

ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ  
СТРОИТЕЛЬСТВА И АРХИТЕКТУРЫ

*На правах рукописи*

**Ромасюк Евгений Александрович**

**ДОРОЖНЫЕ АСФАЛЬТОПОЛИМЕРБЕТОНЫ С КОМПЛЕКСНО-  
МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ ПОВЫШЕННОЙ  
УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ**

05.23.05 – строительные материалы и изделия

**Диссертация**

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:

Братчун Валерий Иванович,

доктор технических наук,  
профессор, заслуженный деятель  
науки и техники Украины

Идентичность всех экземпляров  
диссертации ПОДТВЕРЖДАЮ:  
Ученый секретарь диссертационного  
совета Д 01.006.02

Я. В. Назим



Макеевка – 2015 г.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>5</b>
<b>РАЗДЕЛ 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ЕГО СТРУКТУРЫ .....</b>	
1.1 Условия работы асфальтобетона в покрытии нежесткой дорожной одежды под действием транспортных нагрузок .....	12
1.2 Факторы, определяющие усталостную долговечность асфальтобетонных покрытий .....	20
1.3 Основные критерии, характеризующие усталостную долговечность асфальтобетона .....	38
1.4 Способы повышения усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий нежестких дорожных одежд.....	48
Выводы по разделу 1 .....	58
<b>РАЗДЕЛ 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЙ .</b>	<b>61</b>
2.1. Предполагаемые закономерности формирования структуры модифицированных асфальтобетонов, характеризующихся повышенной усталостной долговечностью .....	61
2.2. Программа экспериментальных исследований.....	71
Выводы по разделу 2 .....	71
<b>РАЗДЕЛ 3. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>73</b>
3.1 Характеристика материалов, принятых для исследования .....	73
3.2. Методы экспериментальных исследований .....	77
Выводы по разделу 3 .....	90
<b>РАЗДЕЛ 4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ДЕФОРМАЦИОННО- ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСФАЛЬТОВЯЖУЩИХ И АСФАЛЬТОБЕТОНОВ С КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ.....</b>	
	91

4.1. Влияние принятых полимерных добавок на физико-механические свойства модифицированных дорожных битумов .....	91
4.2. Исследование температуры хрупкости комплексно-модифицированных асфальтовяжущих веществ.....	95
4.3. Исследование деформационно-прочностных показателей комплексно-модифицированных асфальтовяжущих .....	99
4.4. Оптимизация асфальтовяжущего вещества состава «битум – Elvaloy-АМ и ПФК-105 – минеральный порошок, поверхностно активированный Elvaloy-АМ».....	103
4.5. Определение оптимального содержания битума и принятых полимерных модификаторов на поверхности минеральных материалов, обеспечивающих повышенные деформационно-прочностные свойства асфальтобетона .....	106
Выводы по разделу 4 .....	113
<b>РАЗДЕЛ 5. ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ .....</b>	<b>115</b>
5.1. Усталостная долговечность асфальтополимербетонов в зависимости от температурных условий и режимов нагружения .....	115
5.2. Влияние агрессивных сред на усталостную долговечность модифицированных асфальтобетонов .....	130
5.3. Исследование влияния усталостной долговечности в зависимости от температуры производства асфальтобетонной смеси .....	134
Выводы по разделу 5 .....	137
<b>РАЗДЕЛ 6. ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>139</b>
6.1. Рекомендации по производству и применению модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности .....	139
Выводы по разделу 6 .....	150
<b>ВЫВОДЫ.....</b>	<b>151</b>

<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....</b>	<b>153</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ А.....</b>	<b>169</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ Б.....</b>	<b>170</b>
<b>ПРИЛОЖЕНИЕ В.....</b>	<b>171</b>

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы.** Автомобильные дороги являются важной частью единой транспортной системы государства и в значительной мере влияют на его социально-экономическое развитие. В последние годы на дорогах первой, второй и третьей технических категорий России и Украины наблюдается значительный рост среднегодовой суточной интенсивности движения [1]. При этом постоянно увеличивается доля большегрузных автомобилей, среди которых значительную часть занимают крупнотоннажные многоосные автопоезда. Вследствие этого дорожное покрытие испытывает воздействие многократных циклических нагрузок, которые приводят к развитию в материале усталостных разрушений, характерных для всех материалов, применяемых для строительства конструктивных слоев дорожной одежды. В результате комплексного воздействия атмосферных факторов и транспортных нагрузок снижается усталостная долговечность дорожного покрытия, возникают макроскопические трещины, увеличивается водопроницаемость слоев и, как следствие, снижается срок службы дорожного покрытия [2 – 7].

В настоящее время основным материалом для устройства покрытий нежестких дорожных одежд автомобильных дорог является дорожные асфальтобетонные смеси. В тоже время опыт эксплуатации отечественных дорог показывает, что 51,1 % асфальтобетонных покрытий не отвечают требованиям ровности, 39,2 % – прочности [1], при этом реальный срок службы асфальтобетонных покрытий на 5 – 8 лет меньше расчетных (нормативных) [8].

Преждевременная потеря деформативной способности асфальтобетона происходит вследствие неудовлетворительного качества отечественных битумов [1, 6 – 9]. Применяемые в Украине нефтяные дорожные битумы (ДСТУ 4044-2001 «Бітуми наftovі дорожні в'язкі. Технічні умови») характеризуются неудовлетворительными значениями температур размягчения, хрупкости и низкими адгезионно-когезионными показателями [8 – 12]. Следовательно, отечественные битумы не в состоянии удовлетворять требованиям современных условий эксплуатации асфальтобетонных покрытий и требуют принципиального изменения состава, структуры и свойств.

