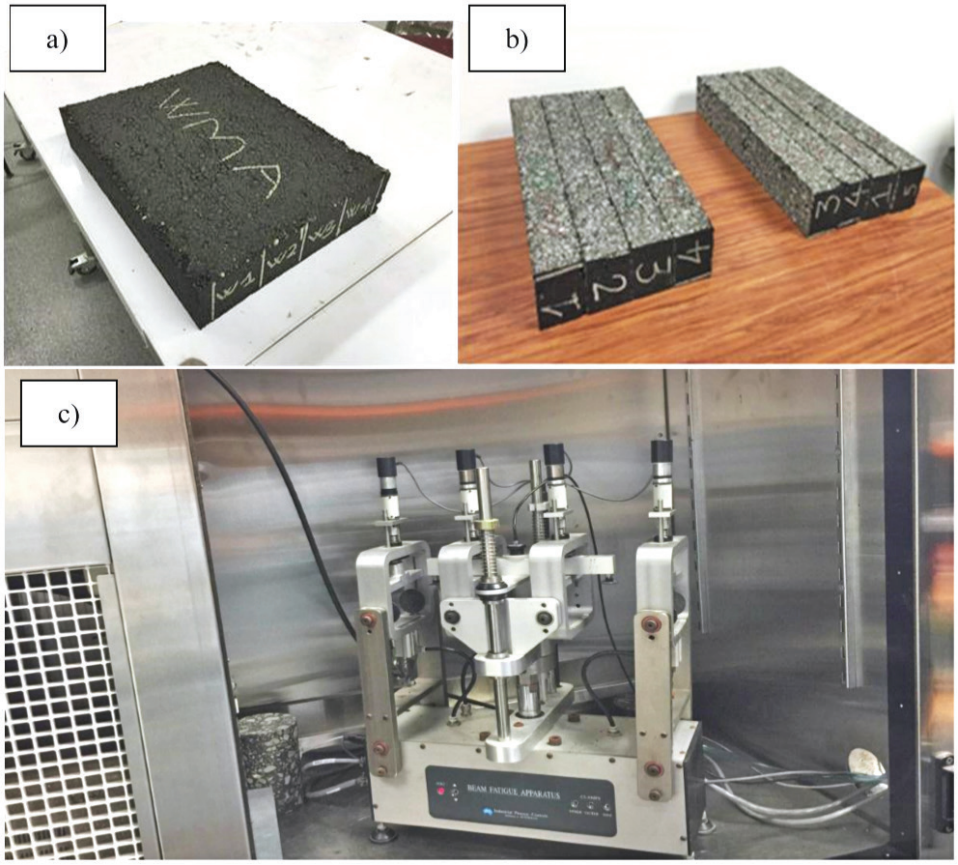


Рис. 65. Подготовка образца и аппарат для испытаний на усталость: (a) образец уплотненный не секторном прессе; (b) балочки, нарезанные из образца-пластины для испытания на усталость; (c) оснастка для 4-точечной изогнутой балочки в термостатированной камере для испытании на усталость

Все испытуемые балочки имели содержание воздушных пустот в диапазоне 6.1–7.9%. Для данного исследования балочки из асфальтобетона испытывали в режиме *напряжение / деформация*. Все образцы подвергались синусоидальной нагрузке *10 Гц и максимальной деформации с амплитудой 400 микродеформаций.* Образцы выдерживали в климатической камере, как показано на рисунке 65 c, при 20 °C в течение 2 часов перед испытаниями. Количество циклов до усталостного разрушения определяется как количество циклов, при котором жёсткость образцов снижается до 50% от их начальной жёсткости.

Испытание на определение динамического модуля упругости

Испытание на определение динамического модуля упругости (|E*|) выполняется путем приложения повторной одноосной нагрузки при различных частотах и температурах для измерения упругой деформации и деформации образцов.

В ходе данного исследования испытание по определению динамического модуля упругости основывалось на рекомендациях NCHRP 614 «Усовершенствование простого средства нагрузочного тестирования для практического использования» (Бонаквист, (Bonaquist), 2008a) (англ. «Refining the Simple Performance Tester for Use in Routine Practice») [25]. Было приготовлено по три образца каждой смеси. Цилиндрические образцы диаметром 150 мм и высотой 177 мм были подготовлены с помощью гираторного компактора (вращательного уплотнителя), затем из них вырезались образцы-керны диаметром 100 мм и высотой 150 мм (рисунок 66 a). Все опытные образцы характеризовались содержанием воздушных пустот в диапазоне 5,0 ± 1%. Три линейных датчика на основе дифференциального преобразователя (англ. linear voltage

differential transformer LVDT) были прикреплены к каждому образцу (рисунок 66 b). Образцы испытывали при четырех различных температурах: 4,4; 21,1; 37,8; 50 °C и пяти различных частотах 10; 5; 1; 0,5 и 0,1 Гц. Для того, чтобы не повредить образцы в процессе испытаний, они испытывались от самой низкой температуры до самой высокой температуры и от самой высокой частоты до самой низкой частоты.

Результаты испытания на определение динамического модуля упругости были использованы для построения мастер-кривых при эталонной температуре — 20 °C.

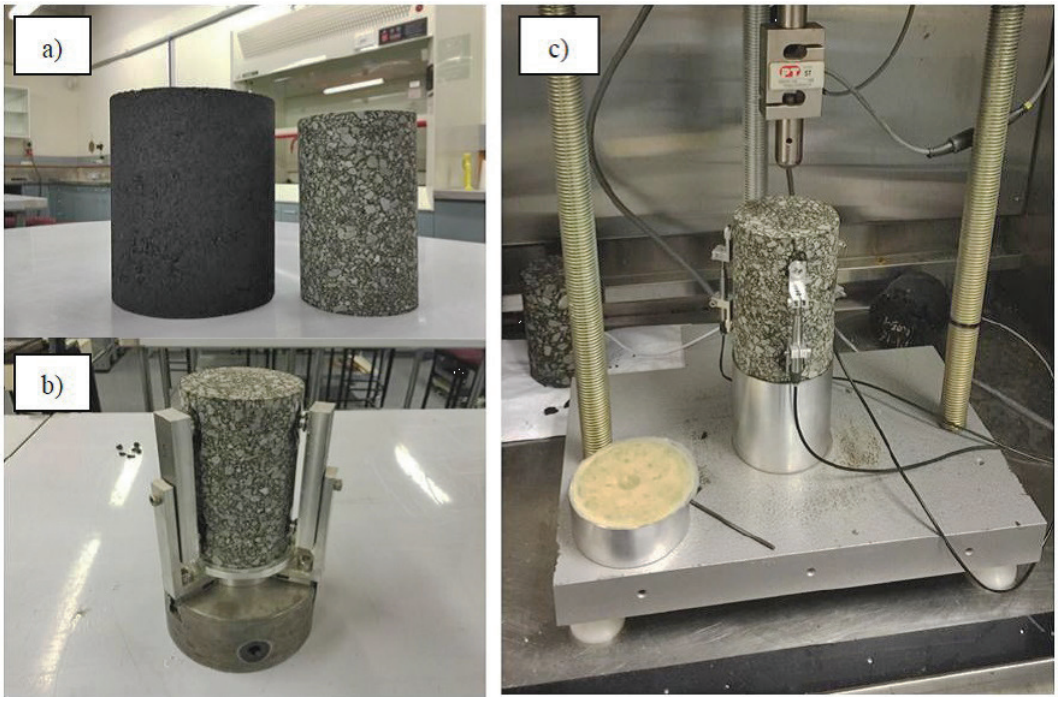


Рис. 66. Подготовка образцов и оборудования для определения динамического модуля упругости. (a) Образец после формовки и образец-керн после выбуривания и обрезки торцевых поверхностей; (b) монтаж крепления для установки датчиков LVDT; (c) испытательный образец

Испытание на ползучесть под действием динамических нагрузок

Испытание на ползучесть под действием динамических нагрузок — это простое испытание, применяемое для исследования устойчивости к разрушению асфальтобетана. В ходе данного исследования испытание на ползучесть при динамических нагрузках проводилось в режиме неограниченного давления для оценки стойкости смесей к колееобразованию. За основу был взят отчет NCHRP 629 «Тестирование на чувствительность испытаний по определению динамического модуля и числа текучести с помощью средства нагрузочного тестирования» (Bonaquist, 2008b) («Ruggedness Testing of the Dynamic Modulus and Flow Number Tests with the Simple Performance Tester») [26]. Поскольку испытание на определение динамического модуля упругости является неразрушающим, при проведении испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок использовались те же образцы, что и при испытаниях на определение динамического модуля упругости. После завершения испытаний на определение динамического модуля упругости при 50 °C, сразу же и при той же температуре проводились испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок. Во время испытания образцы подвергались повторяющемуся импульсу[23] осевой сжимающей нагрузки 0,1 секунды каждые 1 секунду, при девиаторном напряжении величиной 140 кПа. Во время испытания регистрировались постоянные осевые деформации и количество циклов нагрузки. Испытание прекращалось либо

[23] импульс, форма которого описывается функцией вида 1-cos alfa /2

в том случае, когда осевая деформация достигала 50 000 микродеформаций (micro strains), или число циклов нагрузки достигало 10 000. Для данного испытания использовалось то же оборудование, что и для испытания по определению динамического модуля (рисунок 66 с).

Испытание колёсной нагрузкой — Испытание по определению устойчивости к колееобразованию путем прокатывания нагруженного колеса

В дополнение к испытанию на ползучесть под действием динамических нагрузок были испытаны все исследуемые асфальтобетонные смеси с целью оценить устойчивость к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса. Испытание проводилось с использованием модифицированной испытательной установки. Образцы-плиты были изготовлены размером 305 х 305 х 50 мм. Образцы подвергались вертикальной нагрузке 700 Н от прокатывания резинового колеса с ленточной шлифовальной машиной, которое перемещалось вперед — назад по поверхности плиты со скоростью около 26,5 циклов в минуту (рисунок 67). Испытание необходимо повторить не менее двух раз. Содержание воздушных пустот составляло 5 ± 1%. Было изготовлено по три образца для каждой смеси: ГАС, ТАС и ТАС-АГ с использованием добавки Evotherm, а также по два образца смесей ТАС и АС-АГ с использованием добавки Sylvaroad. Средние значения содержания воздушных пустот в образцах каждой смеси, подготовленной для испытаний, укладывались в диапазон 4,9–5,9%. Перед проведением испытаний образцы термостатировали в течение 7 часов при температуре 60 °С. После выдерживания испытание проводили при той же температуре. Во время проведения испытания фиксировали глубину колеи и соответствующее ей количество циклов нагружения. Испытание завершалось, когда глубина колеи достигала 15 мм, или когда количество циклов составило 100 000 (в зависимости от того, что происходило раньше).