Теоретические и экспериментальные исследования в области повышения долговечности дорожных покрытий показывают, что наиболее перспективным способом повышения деформационно-прочностных характеристик асфальтобетона, эксплуатируемого под воздействием интенсивных транспортных нагрузок является введение в состав органических вяжущих небольшого количества полимерных добавок (каучуков, термопластичных и термоэластичных полимеров, и др.) [5, 7, 9 – 15].

**Степень разработанности темы исследования.** Теоретической основой для выполнения исследований в области разработки составов модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечностью асфальтобетонов являются работы Г. С. Бахраха [6, 16], В. И. Братчуна [12], Л. Б. Гезенцевя [7, 17], Л. М. Гохмана [103], В. А. Золотарева [4], Н. Н. Иванова [18, 19], С. К. Илиополова [21, 22], А. М. Кривисского [24], А. В. Руденского [5, 20], В. М. Смирнова [25], Б. Б. Телтаева [23], Е. В. Угловой [22, 26], F. N. Hveem [27], C. L. Monismith [28, 29], P. Pell [30, 31], P. S. Shaw [32] и других отечественных и зарубежных исследователей. Однако, имеющиеся сведения, особенно в области экспериментальных исследований усталостной долговечности комплексно-модифицированных асфальтобетонов, не достаточно изучены.

К настоящему времени наиболее полно изучено влияние величины частоты и времени действия нагрузки; количества циклов ее приложения; температурных условий испытаний [18, 20 – 31]. В то же время недостаточно изучено комплексное влияние действия водонасыщения и агрессивных сред, процессов старения органического вяжущего на усталостное разрушение асфальтобетона. Отсутствуют сравнительные данные о влиянии комплексного модифицирования макро-, мезо- и микроструктуры асфальтобетона с использованием различных комплексных добавок: полимер + поверхность-активные вещества (ПАВ), полимер + активный наполнитель на усталостную долговечность асфальтобетона под действием кратковременных циклических и длительных статических нагрузок. Не достаточно изучены вопросы усталостной прочности литьих и щебеночно-мастичных асфальтобетонов (ЩМА).

Таким образом, целесообразно, прежде всего, экспериментальное изучение

усталостных процессов и разработка способов повышения долговечности модифицированных асфальтобетонов, в частности, асфальтополимербетонов. К тому же, наиболее полное изучение вопроса о долговечности асфальтобетона подразумевает проведение комплекса исследований, которые позволяют учесть влияние на нее таких факторов, как: состав, свойства составляющих, структура, температурные условия, водонасыщение и влияние агрессивных сред, старения органического вяжущего.

**Связь работы с научными программами, планами, темами.** Основные исследования теоретического и прикладного характера осуществлены при выполнении госбюджетных прикладных научно-исследовательских работ: Д-2-03-11 «Разработка новых высококачественных композиционных материалов стойких к коррозии и высокопрочных бетонов, исследование их работы в условиях объемно-напряженного состояния и повышенных температур» № 0111U001805 (заказчик Министерство образования и науки Украины, 2011 – 2012 гг.); Д-2-04-13 «Новые композиционные материалы для промышленного и дорожного строительства, которые отличаются повышенной долговечностью, пониженней ресурсоемкостью и энергоемкостью производства» № 0113U001920 (заказчик Министерство образования и науки Украины, 2013 – 2014 гг.).

**Целью исследования** является разработка составов дорожных асфальтополимербетонных смесей с комплексно-модифицированной структурой для устройства покрытий нежестких дорожных одежд с повышенной усталостной долговечностью на основе изучения явлений и уточнения закономерностей процессов усталостного разрушения модифицированных асфальтобетонов под действием статических и кратковременных циклических нагрузок.

*Объект исследования* – дорожные асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированной структурой повышенной усталостной долговечности.

*Предмет исследования* – процессы и явления, определяющие закономерности усталостного разрушения асфальтополимербетона с комплексно-модифицированной структурой и повышения его усталостной долговечности в условиях действия длительных статических и кратковременно-циклических нагрузок.

### **Задачи исследования:**

- выполнить анализ условий работы комплексно-модифицированного асфальтополимербетона в покрытии нежесткой дорожной одежды под действием статических и кратковременных циклических нагрузений;
- сформулировать теоретические положения о закономерностях формирования структуры модифицированного асфальтобетона, обеспечивающей повышенную усталостную долговечность при длительном статическом и кратковременном циклическом нагружении;
- разработать методы испытания модифицированных асфальтовяжущих и асфальтобетонов на усталостную долговечность при растяжении на изгиб, отвечающих нагрузению дорожного асфальтобетона в покрытии на основе разработанной модели напряженно-деформируемого состояния образца при испытании на лабораторной установке;
- установить взаимосвязь между деформационно-прочностными показателями модифицированных асфальтовяжущих с комплексно-модифицированной микроструктурой и асфальтополимербетонов на их основе при воздействии длительных статических и динамических нагрузений;
- разработать и оптимизировать составы модифицированных долговечных асфальтобетонов, обеспечивающих усталостную долговечность в условиях действия длительных статических и циклических нагрузений;
- исследовать усталостную долговечность комплексно-модифицированных асфальтобетонов при действии различных температур, нагрузений, агрессивных сред.

**Научная новизна полученных результатов** состоит в следующем:

- получили дальнейшее развитие научные исследования проектирования составов дорожных асфальтополимербетонов с комплексно-модифицированной структурой, характеризующихся повышенной усталостной долговечностью, заключающиеся в модификации нефтяного дорожного битума этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой и поверхностной активацией щебня, искусственного песка и минерального порошка этиленглицидилакрилатом; асфальтополимерсеробетона, в котором нефтяной дорожный битум модифицирован бутадиен-

метилстирольным каучуком СКМС-30 (2,0 % мас.) в комплексе с технической серой (30 % мас.), а поверхность минерального порошка активирована 0,5 % СКМС-30;

- исследованы низкотемпературные прочностные характеристики асфальтобетонов с комплексно-модифицированной структурой в области отрицательных температур;
- определены оптимальные концентрационные соотношения в системах: «битум – этиленглицидилакрилат (2,0 % мас.) – полифосфорная кислота (0,2 % мас.) – этиленглицидилакрилат на поверхности минерального порошка (0,65 – 0,7 % мас.)»; «битум – этиленглицидилакрилат (2,0 % мас.) – полифосфорная кислота (0,2 % мас.) – поверхность минеральных материалов (щебень, песок, минеральный порошок) – этиленглицидилакрилат (0,7 % мас.)», а также оптимальное содержание модифицированного органического вяжущего в смесях, обеспечивающего максимальную усталостную долговечность модифицированного асфальтобетона;
- выполнен сравнительный анализ усталостной долговечности при воздействии кратковременных циклических и статических нагрузок асфальтобетонов, использующихся для устройства покрытий нежестких дорожных одежд, а именно: асфальтобетонов типов «А» и «Б», литого асфальтополимерсеробетона, щебеночно-мастичного асфальтобетона и бетонов с комплексно-модифицированной структурой;
- показано, что по усталостной долговечности модифицированные этиленглицидилакрилатом асфальтобетоны значительно превосходят традиционные асфальтобетоны, используемые для строительства верхних слоев нежестких дорожных одежд (ДСТУ Б В.2.7-119:2011, ГОСТ 9128-2013);
- исследована усталостная долговечность комплексно-модифицированных асфальтобетонов с учетом влияния различных агрессивных сред (вода, растворы солей, кислот);
- изучена усталостная долговечность асфальтобетонов в зависимости от температуры производства асфальтобетонной смеси.

#### **Практическое значение полученных результатов:**

- для ПАО «Облдорремстрой» разработаны «Рекомендации по производству и использованию модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности».

лостной долговечности»;

- определена предполагаемая экономическая эффективность от внедрения асфальтополимербетонов повышенной усталостной долговечности для ПАО «Облдорремстрой»;

- результаты теоретических и экспериментальных исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению подготовки 08.03.01 «Строительство» по профилю «Автомобильные дороги» в курсах «Строительное материаловедение» и «Физико-химическая механика строительных материалов».

**Методы исследования.** Теоретические положения сформулированы на основе положений реологии асфальтобетона, а также физической и коллоидной химии. Экспериментальные исследования выполнены с использованием стандартных и специальных методов: приборы Фрааса, Маршалла, для изучения усталостной долговечности. Для обработки и анализа результатов экспериментальных исследований использованы методы математической статистики.

**На защиту выносятся:**

- результаты теоретических и экспериментальных исследований по получению составов асфальтобетонных смесей с комплексно-модифицированной структурой, обладающих повышенной усталостной долговечностью;
- методика испытания асфальтополимербетонов на усталостную долговечность от растягивающих напряжений при изгибе при действии кратковременных циклических и статических нагрузок;
- значения усталостной выносливости асфальтополимербетонов с комплексно-модифицированной структурой при воздействии различных статических и кратковременных циклических нагрузок, температур, агрессивных сред.

**Обоснованность и достоверность** научных положений, выводов и рекомендаций подтверждаются: значениями экспериментальных данных, полученных с применением современных приборов; адекватностью статистических математических моделей структурным превращениям при комплексной модификации асфальтобетонов; соответствием результатов эксперимента теоретическим предпосылкам.

**Апробация результатов диссертации.** Основные положения диссертационной работы доложены на: Всеукраинской интернет-конференции молодых ученых и

студентов «Проблемы современного строительства» (Полтава, ПолНТУ, 21 – 22 ноября 2012 г.); Международной научно-практической конференции «Строительство-2013. Строительство. Дороги. Транспорт» (Ростов-на-Дону, РГСУ, 2013 г.); Международной научно-технической конференции «Современные технологии строительства и эксплуатации автомобильных дорог» (Харьков, ХНАДУ, 2013); Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы физико-химического материаловедения» (Макеевка, ДонНАСА, 30 сентября – 4 октября 2013 г.); Международной научно-практической конференции «Улучшение конструктивных, технологических и эксплуатационных показателей автомобильных дорог и искусственных сооружений на них в исследованиях студентов и молодых ученых» (Харьков, ХНАДУ, 2014 г.); Международной научно-практической конференции «Научно-технические аспекты комплексного развития транспортной отрасли» (Горловка, АДИ ГВУЗ «ДонНТУ», 21 – 22 мая 2015 г.); XII, XIII, XIV Международных научных конференциях молодых ученых, аспирантов и студентов (Макеевка, ДонНАСА, апрель 2013, 2014, 2015 гг.).