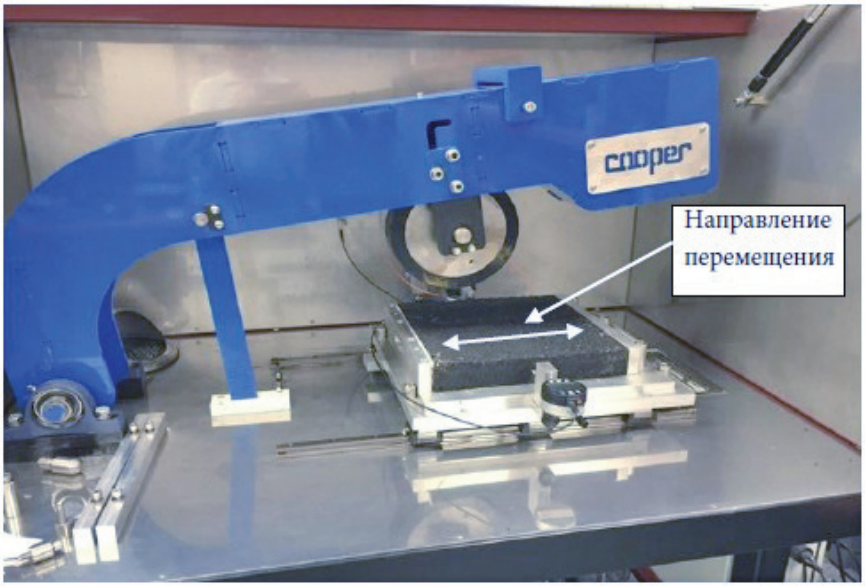


Рис. 67. Оборудование для определения устойчивости к колееобразованию путем прокатывания нагруженного колеса

Испытание на непрямой модуль жёсткости (модуль упругости)

Испытание на непрямой модуль жесткости, также называемое испытанием на модуль упругости, было проведено согласно AS 2891.13.1–1995 «Метод 13.1: Определение модуля упругости асфальтобетона — метод непрямого растяжения» (AS / NZS). В данном исследовании была использована испытательная установка, изображённая на рисунке 67. Были подготовлены цилиндрические образцы диаметром 150 мм и высотой 177 мм. Эти образцы были пробиты и рас-

пилены на образцы размером 100 мм в диаметре и высотой 50+1 мм для испытания непрямого модуля жесткости. Содержание воздушных пустот в образцах в данном исследовании составляло находилось в диапазоне 4,3–5,9%. Образцы термостатировали в камере в течение 2 часов для достижения равновесной температуры 25 °C до испытания. Во время испытания была применена нагрузка в форме гаверсинусов вдоль диаметральной плоскости образцов. Для расчёта модуля упругости были записаны пиковая нагрузка и обратимая горизонтальная деформация образцов после применения нагрузки. Конечный модуль упругости смеси представлял собой среднее значение модуля упругости трех повторных испытаний.

Модуль упругости, полученный в результате испытания на непрямое растяжение, рассчитывали, как указано в уравнении:

$$M_r = P \cdot \frac{(v + 0.27)}{H \cdot h_c},$$

где: M_r = модуль упругости, МПа; P: пиковая нагрузка, H; v: коэффициент Пуассона;

H = восстановленная горизонтальная деформация образца после приложения нагрузки, мм;

h_c = толщина образца, мм

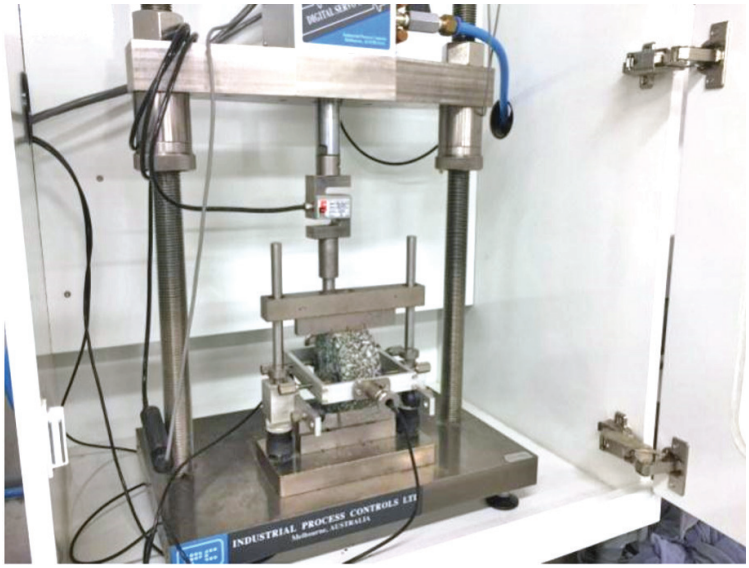


Рис. 68. Испытательная установка для определения модуля упругости

SCB-тест (испытание полукруглых образцов на изгиб)

В данном исследовании было проведено испытание полукруглых образцов на изгиб для оценки трещиностойкости смесей под монотонной нагрузкой. Для данного испытания были подготовлены цилиндрические образцы высотой 177 мм и диаметром 150 мм. Эти образцы были пробиты и обрезаны в цилиндрические образцы диаметром 100 мм и высотой 30 ± 1 мм. Цилиндрические образцы высотой 30 мм были разрезаны на две половины, как показано на рисунке 69 a, и надрезаны таким образом, как указано для образцов на рисунке 69 b. В данном исследовании были выбраны 4 размера надреза, в том числе 5, 10, 15 и 20 мм при толщине 2 мм (рисунок 69 c). Для каждой смеси для сравнения были подготовлены образцы с целевым показателем содержания воздушных пустот 5,0 ± 1% и 7,0 ± 1%. Перед испытанием образцы выдерживали в термостатированной камере в течение 2 часов, чтобы достичь равновесной температуры 25 °C. Затем их подвергали монотонной нагрузке со скоростью, выбранной на уровне 1 мм/мин. Промежуток между двумя стальными опорами поддерживался на уровне 80 мм, как показано на рисунке 69 d, что примерно эквивалентно 0,8d (d = 2r), где

d — диаметр образца. Для каждой смеси при каждой длине надреза и целевом показателе содержания воздушных пустот были подготовлены три повторности. Всего для испытания полукруглых образцов на изгиб было подготовлено 168 образцов. Для исключения погрешностей и повышения достоверности результатов выбор образцов перед надрезом был рандомизирован.

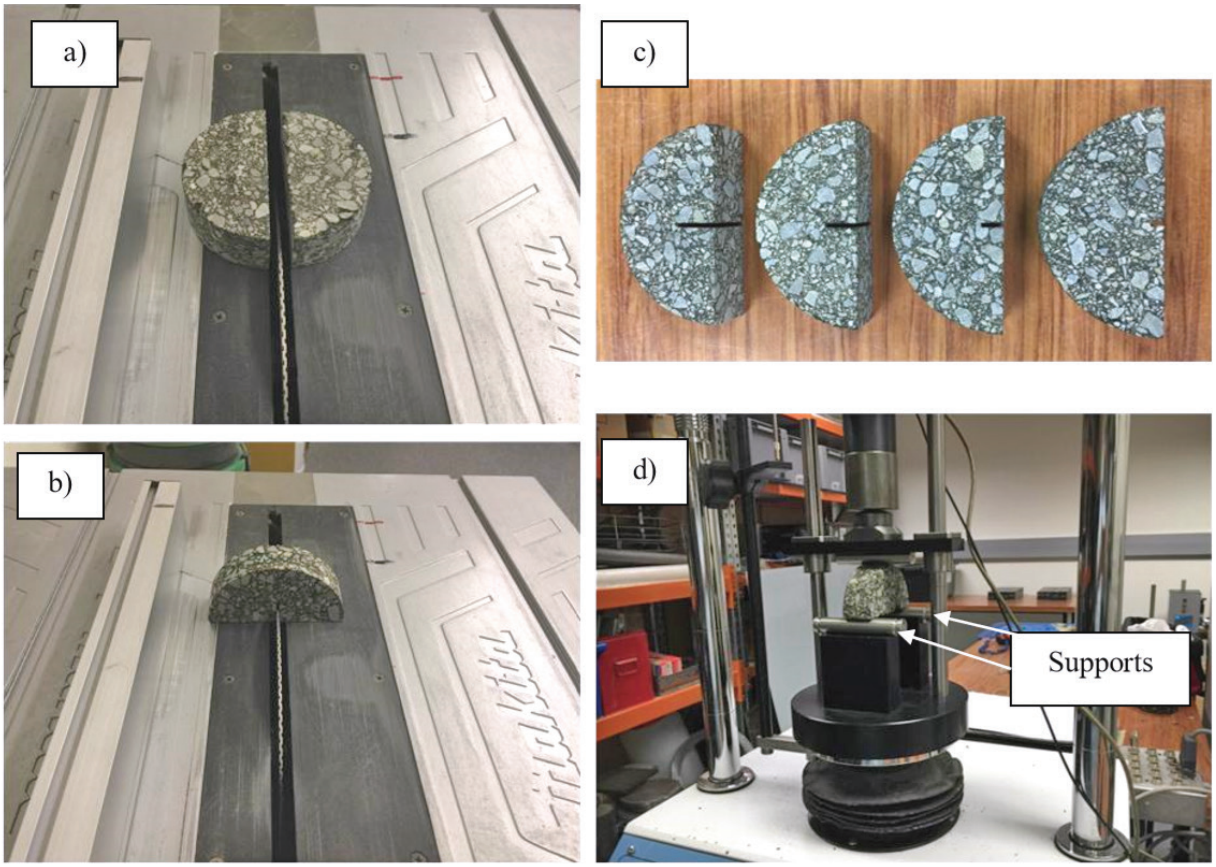


Рис. 69. Подготовка образцов и испытание полукруглых образцов на изгиб

На рисунке 70 представлена схема метода испытания полукруглых образцов на изгиб и типичный график «нагрузка / смещение линии нагрузки» испытания полукруглых образцов на изгиб.

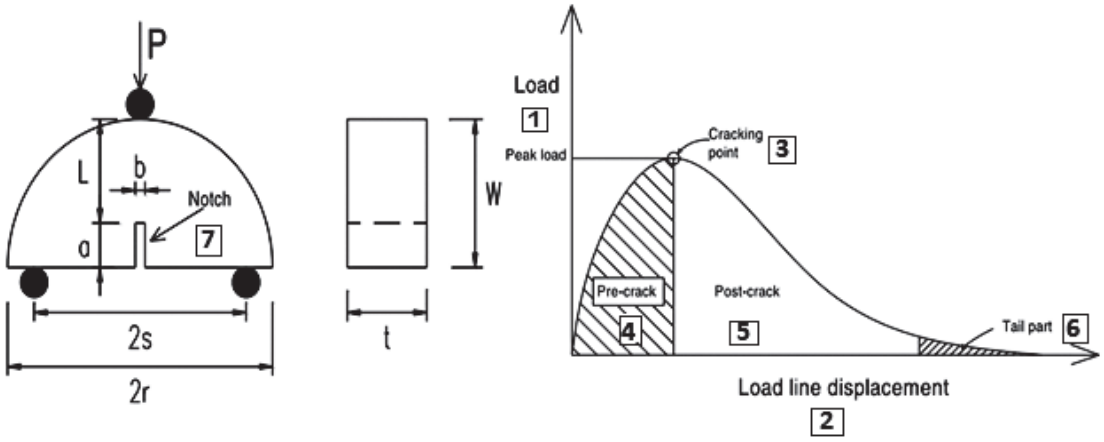


Рис. 70. Метод испытания полукруглых образцов на изгиб и типичный график «нагрузка / смещение линии нагрузки» испытания полукруглых образцов на изгиб

На рисунке 70 параметры определены следующим образом:
2r = диаметр образца (мм);
2s = интервал между двумя опорами (s = 0,8r) (мм);
a = длина надреза;
b = толщина надреза;
P = нагрузка, приложенная к образцу;
L = длина связки;
W = высота образца;
t = толщина образца.
1 — нагрузка;
2 — линия смещения нагрузки
3 — точка растрескивания (разрушения)
4 — нагрузка до растрескивания
5 — нагрузка после растрескивания
6 — «хвостовая» часть
7 — надрез

Для изучения применимости метода для образцов диаметром 100 мм и влияния длины надреза на механические свойства испытания полукруглых образцов были вычислены 3 параметра. Эти три параметра: максимальное растягивающее напряжение (TS), энергия разрушения (G_f) и вертикальная деформация при максимальной нагрузке (ε_{max}).