**Публикации.** Основные научные результаты диссертации опубликованы в 14 печатных работах, в том числе в 7 рецензируемых научных изданиях: 6 работ опубликованы в изданиях, входящих в перечень специализированных научных журналов, утверждённых МОН Украины; 1 – в издании, входящем в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утверждённых ВАК РФ.

Общий объем публикаций – 4,57 п.л., из которых 2,3 п.л. принадлежат лично автору.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, шести разделов, выводов, списка использованных источников из 151 наименования на 16 страницах, 3 приложений на 7 страницах, содержит 145 страниц основного текста, 43 рисунка, 15 таблиц.

## РАЗДЕЛ 1

# СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ПО ПОВЫШЕНИЮ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АСФАЛЬТОБЕТОНА МОДИФИЦИРОВАНИЕМ ЕГО СТРУКТУРЫ

## **1.1 Условия работы асфальтобетона в покрытии нежесткой дорожной одежды под действием транспортных нагрузок**

Изучение вопросов долговечности асфальтобетона в покрытии нежесткой дорожной одежды, требует рассмотрения действительных условий работы дорожного покрытия, характера напряженно-деформированного состояния асфальтобетона, а также возможных дефектов и разрушений покрытия [2, 3].

В процессе эксплуатации автомобильной дороги все конструктивные слои дорожной конструкции испытывают комплекс транспортных нагрузок, действие температуры, водонасыщения-высушивания, замораживания-оттаивания и других внешних факторов, в результате чего формируются напряжения различной величины и знака. Наиболее существенным является комплекс воздействий, состоящий из погодно-климатических факторов и динамического нагружения от автотранспорта. Особенностью нагрузки от транспортных средств является то, что напряжения, возникающие в материалах дорожного покрытия, могут и не превышать критических значений, однако при многократном приложении динамических механических нагрузок в асфальтобетоне развиваются усталостные процессы. Это приводит к постепенному накоплению дефектов структуры материала и образованию усталостных трещин с последующим разрушением дорожного покрытия [4, 6, 7].

Изучению работы асфальтобетона под действием динамических нагрузок посвящены работы Г. С. Бахраха, В. А. Золотарева, Н. Н. Иванова, С. К. Илиополова, Б. И. Ладыгина, Б. С. Радовского, А. В. Руденского, В. М. Смирнова, Е. В. Угловой, Б. Телтаева, F. N. Hveen, C. L. Monismith, P. S. Shaw и др. [2 – 42].

Начиная с 1940-х годов в СССР под руководством профессора

Н. Н. Иванова впервые стали проводиться исследования усталостной долговечности дорожных покрытий. Было установлено, что рост трещин на дорожном покрытии зависит от интенсивности движения транспортных средств [16].

Американские исследователи также пришли к выводу, что на величину допустимого прогиба дорожного покрытия под движущимся колесом влияет количество проездов автомобилей. Установлено, что трещины на дорожном покрытии, развиваются вследствие усталостных процессов в материалах конструктивных слоев дорожной одежды, при условии, если нагрузка повторялась несколько миллионов раз [27, 32].

Характерно, что трещинообразование и разрушение дорожных покрытий в основном вызваны многократным прогибом верхних слоев дорожной одежды, а не деформацией их основания [28].

Исследования, выполненные на дорожных покрытиях большинства штатов США [29], также подтвердили, что причина разрушения дорожной конструкции заключается в повторных изгибающих усилиях. Усталостное разрушение асфальтобетона зависит, главным образом, от нагрузки на ось колеса и скорости транспортного средства, конструкции дорожной одежды и температуры окружающей среды. Установлено [31, 32], что в отличие от статической нагрузки (наблюдаются в основном вертикальные напряжения большой величины), в результате динамических нагрузок в асфальтобетоне возникают два вида напряжений: вертикальные и горизонтальные.

Действие автомобилей на дорожное покрытие приводит к возникновению вертикальной (сжимающая) и двух горизонтальных компонент напряжений [22, 23]. Величина и характеристики продольной и поперечной касательных напряжений существенно зависят от режима движения. Возникающие в дорожной конструкции горизонтальные напряжения обусловлены тяговой силой, приложенной к ведущим колесам автомобиля, и достигают максимума при высоких скоростях движения на подъемах, торможении и разгоне. Поперечные касательные напряжения возникают от действия центробежной силы при движении автомобиля по криволинейной траектории – по кривым в плане, во время обгона, при наличии попе-

речного уклона. Вертикальные и касательные силы, передающиеся от колес на дорожную конструкцию, имеют динамический характер [33].

В работе [34] рассмотрен механизм образования основных сдвиговых дефектов покрытия в виде волн и колей (рис. 1.1). Показано, что на покрытие со стороны колеса автомобиля действуют нормальная (вертикальная)  $F_n$  и сдвигающая (горизонтальная)  $F_t$  силы. Сила  $F_t$  возникает на ободе ведущего колеса при торможении автомобиля или при его движении на подъем под действием вращающего момента от двигателя.

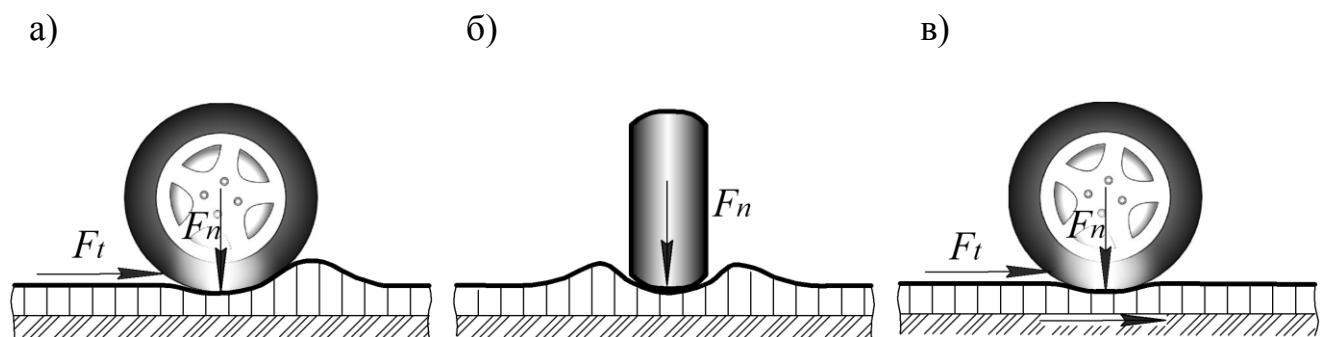


Рис. 1.1. Характер деформаций дорожного покрытия под действием нормальной  $F_n$  и сдвигающей  $F_t$  сил со стороны колеса автомобиля: а) на участках торможения с образованием поперечной волны; б) при движении на подъем с образованием продольной колеи; в) скольжение покрытия по основанию

Касательные напряжения от сдвигающей силы  $F_t$  вызывают перемещение материала покрытия параллельно движению автомобиля и образование поперечных волн (рис 1.1 а). Касательные напряжения от действия нормальной силы  $F_n$  вызывают перемещение асфальтобетона как в стороны, перпендикулярные направлению движения, так и по направлению движения. При действии нормальной силы  $F_n$  колесо, накатываясь на поперечную волну, устраняет ее. При этом деформации в поперечном направлении с каждым проходом автомобиля накапливаются. Колесо проходит по одному и тому же следу с определенной повторяемостью, что приводит к уменьшению толщины покрытия на полосе наката и образованию остаточной деформации в виде колеи (рис.1.1 б) [34, 35].

При торможении автомобиля сдвигающая сила становится соизмеримой с нормальной, что приводит к сдвигу покрытия относительно основания (рис 1.1 в). Характерно, что рассмотренные выше пластические деформации повышают коэффициент динамичности и, как следствие, являются источником других видов разрушения, в частности, усталостных трещин [35].

Научной школой профессора А. М. Кривисского установлено, что напряжения в верхних частях покрытия начинают расти еще до того, как движущаяся нагрузка (колесо автомобиля) встанет вертикально над необходимой точкой [24]. При этом характерно последовательное возникновение растягивающих и сжимающих напряжений (рис. 1.2).

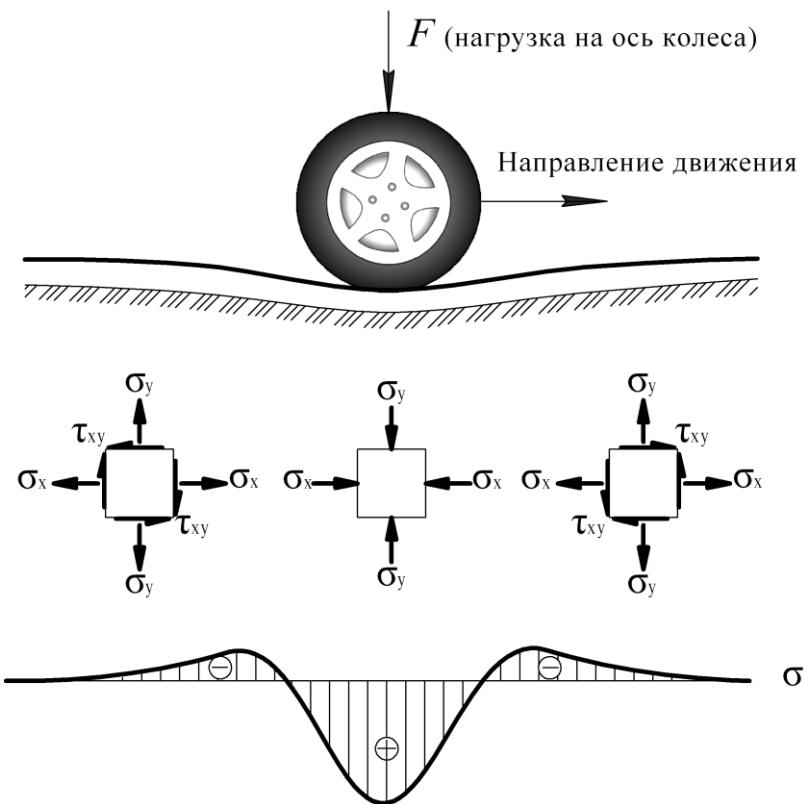


Рис. 1.2. Распределение растягивающих (сжимающих) напряжений в асфальтобетонном покрытии при наезде колеса автомобиля [27, 30]

А. Г. Малофеев экспериментально подтвердил, что при движении автомобиля напряжения перед колесом имеют отрицательное значение (т.е. являются растягивающими). При этом была зафиксирована деформация покрытия, имеющая форму изгибной бегущей волны. Показано, что максимальная амплитуда про-

гиба находится под центром нагружения, т.е. под колесом автомобиля [36].