Максимальное растягивающее напряжение в нижней части образца было получено из испытания полукруглых образцов на изгиб (SCB) и рассчитывается, как указано в уравнении (Arabani and Ferdowsi, 2009; Molenaar et al., 2002):

$$\sigma_m = 3564\frac{P}{d \cdot t}(kPa),$$

где σ_m = максимальное растягивающее напряжение на дне образца (кПа);
P = максимальная нагрузка (Н)
d = диаметр образца (= 2r) (мм);
t = толщина образца (мм).

Энергия разрушения определяется как энергия, необходимая (требуемая) от начала нагрузки до пика нагрузки или появления трещины. Энергия разрушения образца была рассчитана по уравнению:

$$G_f = \frac{W_f}{t \cdot L}\left(N.mm^{-1}\right),$$

где W_f = работа разрушения или энергия деформации, иногда называемая U(Н.мм), и она определяется как площадь между кривой нагрузки (до пиковой нагрузки) и смещением линии нагрузки.

t = толщина образца (мм);
L = длина связки (мм).

Вертикальная деформация ε_m была рассчитана с использованием уравнения 3.5. При максимальной нагрузке ε_m была определена как максимальная вертикальная деформация (ε_{max}).

$$\varepsilon_m = \frac{\triangle w_m}{W_m} \cdot 100\% \ (\%),$$

где ε_m = максимальная вертикальная деформация (%);
Δw_m = вертикальное смещение линии нагрузки при максимальной нагрузке (mm);
W_m = высота образца (mm).

Результаты испытаний на влагостойкость.

Влагостойкость смесей при оптимальном содержании вяжущего и введении добавок в определенном количестве

В этом разделе представлены результаты испытания на влагостойкость смесей ГАС, ТАС и ТАС-АГ с использованием добавок Evotherm и Sylvaroad. Опытные образцы, были получены с оптимальным содержанием вяжущего и содержанием добавок: 0,5% — Evotherm и 2% — Sylvaroad. Результаты испытания на влагостойкость показаны на рисунке 71. Можно отметить, что в сухом состоянии обе смеси ТАС имеют более низкую прочность при растяжении, определенную косвенным способом (ITS — indirect tensile strength), чем ГАС. С добавлением АГ показатель ITS смеси ТАС значительно увеличился, став выше, чем ITS ГАС, за исключением смеси 25R-S. Кроме того, показатель ITS смесей ТАС-АГ также увеличился с увеличением содержания АГ, а значения ITS смесей с добавкой Evotherm были выше, чем смеси с добавкой Sylvaroad при содержании АГ в тех же пропорциях.

Во влажном состоянии смесь ГАС (принятой в качестве контрольной смеси) характеризовалась более низким показателем ITS, чем ожидалось. Показатель ITS смеси ТАС-Е во влажном состоянии незначительно сократился по сравнению с величиной в сухом состоянии, и значение было намного выше, чем значение ITS смеси ГАС. Аналогично ГАС, смесь ТАС-S также характеризовалась резким уменьшением показателем ITS, а показатель ITS смеси ТАС-S составил около половины значения ITS смеси ГАС. Во влажном состоянии также отмечается повышение показателя ITS смесей ТАС-АГ с увеличением содержания АГ.

Испытание на влагостойкость показало, что большинство смесей, изучаемых в ходе данного исследования, характеризовались более низким соотношением прочности на растяжение (TSR), чем смеси с 70% АГ, за исключением смесей ТАС и ТАС-АГ с добавкой Evotherm. Добавление Evotherm способствовало значительному улучшению влагостойкости смесей по сравнению с ГАС. Отмечается, что значения TSR как смеси ТАС-Е, так и смеси 25R-E превысили 80%, тогда как значения TSR смеси ГАС и смесей с Sylvaroad были ниже 70%. В случаях использования этих смесей наблюдалось значительное отслоение, как показано на рисунке 72.

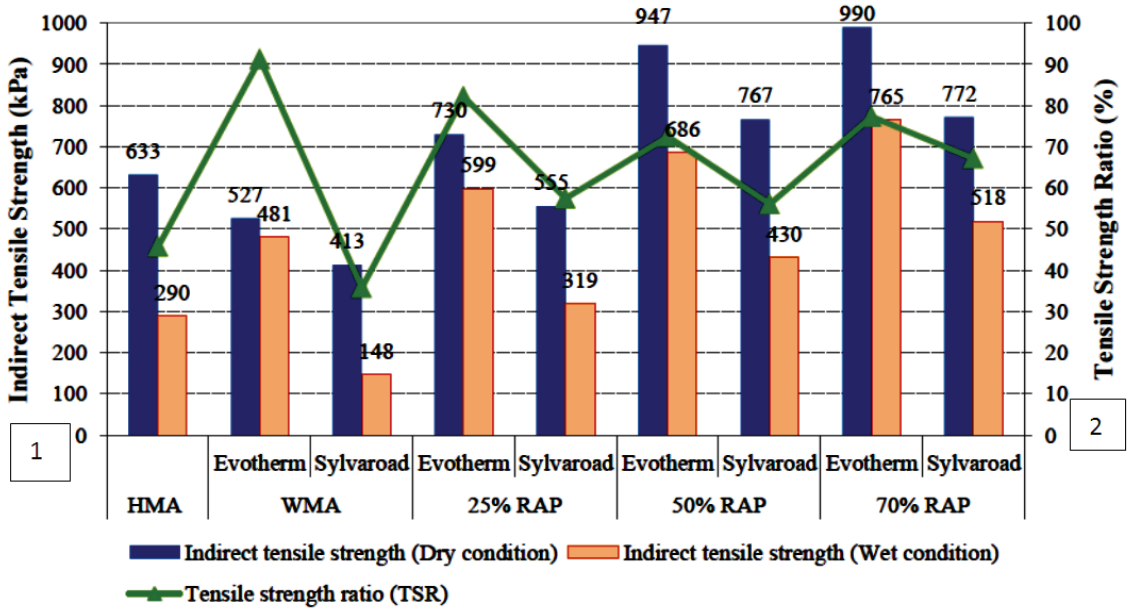


Рис. 71. Результаты испытаний на влагостойкость: 1 — ITS — прочность на растяжение косвенным методом, кПа; 2 — TSR: отношение прочности при растяжении влажных образцов к сухим образцам, выраженное в процентах; синим — прочность при растяжении (образцов в сухом состоянии); красным — прочность при растяжении (образцов во влажном состоянии); зеленым — TSR: отношение прочности при растяжении

Смеси ГАС и ТАС с Sylvaroad характеризовались наибольшей степенью отслоения, в то время как смеси ТАС-АГ с Sylvaroad — меньшей. Результаты показывают, что добавка Sylvaroad может оказывать незначительное влияние на влагостойкость смесей. Напротив, при увеличении содержания АГ в смесях с Sylvaroad показатель TSR возрастал. Эти результаты показывают, что АГ может повысить влагостойкость смесей. Это можно объяснить тем, что связь между вяжущим веществом, которое представляет собой смесь нового и старого вяжущих, и повторно используемым минеральным заполнителем сильнее, чем связь между новым вяжущим и новым минеральным заполнителем. Таким образом, с увеличением содержания АГ повышается влагостойкость смесей. Аналогичные результаты можно найти и в исследовании Зао (Зао с сотрудн. (Zhao et al.), 2013) [16].

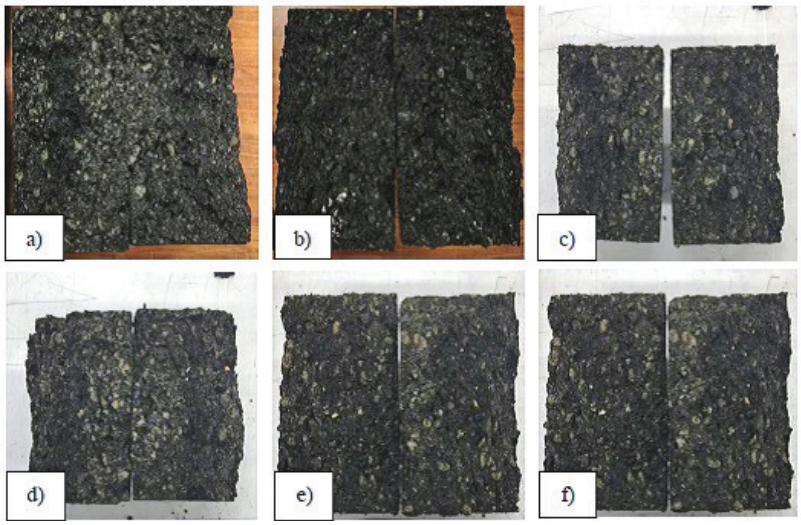


Рис. 72. Изучение отслаивания пленки вяжущего после водонасыщения образцов после испытания: a) ГАС; b) ТАС-Evotherm; c) ТАС-Sylvaroad; d) ТАС 25% АГ+Sylvaroad; e) ТАС +50% АГ +Sylvaroad; f) ТАС +70% АГ+Sylvaroad

Следует отметить, что при увеличении содержания битума показатель ITS (прочность при растяжении, определяемая косвенным методом) образцов в сухом состоянии уменьшается (рисунок 73).

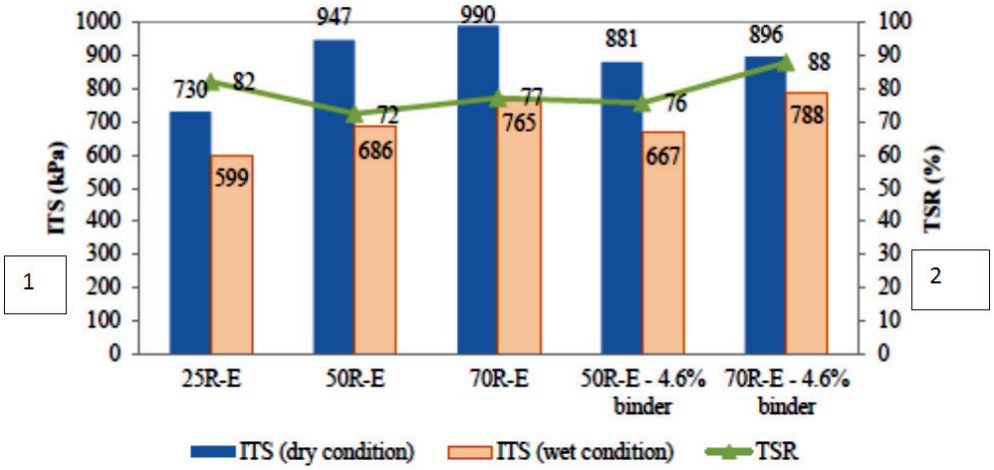


Рис. 73. Прочность при растяжении косвенным методом в сухих и водонасыщенных условиях и соотношения с более высоким содержанием вяжущего: 1 — ITS: прочность при растяжении косвенным методом; 2 — TSR: косвенное отношение прочности при растяжении, выраженное в процентах; синим — прочность при растяжении (образцов в сухом состоянии); красным — прочность при растяжении (образцов во влажном состоянии); зеленым — TSR: отношение прочности при растяжении; binder — вяжущее

При введении добавок Evotherm и Sylvaroad в смеси их влагостойкость значительно повысилась (рисунок 74).