В работе [37] показан характер изменения растягивающих и сжимающих напряжений в зависимости от глубины заложения тензометрических датчиков. Установлено, что датчик, расположенный на поверхности покрытия, при проезде грузового автомобиля ЗИЛ-130, регистрирует знакопеременные напряжения (растяжение – сжатие – растяжение), а датчик, расположенный между слоем покрытия и слоем основания, регистрирует напряжения практически одного знака (сжатие) (рис. 1.3). Характерно, что время действия напряжений в асфальтобетоне несколько выше (примерно в 1,5 – 2 раза), чем время действия самой транспортной нагрузки и составляет: на покрытии – 0,4 – 0,45 с, в слоях основания – 0,2 – 0,3 с.

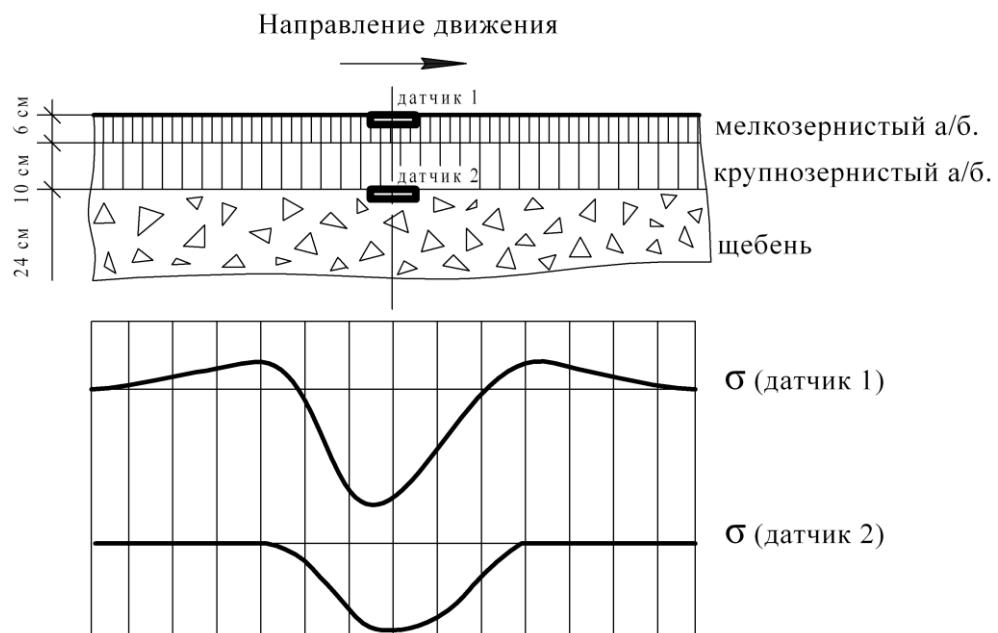


Рис. 1.3. Схема расположения датчиков по глубине конструкции и осциллографические записи изменения напряжения ( $\sigma$ ) в слоях дорожной одежды [37]

Эти данные были подтверждены в работах В. М. Смирнова, Г. С. Бахраха, Б. С. Радовского и др. [6, 25, 38].

В. М. Смирнов установил, что напряжения, возникающие в растянутых зонах материала, тем выше, чем больше прогиб поверхности слоя и меньше размер чаши прогиба материала [25].

Он предположил, что несмотря на возникновение наибольших растягиваю-

щих напряжений при изгибе в нижней точке рассматриваемого слоя по оси действия нагрузки, с учетом усталостных явлений, происходящих в материале при его многократном изгибе, в некоторых случаях может оказаться, что разрыв сплошности монолитного материала (т.е. появление трещин) начинается в верхних, хотя и менее нагруженных волокнах [25].

В свою очередь Г. С. Бахрах, при исследовании режимов движения транспортных средств с позиции оценки усталостной долговечности, отметил, что с увеличением интенсивности движения и, следовательно, ростом циклов приложения нагрузки на покрытие, с увеличением нагрузки на ось автомобиля происходит ускоренное накопление усталостных повреждений [6]. При плотном транспортном потоке растягивающие напряжения в нижней части покрытия не успевают полностью релаксировать до очередного проезда. В результате увеличивается пребывание покрытия в напряженном состоянии, что ведет к уменьшению срока службы асфальтобетонного покрытия.

Б. С. Радовским выполнены испытания дорожных покрытий на круговом стенде ГосдорНИИ [38]. По результатам исследований разработана методика оценки грузопропускной способности различных видов дорожных одежд, которая основывалась на анализе многократного воздействия, оказываемого на покрытие кратковременных циклических нагрузок от колеса автомобиля при скорости 30 км/ч. Воздействие колеса, проходящего на различных расстояниях через рассматриваемый поперечник и вызывающих в слоях конструкции напряжения разной величины, сравнивали с результатами лабораторных испытаний на усталость под действием различных циклических нагрузок.

Установлено, что чаша прогиба с увеличением скорости становится менее глубокой и приобретает более пологую форму. Характерно, что при любой скорости движения напряженно-деформированное состояние слоистой вязкоупругой конструкции является несимметричным относительно центра приложения движущейся нагрузки. Доказано, что максимальный прогиб возникает позади центра нагруженной площадки, а не под центром, т.е. максимальный прогиб запаздывает по отношению к приложению нагрузки. Изгибное напряжение по подошве ас-

фальтобетонного слоя с ростом скорости увеличивается, а относительная деформация уменьшается. Также отмечено влияние на напряженно-деформируемое состояние асфальтобетонного покрытия амплитуды и частоты колебаний движущейся нагрузки. [38, 39].

А. В. Руденским установлено, что скорость деформирования оказывает существенное влияние на характеристики усталостной долговечности покрытия. Он показал, что длительность транспортной нагрузки в среднем составляет 0,05 – 0,4 с [5].

Отмечено, что при движении автопоездов со скоростью движения 50 км/ч и расстояниями между осями полуприцепов до 6 м, частота воздействия на асфальтобетон составляет 2,5 Гц, а длительность нагружения – 0,4 с. При движении грузовых автомобилей со спаренными задними колесами (расстояние между осями 1,2 – 1,4 м) длительность нагружения уменьшается до 0,1 с [24].

В ряде работ [40 – 42] показано, что длительность действия грузовых автомобилей в пределах чаши прогиба составляет 0,1 – 0,6 с. Отмечено, что длительность действия движущегося автомобиля на поверхность дорожной одежды в каждой точке ( $t_h$ ) зависит от скорости движения ( $v_{cp}$ ), определяемой по методике А. П. Васильева [43], и длины чаши прогиба по направлению движения автомобиля ( $l_{np}$ ), и может быть определена по формуле:

$$t_h = \frac{l_{np}}{v_{cp}}. \quad (1.1)$$

Исследования, выполненные в МАДИ, позволили установить для дорог I и II технических категорий среднюю продолжительность действия нагрузки и «периода отдыха» – 0,1 и 0,9 с, соответственно для дорог III категории – 0,16 и 1,3 с соответственно [42].

Результаты испытаний дорожных одежд кратковременной нагрузкой на автомобильных дорогах России, позволили установить средний расчетный прогиб асфальтобетонного покрытия под единичной нагрузкой в зависимости от категории дороги. Для I категории прогиб составил 0,423 мм, для II – 0,575 мм, для III –

0,722 мм. При этом отмечается, что длина чаши прогиба на дорожном покрытии может доходить до 30 м [42].

В работе [36] показано, что при эксплуатационных скоростях движения автомобилей (в 70-е годы – 70 км/ч) длительность нагружения нежестких дорожных одежд составляет 0,05 – 0,14 с, что соответствует частоте нагружения 7 – 20 Гц.

А. В. Смирнов определил характер динамического воздействия движущегося автомобиля как импульсно-ударный, при этом частота действия нагрузки транспортного потока может составлять до 400 – 2000 циклов в минуту, что соответствует частотам от 6,7 до 33 Гц. Средняя продолжительность импульсов составляет 0,05 – 0,15 с [44].

На основе полученных экспериментальных данных на различных типах дорожных одежд с заложением вибродатчиков в слои основания установлено, что спектр колебаний дорожных одежд, вследствие неровностей покрытия, имеет неоднородную структуру. При этом частота колебаний меняется в диапазоне от 15 до 22 Гц при скорости движения автомобиля 60 км/ч [44].

А. О. Салль, анализируя деформирование покрытий, определил, что скорость нагружения покрытия при движении грузового автомобиля с расчетной скоростью 70 км/ч составляет  $10 - 40 \text{ МПа}\cdot\text{s}^{-1}$ , а время нагружения – в среднем 0,1 – 0,2 с [45].

По мнению В. А. Золотарева диапазон частот колебаний покрытия при воздействии транспортной нагрузки находится в пределах от 0,01 до 50 Гц. При этом нижние значения частот колебаний соответствуют статическому действию, а верхние соответствуют динамическому действию, которое испытывает покрытие при скорости автомобиля выше 160 км/ч. Опираясь на полученные данные, В. А. Золотарев рекомендовал проводить исследования динамических свойств асфальтобетонов при частотных режимах: 0,01 Гц, 0,5 Гц, 10 Гц [4].

В исследованиях, выполненных под руководством профессора С. К. Иллиополова, установлено, что при движении чаши прогиба от колеса автомобиля частота колебаний асфальтобетонного покрытия при движении со скоростью 40 – 120 км/ч составляет 1 – 10 Гц [23, 33].

В США в руководстве по проектированию дорожных одежд для дорог различных категорий приведены частотно-временные режимы нагружения для заданных расчетных скоростей движения [47]: межштатным магистральным дорогам с расчетной скоростью движения – 97 км/ч соответствует частота 15 – 40 Гц (время действия нагрузки – до 0,05 с); для главных штатных (73 км/ч) – 10 – 30 Гц (до 0,1 с); для городских дорог (24 км/ч) – 2 – 10 Гц (0,1 – 0,5 с); для местных – 0,1 – 0,5 Гц (более 1 с).

Таким образом, анализ литературных данных свидетельствует о том, что при действии транспортной нагрузки (наезде колеса автомобиля) в асфальтобетонном покрытии нежесткой дорожной одежды попеременно возникают растягивающие и сжимающие напряжения. При этом всегда возникает прогиб дорожного покрытия, имеющего форму погонной волны. Действие подвижной нагрузки на покрытие имеет циклический характер. Частотный спектр воздействия транспортных средств на дорожное покрытие варьируется в достаточно широких пределах от 0,01 до 30 – 50 Гц, а длительность действия нагрузки составляет в среднем 0,1 – 0,4 с. При этом в отечественном ВБН В.2.3-218-186-2004 «Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу» также принято время нагружения в 0,1 с.