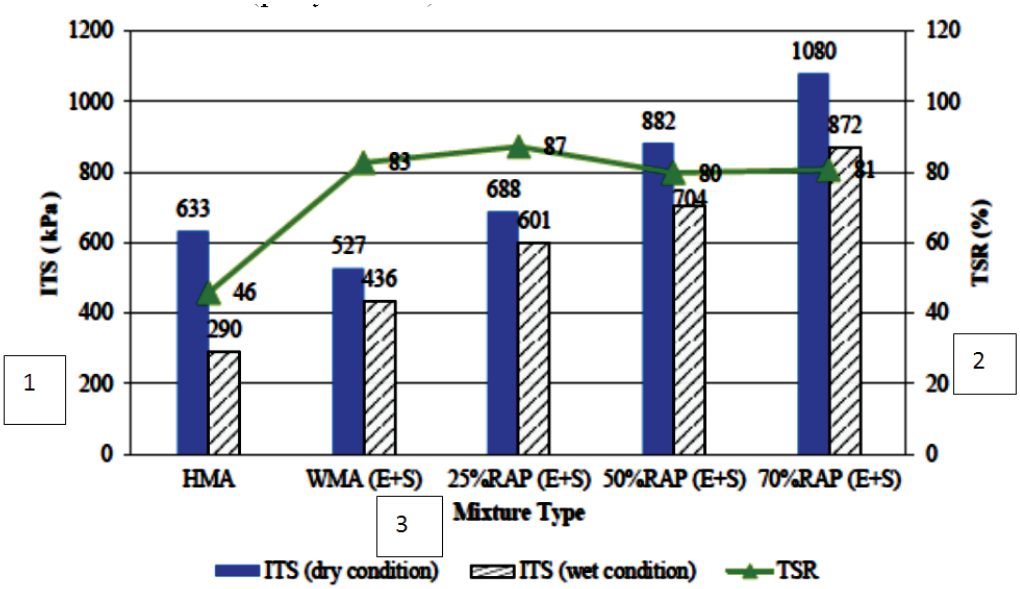


Рис. 74. Результаты испытаний на влагостойкость смесей с использованием добавок Evotherm и Sylvaroad: 1 — ITS: прочность при растяжении косвенным методом; 2 — TSR: косвенное отношение прочности при растяжении, выраженное в про центах; 3 — тип смеси; синим — прочность при растяжении (образцов в сухом состоянии); штриховкой — прочность при растяжении (образцов во влажном состоянии); зеленым — TSR: отношение прочности при растяжении; RAP — АГ

Испытания на усталость

Испытания на усталость проводились на балочках размером 50 х 65 х 405 мм. Целевой показатель содержания пустот составил 7 ± 0,5%. Все образцы подвергались синусоидальной нагрузке с частотой 10 Гц и максимальной амплитудой деформации 400 микродеформаций при 20 °С. Для каждой смеси испытывали не менее трех образцов. Результаты испытаний на усталость, в том числе количество циклов до разрушения в результате усталости и начальная жесткость смеси, представлены на рисунке 75. Можно отметить, что смесь ТАС-S обладает наибольшей устойчивостью к усталости. Все другие смеси ТАС и ТАС-АГ характеризовались значительно меньшем количеством циклов до усталостного разрушения, чем ГАС. На рисунке 75 также можно наблюдать, что увеличение содержания АГ (RAP) способствовало усилению изгибной жесткости, но приводило к сокращению количества циклов до усталостного разрушения как для смеси с добавкой Evotherm, так и для смеси с добавкой Sylvaroad. Это указывает на то, что под влиянием АГ смесь ТАС стала как более жесткой, так и более хрупкой.

Как и испытание на влагостойкость, испытание на усталость также было расширено для случая ТАС с содержанием АГ в количестве 50% и 70%, при увеличении содержания вяжущего до 4,6% и использовании добавки Evotherm. Среднее количество воздушных пустот в образцах ТАС с 50% АГ составляло 5,8%, что было ниже, чем целевой показатель воздушных пустот, принятого для испытания, который варьировался от 6,5–7,9%, тогда как среднее количество воздушных пустот в смеси ТАС — 70% АГ составило 6,6%.

Усталостная долговечность (выносливость) смеси ТАС с 50% и 70% АГ значительно повысилась с увеличением содержания вяжущего. Выносливость смеси ТАС-50% АГ была несколько ниже, чем у смеси ТАС — 25% АГ, и выше, чем у смеси ТАС — 70% АГ. Поскольку образцы смеси ТАС — 50% АГ характеризовались меньшим количеством воздушных пустот по сравнению с целевым показателем воздушных пустот, принятого для испытания, это может повлиять на выносливость смеси, поскольку более низкое количество воздушных пустот может уве-

личить выносливость смесей (Харви и Цай (Harvey and Tsai), 1996) [27]. Однако, поскольку АГ оказывает значительное влияние на усталостную долговечность смеси, а увеличение содержания АГ способствует ее снижению, ожидается, что смесь ТАС — 50% АГ в расширенном случае будет по-прежнему иметь более высокую усталостную долговечность, чем смесь ТАС — 70% АГ, при условии одинакового количества воздушных пустот в опытных образцах двух смесей.

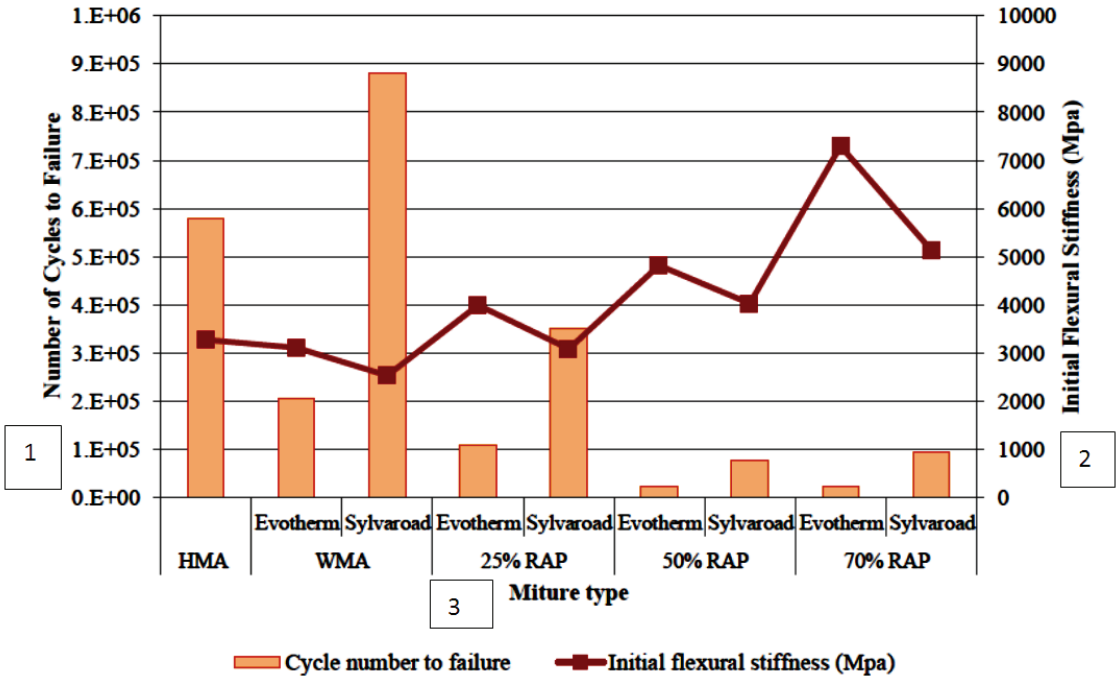


Рис. 75. Результаты испытаний на усталость при четырехточечном изгибе образцов-балочек: 1 — количество циклов до разрушения; 2 — начальная изгибная жесткость (МПа); 3 — тип смеси; RAP — АГ; желтым — количество циклов до разрушения; красным — начальная изгибная жесткость (МПа)

Испытание по определению динамического модуля упругости

Испытание по определению динамического модуля упругости было выполнено для изучения устойчивости смесей к колееобразованию. Для каждой смеси было подготовлено не менее трех опытных образцов, при этом целевой показатель содержания воздушных пустот составил 5 ± 1%. Испытание проводилось при четырех разных температурах: от самых низких (4,4 °C) до высоких (50 °C) и от самой высокой частоты 10 Гц до самой низкой частоты 0,1 Гц. Результаты испытаний были использованы для построения мастер-кривых динамического модуля для смесей при различных контрольных температурах. В ходе данного исследования была выбрана контрольная температура — 20 °C. Мастер-кривые динамического модуля для различных смесей, испытанных при контрольной температуре, показаны на рисунке 76. Очевидно, что смесь ТАС-70% АГ, модифицированная Evotherm (70R-E), характеризуется наибольшими динамическими модулями в назначенном для испытаний диапазоне частот, а смесь ТАС-S характеризовалась самыми низкими модулями по сравнению со всеми смесями. Можно также отметить, что смеси ТАС-АГ с использованием Evotherm характеризовались более высокими динамическими модулями, чем другие смеси ТАС-АГ, модифицированные Sylvaroad при том же содержании АГ. Добавление АГ улучшало динамические модули смесей ТАС. Большинство смесей ТАС-АГ характеризовались значительно более высокими динамическими модулями, чем ГАС, за исключением смеси 25R-S, которая характеризовалась очень похожими значениями модулей по сравнению с ГАС в диапазонах частот, приблизительно от 0,05 до 1 Гц, и вне этого диапазона модули смеси 25R-S были ниже, чем у смеси ГАС. Кроме того, с увеличением содержания АГ динамические модули смесей возрастали.

Для смесей ТАС-АГ с добавкой Sylvaroad можно отметить определенную тенденцию, которая заключается в том, что они, как правило, характеризуются значительным уменьшением динамического модуля при низкой частоте нагружения. Все смеси ТАС-АГ-Sylvaroad показали более низкие динамические модули, чем смесь ГАС, при частоте ниже 0,0003 Гц. Для смесей без АГ смесь ГАС и смесь ТАС-Evotherm характеризовались достаточно похожими динамическими модулями в широком диапазоне частот, за исключением случаев, когда частоты были ниже 0,003 Гц. Однако как смесь ГАС, так и смесь ТАС-Е показали гораздо большие значения динамического модуля, чем смесь ТАС-S в диапазоне всех частот. В рамках данного исследования с учетом того, что самая низкая частота составляла 0,1 Гц, а самая высокая частота — 10 Гц, по мастер-кривым динамического модуля, построенных на основе параметров подгонки, можно было бы отметить неожиданную тенденцию изменения динамического модуля смесей при очень низких и высоких частотах. По этой причине тенденция и ранжирование значений динамического модуля, фиксируемых в частотном диапазоне 0,1–10 Гц, были более четкими, чем вне этого диапазона, при сравнении всех смесей с ГАС.

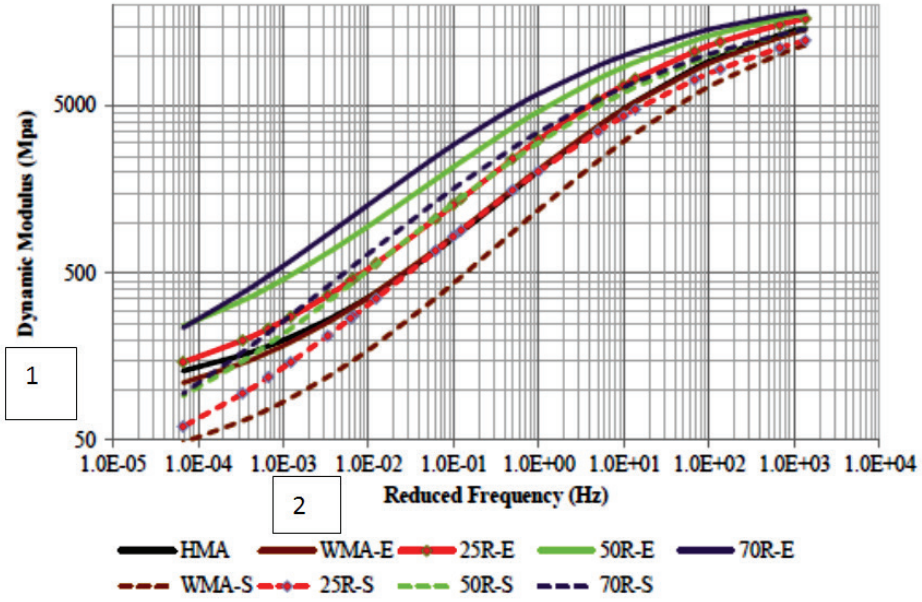


Рис. 76. Мастер-кривые динамического модуля для смесей при контрольной температуре 20 °С: 1 — динамический модуль, МПа; 2 — приведенная частота, Гц

Испытание на ползучесть под действием динамических нагрузок

Испытание на ползучесть при динамических нагрузках проводилось в режиме неограниченного давления для оценки устойчивости смесей к колееобразованию. Испытания осуществлялись сразу после завершения испытания по определению динамического модуля, используя те же образцы, как и при испытании по определению динамического модуля, поскольку последнее испытание является неразрушающим, поэтому образцы считаются неповрежденными после такого испытания. Испытывали три образца каждой смеси при 50 °С. Испытания прекращали, когда либо количество импульсов нагрузки достигало 10 000 циклов, либо деформации достигали величины 54 000 микронапряжений.

Результаты испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок показаны на рисунке 77. Можно отметить, что устойчивость смеси ГАС к колееобразованию выше, чем двух других смесей ТАС, и из них ТАС-Е работает лучше, чем ТАС-S. Добавление АГ значительно улучшило стойкость смесей ТАС к колееобразованию. Все смеси ТАС с АГ характеризуются значительно большей устойчивостью к колееобразованию, чем контрольная смесь ТАС.

Это указывает на то, что АГ повышает жесткость смеси, уменьшая постоянную деформацию образца при нагружении и, следовательно, улучшая устойчивость смеси к колееобразованию. Можно также отметить, что смеси TAC-Evotherm работают лучше, чем TAC-Sylvaroad при добавлении АГ в тех же пропорциях.

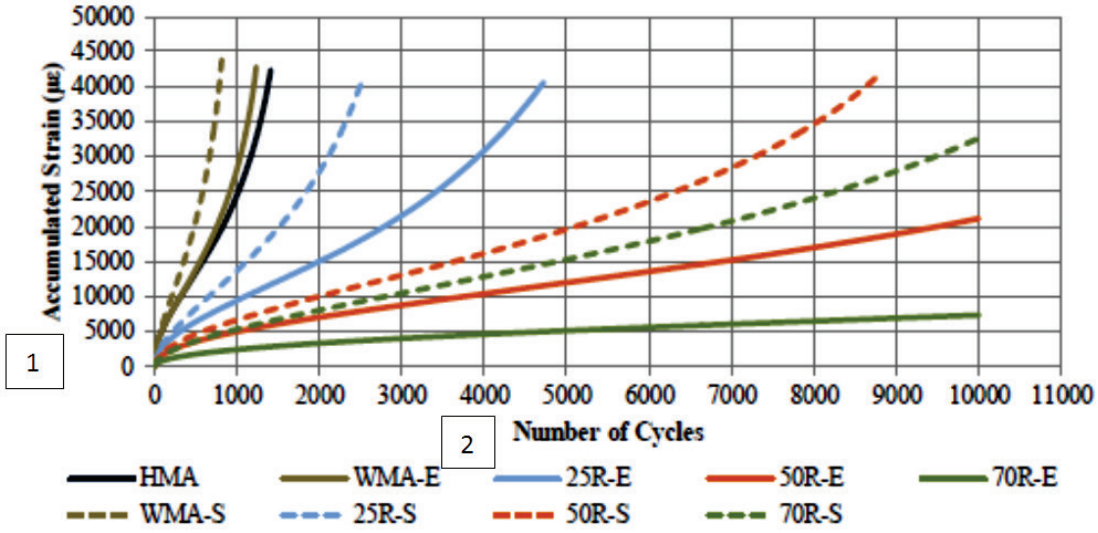


Рис. 77. Результаты испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок: 1 — накопленная деформация, με; 2 — количество циклов

Испытание по определению устойчивости к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса

В дополнение к испытаниям по определению динамического модуля и ползучести под действием динамических нагрузок проводилось испытание по определению устойчивости смесей к колееобразованию прокатыванием нагруженного колеса. Для каждой смеси было испытано не менее двух плит. Испытания проводили при 60 °C. Результаты показаны на рисунках 78 и 79.

Исходя из данных, приведенных на этих двух графиках, устойчивость смеси 70R-E к колееобразованию выше по сравнению со всеми другими смесями, что подтверждает результаты испытаний по определению динамического модуля и ползучести под действием динамических нагрузок. И, наоборот, для смеси TAC-S требуется наименьшее количество циклов нагружения для достижения максимальной глубины колеи. Смеси TAC и TAC-АГ с Evotherm показали большую устойчивость к колееобразованию, чем соответствующие смеси TAC и TAC-АГ с добавкой Sylvaroad. Смесь ГАС демонстрирует большую устойчивость к колееобразованию, чем смеси TAC, примерно в два и три раза выше, чем TAC-E и TAC-S соответственно. Это указывает на то, что вяжущее в TAC было более мягким, чем в ГАС из-за более низких температур смешивания и уплотнения, или из-за введения добавок. В связи с этим устойчивость к колееобразованию в смесях TAC была ниже, чем ГАС. Полагают, что используемые добавки могут не только снизить вязкость вяжущего при повышенных температурах, но и сделать более мягким вяжущее в уплотненных асфальтобетонных смесях.

С добавлением АГ все смеси TAC показали значительное улучшение устойчивости к колееобразованию, что было намного выше, чем смеси ГАС. Устойчивость к колееобразованию смеси TAC также повысилась с увеличением содержания АГ. При добавлении 25% АГ в смесь TAC, количество циклов до достижения максимальной глубины колеи значительно увеличилось, а значения были примерно в два раза выше, чем у смеси ГАС, для обеих смесей с добавками Evotherm и Sylvaroad. При более высоком содержании АГ смеси с добавкой Evotherm характеризовались гораздо более высоким показателем устойчивости к колееобразованию, чем смеси

с Sylvaroad. При 50%-ном содержании АГ число циклов до достижения максимальной глубины колеи для смеси ТАС с Evotherm было примерно в шесть раз выше, чем для смеси ГАС, тогда как для смеси ТАС с Sylvaroad значение было примерно в четыре раза выше, чем для смеси ГАС. При 70%-ном содержании АГ значение (число циклов) для смеси ТАС с Evotherm было примерно в 21 раз выше, чем значение ГАС, а значение для ТАС с Sylvaroad было примерно в семь раз выше, чем у контрольной смеси ГАС.

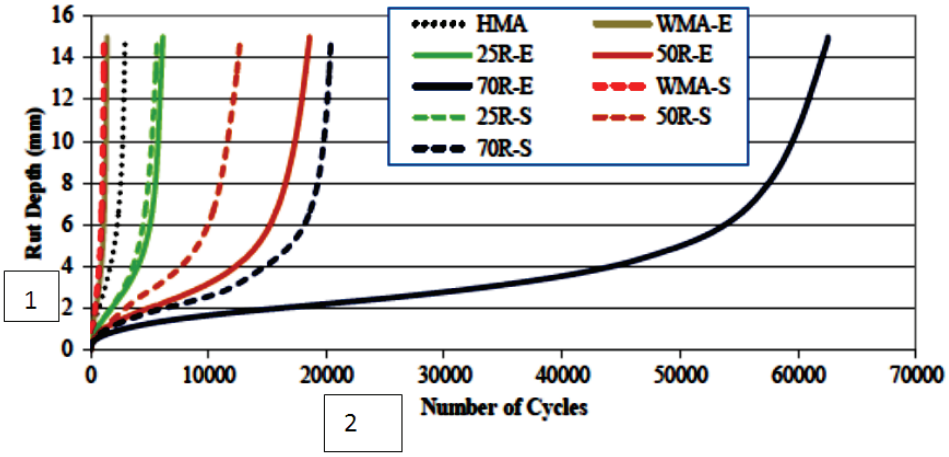


Рис. 78. Изменение глубины колеи в зависимости от числа циклов в ходе испытания прокатыванием нагруженного колеса: 1 — глубина колеи, мм; 2 — число циклов

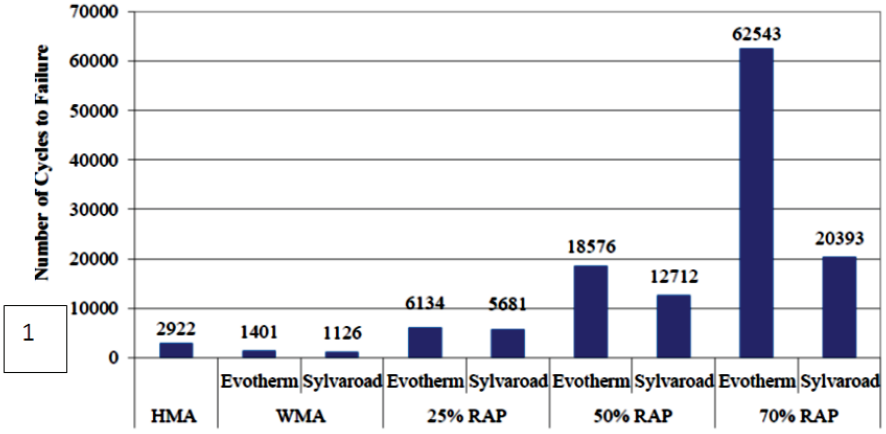


Рис. 79. Число циклов нагружения до достижения максимальной глубины колеи величиной 15 мм: 1 — число цикло до разрушения; HMA (Hot Mix Asphalt) — горячая асфальтобетонная смесь; WMA (Warm Mix Asphalt) — теплая асфальтобетонная смесь; Evotherm, Sylvaroad — добавки; RAP — АГ

Результаты показывают, что вяжущее в АГ было жестким, и это компенсирует мягкость вяжущего в ТАС; таким образом, устойчивость смеси ТАС к колееобразованию повысилась. Содержание вяжущего в смесях ТАС-АГ также могло бы способствовать повышению стойкости к колееобразованию, поскольку оптимальное содержание вяжущего смесей ТАС-АГ было ниже, чем у ГАС и ТАС. Однако, несмотря на то, что при невысоком содержании вяжущего увеличивается жесткость (Харви и Цай (Harvey and Tsai), 1996) [27] и повышается устойчивость к колееобразованию, влияние вяжущего, содержащегося в АГ, на свойства смеси неоспоримо. Поскольку вяжущее в ТАС более мягкое, чем в ГАС, а вяжущее в составе АГ намного более жесткое, то, чем выше содержание АГ, повышается жесткость вяжущего в ТАС и, следовательно, устойчивость смеси ТАС к колеебразованию.

Несмотря на то, что ранжирование смесей (таблица 21) по их устойчивости к колееобразованию, определенной по результатам испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок и испытания прокатыванием нагруженного колеса, было относительно схожим, следует отметить незначительную разницу для смесей 70R-S (70% АГ — добавка *Sylvaroad*) и 50R-E (50% АГ — *Evotherm*).

Таблица 21

Ранжирование смесей по степени стойкости к колееобразованию

Рейтинг — от наименее стойких до более стойких	***Динамический модуль упругости (Dynamic creep test)***	***Колееобразование прокатыванием нагруженного колеса (Wheel-tracking test)***
1	WMA-S (ТАС-S)	WMA-S
2	WMA-E (ТАС-E)	WMA-E
3	НМА (ГАС)	НМА (ГАС)
4	25R-S	25R-S
5	25R-E	25R-E
6	50R-S	50R-S
7	70R-S	50R-E
8	50R-E	70R-S
9	70R-E	70R-E

В ходе испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок смесь 50R-E характеризовалась бóльшей стойкостью к колееобразованию, чем смесь 70R-S, в то время как в ходе испытания прокатыванием нагруженного колеса тенденция была противоположной. В ходе данного исследования для испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок использовали те же образцы, что и для испытания по определению динамического модуля, основываясь на предположении, что последнее является неразрушающим испытанием; таким образом, образцы считались неповрежденными после испытания по определению динамического модуля. Тем не менее, минимальные повреждения могли иметь место в ходе испытания по определению динамического модуля (Элсеифи с сотр. (Elseifi et al.), 2014) [28], что, возможно, отразилось на различиях в ранжировании двух смесей. Другая возможная причина заключается в том, что плиты, подготовленные для испытания нагруженным колесом, уплотнялись с помощью секторного уплотнителя, а цилиндрические образцы для испытания на ползучесть под действием динамических нагрузок были уплотнены гирационным уплотнителем. *Поскольку два режима уплотнения различны, распределение частиц минерального заполнителя образцов в каждом режиме не будет одинаковым*. Это может повлиять на механические свойства уплотненных асфальтобетонных смесей. Из открытых источников сообщалось, что из двух типов уплотнения можно получать образцы, в большей степени подобные полевым кернам при помощи секторного уплотнителя, а не путем гирационного уплотнения (Свиертз с сотруд. (Swiertz et al.), 2010) [29].

Как испытания на влагостойкость и на выносливость к усталости, так и испытание на устойчивость к колееобразованию было расширено для случаев ТАС с 50% и 70% АГ, при содержании вяжущего в количестве 4,6% для оценки влияния увеличения содержания вяжущего на устойчивость к колееобразованию смесей ТАС-Evotherm с высоким содержанием АГ. Как видно из рисунка 80, устойчивость к колееобразованию смесей ТАС с 50% и 70% АГ снизилась относительно стойкости соответствующих смесей с оптимальным содержанием вяжущего. Но смесь ТАС с 50% и 70% АГ, при содержании вяжущего в количестве 4,6%, по-прежнему показыва-

ет значительно большую устойчивость к колееобразованию, чем смесь 25R-E. Этот результат еще раз подтверждает, что *оптимальное содержание вяжущего*, принятое в этом исследовании, значительно повлияло на стойкость к колееобразованию, как обсуждалось выше.

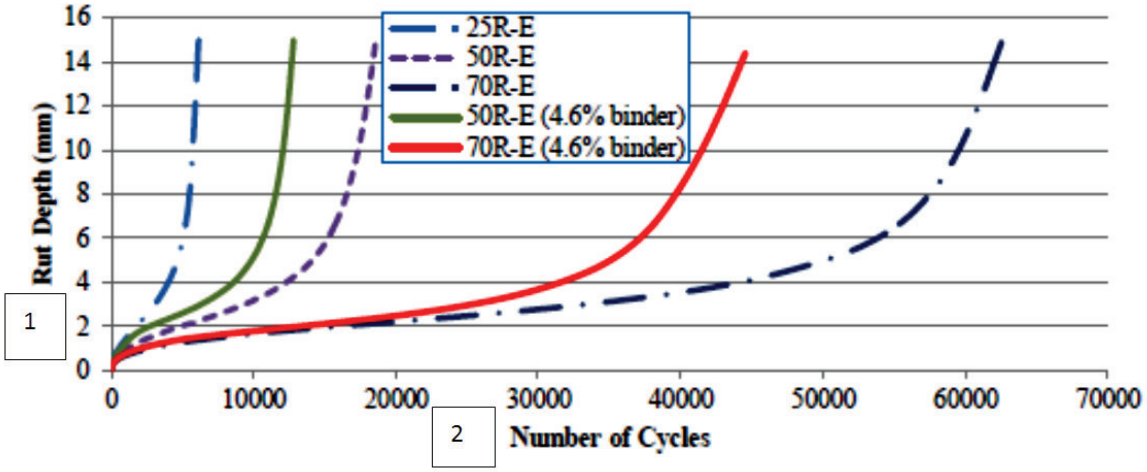


Рис. 80. Изменение глубины колеи в зависимости от числа циклов нагружения смеси с более высоким содержанием вяжущего: 1 — глубина колеи, мм; 2 — число циклов; 3 — binder — вяжущее

Таким образом, представленное исследование состоит из двух основных частей:

— изучение теплых асфальтобетонных смесей (ТАС), с высоким содержанием асфальтогранулобетона (АГ);
— оценка потенциальной возможности испытания прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца для определения характеристик состояния асфальтобетонной смеси.

В первой части приведены результаты лабораторных испытаний, выполненных *Транспортной лабораторией, Университет Кентербери (Новая Зеландия),* для оценки характеристик смесей ТАС-АГ, которые затем сравнивались с характеристиками горячей асфальтобетонной смеси (ГАС), используемой в качестве контрольной. Количество вводимого АГ варьировались от 0% до 70%, с использованием одного типа вяжущего и двух типов теплых добавок.

Во второй части исследования были изучены основные свойства асфальтобетонных смесей по результатам испытания прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца. Эксперименты проводились на образцах с надрезами на четырех различных глубинах и двумя вариантами количества воздушных пустот. Кроме того, максимальное напряжение смесей в ходе испытания прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца сравнивалось с величинами предела прочности при косвенном растяжении. На основе полученных результатов были сделаны выводы и предложены рекомендации.

Выводы и результаты исследований теплых асфальтобетонных смесей с высоким содержанием АГ

1. Как добавка Evotherm, так и добавка Sylvaroad способствовали уменьшению вязкости вяжущего с увеличением содержания добавки. При приготовлении опытных образцов вяжущих Evotherm вводили в количестве 0,5% по массе вяжущего, а Sylvaroad — 2%. При добавлении Sylvaroad отмечалось большее снижение вязкости вяжущего, чем при добавлении Evotherm.

2. Добавка Evotherm улучшала обволакивание и адгезию между частицами минерального заполнителя и вяжущего в смесях ТАС-АГ, что значительно повышало их влагостойкость. Смеси с Evotherm характеризовались лучшей влагостойкостью, чем ГАС и смеси с добавкой Sylvaroad. ТАС и ТАС с 25% АГ и с добавкой Evotherm характеризовались коэффициентами прочности при растяжении (англ. tensile strength ratios, TSR) величиной *более 80%,* тогда как ТАС-

Evotherm с 50% и 70% АГ показывали значения TSR более 70%. Добавка Sylvaroad оказывала незначительное влияние на влагостойкость смесей. ГАС и все смеси с добавкой Sylvaroad не соответствовали пороговому значению TSR 80%, и в этих смесях наблюдалось значительное адгезионное-когезионное разрушение.

3. Сочетание добавок Sylvaroad и Evotherm значительно улучшало влагостойкость смесей ТАС-АГ. Все их значения TSR были равны или превышали 80%.

4. Добавки ТАС не только уменьшали вязкость вяжущего, но также способствовали снижению термоустойчивости смесей. ТАС характеризуются более низкой устойчивостью к колееобразованию, чем ГАС, независимо от типа добавки. ТАС с добавкой Sylvaroad обладали наибольшей устойчивостью к усталостному растрескиванию, в то время ГАС показали лучшую усталостную прочность, по сравнению с ТАС-Evotherm.

5. При введении АГ в состав смесей увеличивалась их жесткость, при этом значительно повышалась устойчивость к колееобразованию, но уменьшалась усталостная прочность. Это указывает на то, что колееобразование не является проблемой при использовании смесей ТАС-АГ, тогда как явление усталостной прочности по-прежнему требует более углубленного изучения. Смеси с добавкой Sylvaroad показали лучшие значения усталостной прочности, чем смеси с добавкой Evotherm, но более низкие значения стойкости к колееобразованию.

6. В ходе данного исследования оптимальное содержание вяжущего было снижено при добавлении большего количества АГ в ТАС. Это значительно повлияло на устойчивость к колееобразованию, усталостную прочность и влагостойкость. Данное заключение было сделано на основании многочисленных испытаний, в ходе которых содержание вяжущего в смесях ТАС с 50% и 70% АГ и с добавкой Evotherm было увеличено, чтобы соответствовало содержание вяжущего в ТАС с 25% АГ. Смеси ТАС-50% и 70% с АГ характеризовались лучшей влагостойкостью и значительным повышением усталостной прочности. Устойчивость к колееобразованию уменьшалась с увеличением содержания вяжущего, но по-прежнему была значительно выше, по сравнению со смесью ТАС-25% АГ и с контрольной ГАС.

7. В ходе данного исследования было установлено, что добавление Evotherm в количестве 0,5% может оказаться недостаточным, в этом случае рекомендуется увеличение ее количества. Отмечалось, что при увеличении содержания АГ необходимо повышение температур смешивания, содержания вяжущего или количества добавок для улучшения эксплуатационных характеристик смесей. Рекомендуется проведение дальнейшего исследования по изучению увеличения содержания добавки Evotherm при увеличении содержания АГ.

8. Для обеспечения требуемых характеристик усталостной прочности для смесей с добавкой Evotherm максимальное содержание АГ в ТАС не должно превышать 50% от общей массы смеси, если увеличивается содержание вяжущего. В условиях жаркого климата, где основным видом разрушения является колейность, в то время как явление усталостного растрескивания не является особой проблемой, содержание АГ может быть увеличено до 70%.

9. Для смесей с добавкой Sylvaroad содержание АГ может быть увеличено до 70%, если влагостойкость смеси будет удовлетворять требованиям и/или если содержание вяжущего увеличить для обеспечения требуемой усталостной прочности. Проблема влагостойкости смесей с добавкой Sylvaroad может быть решена путем дополнительного введения в смесь добавки Evotherm, что в свою очередь позволит использовать АГ в количестве 70%.

Выводы и результаты исследований по определению прочности на растяжение при изгибе полукруглого образца

Испытание по методу на полукруглый изгиб (semi-circular bending, SCB) на образцах диаметром 100 мм выполнялось с использованием состава АС10. Испытание также может применяться для получения показателя прочности при растяжении асфальтобетона взамен испытания на прочность при косвенном растяжении.

1. Было установлено, что глубина разреза образцов от 5–15 мм подходит для испытания по методу на полукруглый изгиб с использованием образцов диаметром 100 мм.

2. Минимальная толщина образца диаметром 100 мм для испытания по методу на полукруглый изгиб должна составлять 30 мм.

3. Опытные образцы с трещинами, которые не генерируются от верхней части надреза, а также разрушение, которых происходит при нагружении, или имеющие не более одной крупной трещины, должны быть удалены и заменены другими с целью получения достоверных результатов испытаний.

4. Испытание по методу на полукруглый изгиб с использованием образцов диаметром 100 мм может дать достоверные и воспроизводимые результаты испытаний для оценки устойчивости к разрушению асфальтобетонных смесей.

Литература

1. Yang, S., Lee, J., Hwang, S., Kwon, S., and Baek, C. 2012. Development of warm-mix asphalt additive and evaluation of performance. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (2294): 89–97.

2. Zaumanis, M. 2010. Warm mix asphalt investigation. Master thesis, Faculty of Civil Engineering, Institute of Transportation, Riga Technical University. Denmark.

3. Dinis-Almeida, M., Castro-Gomes, J., and Antunes, M.d.L. 2012. Mix design considerations for warm mix recycled asphalt with bitumen emulsion. Construction and Building Materials, 28 (1): 687–693.

4. Zhao, S., Huang, B., Shu, X., Moore, J., and Bowers, B. 2015. Effects of WMA Technologies on Asphalt Binder Blending. Journal of Materials in Civil Engineering, 28 (2): 04015106.

5. Hill, B., Behnia, B., Buttlar, W. G., and Reis, H. 2013. Evaluation of Warm Mix Asphalt Mixtures Containing Reclaimed Asphalt Pavement through Mechanical Performance Tests and an Acoustic Emission Approach. Journal of Materials in Civil Engineering, 25 (12): 1887–1897.

6. Rogers, W. 2011. Influence of warm mix additives upon high RAP asphalt mixes. Ph.D thesis, Clemson University.

7. Guo, N., You, Z., Zhao, Y., Tan, Y., and Diab, A. 2014. Laboratory performance of warm mix asphalt containing recycled asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 64: 141–149. Page 84.

8. Nejad, F. M., Azarhoosh, A., Hamedi, G. H., and Roshani, H. 2014. Rutting performance prediction of warm mix asphalt containing reclaimed asphalt pavements. Road Materials and Pavement Design, 15 (1): 207–219.

9. Mallick, R. B., Kandhal, P. S., and Bradbury, R. L. 2008. Using warm-mix asphalt technology to incorporate high percentage of reclaimed asphalt pavement material in asphalt mixtures.

Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2051 (1): 71–79. Page 86.

10. Mo, L., Li, X., Fang, X., Huurman, M., and Wu, S. 2012. Laboratory investigation of compaction characteristics and performance of warm mix asphalt containing chemical additives. Construction and Building Materials, 37: 239–247.

11. Zhao, W., Xiao, F., Amirkhanian, S. N., and Putman, B. J. 2012. Characterization of rutting performance of warm additive modified asphalt mixtures. Construction and Building Materials, 31: 265–272. Page 90.

12. Zhang, J. 2010. Effects of warm-mix asphalt additives on asphalt mixture characteristics and pavement performance. MSc thesis. University of Nebraska — Lincoln. (http://digitalcommons.unl.edu/civilengdiss/12).

14. Lee, S.-J., Amirkhanian, S. N., Park, N.-W., and Kim, K. W. 2009. Characterization of warm mix asphalt binders containing artificially long-term aged binders. Construction and Building Materials, 23 (6): 2371–2379.

15. Shu, X., Huang, B., Shrum, E. D., and Jia, X. 2012. Laboratory evaluation of moisture susceptibility of foamed warm mix asphalt containing high percentages of RAP. Construction and Building Materials, 35: 125–130.

16. Zhao, S., Huang, B., Shu, X., and Woods, M. 2013. Comparative evaluation of warm mix asphalt containing high percentages of reclaimed asphalt pavement. Construction and Building Materials, 44: 92–100.

17. Artamendi, I., and Khalid, H. A. 2006. A comparison between beam and semi-circular bending fracture tests for asphalt. Road Materials and Pavement Design, 7 (sup1): 163–180.

18. Li, X.-J., and Marasteanu, M. 2010. Using semi circular bending test to evaluate low temperature fracture resistance for asphalt concrete. Experimental mechanics, 50 (7): 867–876.

19. Huang, B., Shu, X., and Zuo, G. 2013. Using notched semi circular bending fatigue test to characterize fracture resistance of asphalt mixtures. Engineering Fracture Mechanics, 109: 78–88.

20. Lancaster, I., Khalid, H., and Kougioumtzoglou, I. 2013. Extended FEM modelling of crack propagation using the semi-circular bending test. Construction and Building Materials, 48: 270–277.

21. Huang, B., Shu, X., and Tang, Y. 2005. Comparison of semi-circular bending and indirect tensile strength tests for HMA mixtures. Advances in Pavement Engineering, 16: 225–227.

22. Arabani, M., and Ferdowsi, B. 2009. Evaluating the semi-circular bending test for HMA mixtures. International Journal of Engineering A: Basics, 22 (1): 47–58.

23. Molenaar, A., Scarpas, A., Liu, X., and Erkens, S. 2002. Semi-circular bending test; simple but useful? Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, 71.

24. Saha, G., and Biligiri, K. P. 2015. Fracture damage evaluation of asphalt mixtures using Semi-Circular Bending test based on fracture energy approach. Engineering Fracture Mechanics, 142: 154–169. Page 87.

25. Bonaquist, R. F. 2008a. Refining the simple performance tester for use in routine practice. Vol. 614. Transportation Research Board.

26. Bonaquist, R. F. 2008b. Ruggedness testing of the dynamic modulus and flow number tests with the simple performance tester. Vol. 629. Transportation Research Board.

27. Harvey, J., and Tsai, B.-W. 1996. Effects of asphalt content and air void content on mix fatigue and stiffness. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board (1543): 38–45.

28. Elseifi, M. A., Mohammad, L. N., Kassem, E., Ying, H., and Masad, E. 2014. Damage in asphalt concrete during the dynamic complex modulus and flow number tests. Asphalt Pavements — Proceedings of the International Conference on Asphalt Pavements, ISAP 2014: 71–78.

29. Swiertz, D., Mahmoud, E., and Bahia, H. 2010. Asphalt mixture compaction and aggregate structure analysis techniques: State of the art report. RILEM Technical Committee. Page 88.

ПРИЛОЖЕНИЕ

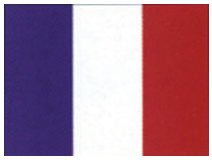
Общие сведения об используемых технических средствах типа ALT (Accelerated Load Testing), предназначенных для исследований поведения дорожных покрытий

Дания

DRTM (Danish Road Testing Machine), Lyngby

Краткое описание:
Датская установка DRTM предназначена для тестирования конструкций дорожных одежд представляет собой линейный стенд для полномасштабного испытания дорожной одежды путем приложения колесной нагрузки величиной до 65 кН (14300 фунтов) при скорости движения до 30 км/ч (18,6 миль/ч). Дорожная одежда устроена в выемке, контроль температуры дорожной одежды осуществляется в диапазоне от –10°C до +30°C (14 °F до 86 °F).

http://www.dtu.dk/



Франция

LCPC
Центральная лаборатория мостов и дорог

Краткое описание:
Крупнейший кольцевой испытательный стенд — полигон, находящийся в эксплуатации и принадлежащий Центральной лаборатории мостов и дорог (LCPC), расположен вблизи г. Нанта. На полигоне имеется система нагружения, снабженная тележками со сдвоенными колесами, расположенными на концах четырех стрел, две из которых движутся по внутренней дорожке диаметром 30 м (100 футов), а две других — по внешней, диаметром — 40 м (131 фут). Нагрузка на сдвоенное колесо может составлять от 40 до 75 кН (от 8 000 до 16 520 фунтов) при скорости движения колеса до 105 км/ч (65 миль/ч). Имеется возможность моделирования нагрузки до 280 кН (61 500 фунтов) при использовании двухосных тележек при невысоких скоростях; возможно также имитирование нагрузки на одиночное колесо. Первые испытания были выполнены в 1978 г. Программа *Ускоренного испытания конструкций дорожной одежды на базе полигона в г. Нанте,* в рамках которой выполняются масштабные научные исследования в тесном сотрудничестве с промышленными предприятиями и является одной из наиболее успешных и эффективных в мире.

http://www.lames.ifsttar.fr/en/the-institute/mast/laboratories/lames/equipments/the-fatigue-carrousel/

Германия

BASt (Bergisch Gladbach)
Научный центр Федерального дорожно-исследовательского института

Краткое описание:
Немецкая установка по ускоренному испытанию конструкций дорожной одежды, находящаяся в Научном центре Федерального дорожно-исследовательского института (BASt) уникальна по техническому оснащению. Система импульсного нагружения снабжена тремя гидравлическими плоскими нагрузочными тележками. Тележки, при помощи которых обеспечивается импульсное нагружение, движутся по опытной секции, моделируя дорожное движение со скоростью примерно 20 км/ч (12, 5 миль/ч), при этом нагрузка может достигать 200 кН (44 000 фунтов). Данное оборудование было введено в эксплуатацию в 1963 г.

https://www.bast.de/cln_032/nn_43710/EN/e-BASt/e-bast-node.html?__nnn=true

Нидерланды

Стенд LINTRACK
Delft University of Technology (DUT)

Краткое описание**:**
В Автомобильно-дорожной и железнодорожной исследовательской лаборатории Технического университета г. Делфта имеется линейное сооружение — стенд LINTRACK (однополосная дорожка). Стенд был введен в эксплуатацию в 1991 г. Установка с колесом для нагружения позволяет использовать одиночное, сдвоенное и специальное одиночное колесо при нагрузках от 15 до 100 кН (от 3 300 до 22 000 фунтов), при скорости движения по полосе наката 20 км/ч (12,5 миль/ч). Длина полосы, по которой колесо движется с постоянной скоростью, составляет 3,5 метра (11,5 футов). Нагрузка распределяется в поперечном направлении на расстоянии в 1 м с каждой стороны от средней линии. Сама же конструкция крепится на рельсы на рабочей площади длиной 55 метров (180 футов), где с помощью дополнительного специального оборудования могут быть устроены поперечные секции. Установка для нагружения размещается в помещении, оборудованном датчиками контроля температуры.
Цель исследований, выполненных с использованием установки LINTRACK, заключается в проверке эмпирических и теоретических моделей колеебразования и трещинообразования нежестких дорожных одежд, оценке вредного воздействия различных конфигураций колеса, а также изучении эффективности инновационных конструкций дорожных одежд.

www.tudelft.nl

Швеция

Финляндия

NORDIC-HVS
Swedish National Road and Transport Research Institute Technical Research Center of Finland
Имитатор автомобильной нагрузки HVS Mark IV Шведский национальный исследовательский институт по дорогам и транспорту (VTI),
Технический исследовательский центр Финляндии, Финская национальная дорожная администрация

Краткое описание:
В Финляндии и Швеции имеется совместная программа APT с использованием имитатора автомобильной нагрузки HVS Mark IV. Установка находится в совместной собственности Технического исследовательского центра Финляндии, Финской национальной дорожной администрации и Шведского национального исследовательского института по дорогам и транспорту (VTI). Шведская национальная дорожная администрация оказывает поддержку VTI, покрывая его долю капитальных затрат. Установка HVS- Nordic (оборудование для линейного полномасштабного ускоренного испытания конструкций дорожных одежд) первоначально находилась в Финляндии в 1997 и 1998 годах, а затем в Швеции — с 1998 по 2000 год. В Финляндии находится в ведении Технического исследовательского центра, а в Швеции — в VTI. Нагружаемые колеса HVS- Nordic могут быть сдвоенными или одиночными со стандартной или широкой шинами. Полоса наката (движения) в поперечном направлении составляет ± 750 мм, а нагрузка на колесо может варьироваться от 20 кН до 110 кН со скоростью до 15 км/ч. Оборудование HVS- Nordic уникально тем, что является передвижным, с возможностью изменения синусоидальной динамической нагрузки в диапазоне ± 20 %, с полным контролем температуры.

https://www.vti.se/en/
https://www.vttresearch.com/

Румыния

Круговой испытательный полигон (г. Ясы)
The Technical University of Iassy

Краткое описание:
В 1957 г. Техническим университетом г. Яссы, в эксплуатацию был введен круговой испытательный полигон диаметром 10 м (32 футов). После того, как было испытано более чем 40 конструкций дорожных одежд, испытательное оборудование было заменено в 1982 г. круговым стендом диаметром 15 м (51 футов). Объект был реконструирован в 1999 г.

http://www.tuiasi.ro/

Словакия

Круговой стенд (г. Братислава)

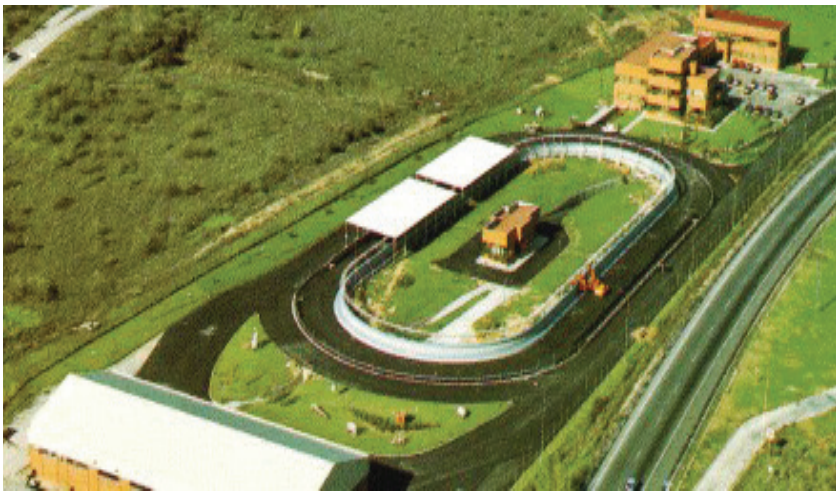
Краткое описание:
Круговой стенд, работающий в Вуи-Чести (Vuis-Cesty), Братислава, был введен в эксплуатацию в 1994 г. Диаметр внешней круговой дорожки составляет 32 м (105 футов). Оборудование имеет три стрелы, каждая из которых снабжена полным мостом грузового автомобиля (4 колеса). Эксплуатационная скорость составляет от 10 до 50 км/ч (от 7 до 31 миль/ч).

http://www.vuis-cesty.sk/

Испания

Полигон (Centro de Estudios Carreteras CEC)

Краткое описание:
Испания располагает крупным сооружением, находящимся в Дорожном исследовательском центре (Centro de Estudios Carreteras CEC) вблизи г. Мадрида. Данная организация входит в состав Центра изучения и экспериментов, связанных со строительными работами (Centro де Estudios y Experimentacion de Obras Publicas (CEDEX)), находящимся в ведении Министерства общественных работ, транспорта и охраны окружающей среды. Полигон состоит из двух параллельных прямых участков из трех секций длиной 25-м (82 футов), соединенных по окружности.
Устройство опытных участков производится при помощи традиционной строительной техники в U-образном бетонном основании, шириной 8 м (26,2 футов) и глубиной 2,6 м (8,5 футов), который позволяет контролировать влажность грунта основания дорожной одежды. Нагружение выполняется двумя тележками, направляемыми по внутреннему периметру стена, на которые можно устанавливать одно, два или три колеса, с одиночной или сдвоенной шинами на полуоси. Приложение нагрузки обеспечивается под действием силы тяжести при скорости до 60 км/ч (37 миль /ч), нагрузка на ось составляет от 110 до 150 кН (24 200 до 33 000 фунтов). Исследование дорожной одежды осуществляется из центра управления при помощи контрольно-измерительных приборов, а также с использованием двух автомобилей.



http://www.cedex.es/CEDEX/lang_castellano/

Швейцария

Линейный и круговой стенды АРТ

Краткое описание:
В Швейцарии эксплуатируются две установки АРТ, одна из которых линейный стенд смонтирована в Федеральной политехнической школе г. Лозанны (EPFL — Ecole Polytechnique Federal de Lausanne), где используют имитаторы автомобильной нагрузки (HVS), а также круговой стенд в Федеральной политехнической школе г. Цюриха (EPFZ — Ecole Polytechnique Federal de Zurich).

Линейный стенд АРТ в EPFL, г. Лозанна

Круговый стенд АРТ в EPFL, г. Цюрих

https://www.ethz.ch/de.html

Великобритания

Установки для испытания дорожной одежды
Университет Ольстера (PTF)
Транспортная исследовательская лаборатория (TRR)

Краткое описание:
В Великобритании имеется две установки: одна — в Транспортной исследовательской лаборатории (TRR) и вторая — в Университете Ольстера (PTF). Установка для испытания дорожной одежды (PTF) в Лаборатории транспортных исследований (TRL) Великобритании была введена в эксплуатацию в 1985 г. При помощи установки PTF обеспечивается нагружение по одной полосе или двум полосам наката на одиночную или сдвоенную шину грузами величиной до 102 кН (22500 фунтов). Эксплуатационная скорость составляет 20 км / ч (12,5 миль / ч) на опытном участке длиной 6,7 м (22 футов). Установка для ускоренного испытания конструкций дорожных одежд, в университете Ольстера находится в закрытом помещении. Образцы конструкций дорожных одежд, соответствующих размеров, нагружаются одиночной шиной колесом реального размера грузового автомобиля в двух направлениях.

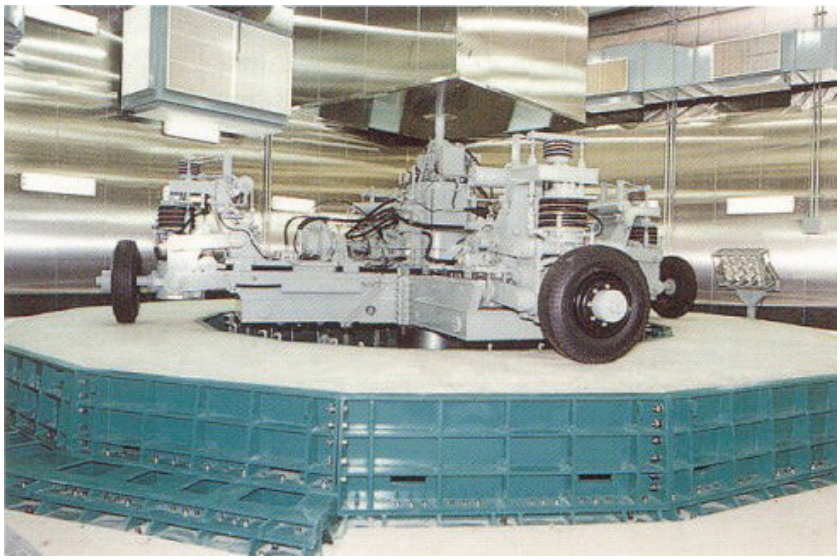
https://trl.co.uk/

Технические средства для ускоренного испытания конструкций дорожных одежд (АРТ) в Азии и Новой Зеландии

Япония

АРТ, Научно-исследовательский институт (PWRI)

Краткое описание:
В настоящее время в Научно-исследовательском институте (PWRI) эксплуатируются две установки АРТ: круговойстенд для дорожных испытаний и линейный стенд — испытательный полигон. Стенд для испытания дорожных одежд PWRI находится в эксплуатации с 1988 г. В настоящее время для проведения испытаний АРТ используют 5 грузовых автомобилей.



Круговойстенд для дорожных испытаний

Линейный стенд — испытательный полигон

https://www.pwri.go.jp/

Новая Зеландия

CAPTIF (Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility)

Краткое описание:
Стенд, предназначенный для ускоренного испытания конструкций дорожных одежд в помещении (CAPTIF -Canterbury Accelerated Pavement Testing Indoor Facility), разработанная в Кентербери (регион Австралии) была введена в эксплуатацию в Крайстчерче в 1987 г., заменив оборудование для ускоренного испытания конструкций дорожных одежд, которое было введено в эксплуатацию в 1969 г. Реалистичное динамическое нагружение создается при помощи имитатора автомобильной нагрузки. Система снабжена двумя стрелами, на которые могут быть установлены одноосные, двуосные тележки с узкими одиночными, широкими одиночными и сдвоенными колесами, двигаясь по отдельным дорожкам. Радиус нагружения — 9,26 м (30,4 фута) на полосе протяженностью 58 м (190 футов), устроенной на кольцевом стенде в яме глубиной 1,5 м (5 футов). Нагрузки от 21 до 60 кН (4600 фунтов на 10 150) могут прикладываться при скорости до 50 км/ч (31 миль/ч). Стенд разбивается на пять секций длиной 12 м (19 футов) с использованием различных нагрузок на отдельные дорожки (полосы наката) для получения 10 опытных участков, которые, как правило, испытываются до 1 миллиона циклов нагружения.

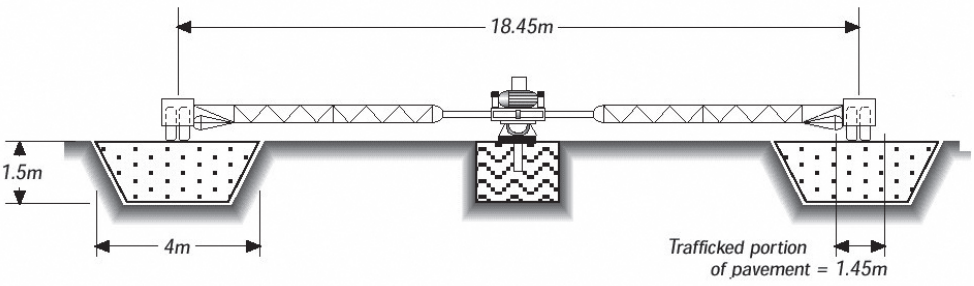


Схема стенда

https://www.nzta.govt.nz/