## **1.2 Факторы, определяющие усталостную долговечность асфальтобетонных покрытий**

Исследования асфальтобетонов в условиях кратковременного циклического нагружения показали, что прочностные и деформационные характеристики зависят от следующих факторов [2 – 4, 7, 48 – 51]:

- 1) внешних (эксплуатационных) – величина и количество прилагаемой статической или динамической нагрузки; погодно-климатические, тепловые, влажностные факторы;
- 2) внутренних – состава и структуры: свойства исходных материалов; зерновой состав; структура и плотность асфальтобетона, а также старение органического вяжущего;

3) технологических – нарушения в технологии производства асфальтобетонных смесей и строительстве асфальтобетонного покрытия (недоуплотнение асфальтобетона, некачественные материалы, недостаток или избыток вяжущего, неоднородность перемешивания асфальтобетонной смеси и т.д.).

Роль данных факторов в усталостной долговечности при определенных условиях может оказаться решающей.

Характерная особенность асфальтобетона, как материала на термопластичных органических вяжущих, не позволяет однозначно идентифицировать его как вязкоупругое или твердое (хрупкое) тело [4]. При отрицательных температурах испытания, близких к температуре стеклования органического вяжущего, и при воздействии циклических нагрузок большой величины асфальтобетон ведет себя как хрупкое тело, при этом разрушающая трещина очень четкая и вполне определенная. При положительных температурах материал ведет себя как вязко-упруго-пластичное тело, при этом процесс начала разрушения виден раньше, чем при отрицательных температурах и разрушение нечетко выражено [52].

А. Гриффитс впервые проанализировал хрупкое разрушение материала на основе явлений развития микротрещин. Результаты исследований позволили получить физическую картину разрыва хрупкого однородного материала, которая основывалась на предположении о критическом разрывном напряжении [53]. Используя положение, что трещина растет лишь тогда, когда изменение упругой энергии в материале в результате разгрузки образца вблизи растущей трещины равно или больше изменению свободной энергии, возникающей за счет образования новых поверхностей, А. Гриффитс определил условие развития трещины и получил следующее выражение для описания критического напряжения  $\sigma_K$ , Н/см<sup>2</sup> [53, 54]:

$$\sigma_K = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \sqrt{\frac{\sigma_{пов} \cdot E}{\mu \cdot c}}, \quad (1.2)$$

где  $\sigma_{пов}$  – напряжения на поверхности материала, Н/см<sup>2</sup>;

$E$  – свободная поверхностная энергия твердого тела, Дж;

$\mu$  – коэффициент Пуассона;

$c$  – длина внутренней трещины (предполагается, что трещина имеет форму эллипса, а растягивающая сила направлена по нормали к большой полуоси эллипса), нм.

Выражение (1.2) не достаточно полно характеризует процесс разрушения, т.к. не учитывает кинетику процесса разрушения материала и является по сути статичным, поскольку в нем рассматривается лишь граничное условие перехода от ранее существовавшей трещины к саморазвивающейся [55].

Многочисленные исследования, показывающие несовершенство теории разрушения А. Гриффита, привели к развитию молекулярной теории прочности, основанной на изучении физической кинетики процесса разрушения [55].

Исследования длительной долговечности в процессе ползучести при постоянном растягивающем напряжении показали, что кинетика процесса разрушения может быть описана уравнением Аррениуса, полученным им при исследовании инверсии сахараозы [56]:

$$t_R = a - \frac{b\sigma}{T}, \quad (1.3)$$

где  $t_R$  – время от момента приложения постоянного растягивающего напряжения  $\sigma$  до момента разрушения, с;

$T$  – абсолютная температура,  $^{\circ}\text{К}$ ;

$a, b$  – коэффициенты, характеризующие свойства исследуемого материала.

Установлено, что материал может разрушаться при напряжениях намного меньше критических ( $\sigma < \sigma_k$ ) [57]. К тому же представление о разрушении твердых тел, в том числе и асфальтобетона, усложняется существенной зависимостью их прочности от температуры. В связи с этим академик С. Н. Журков предположил, что разрушение является кинетическим процессом, который развивается с момента приложения нагрузки. Теория прочности, развиваемая им, рассматривает разрушение как процесс постепенного накопления нарушений сплошности материала, решающую роль в котором играют флуктуации энергии теплового движения [57]. Приложенное напряжение способствует данному процессу, снижая энергетический барьер перехода от состояния до разрушения к состоянию после раз-

рушения. Этот процесс начинается с момента приложения к телу нагрузки и идет практически при любом уровне нагружения. Понятие предела прочности, при таком подходе теряет свой физический смысл [56].

Фундаментальной величиной, характеризующей интегральную скорость разрушения при данной нагрузке и температуре, становится долговечность – время от момента приложения нагрузки до момента полного разрушения материала, которая описывается выражением (1.4) [56]:

$$\tau_d = \tau_0 \exp \left[ \frac{(U_0 - \gamma\sigma)}{RT} \right], \quad (1.4)$$

где  $\tau_d$  – долговечность материала, с;

$\tau_0$  – средний период собственных тепловых колебаний атомов,

$\tau_0 = 10^{-12} \div 10^{-13}$ , с;

$U_0$  – потенциальный барьер, кДж/моль;

$\gamma$  – структурно-чувствительный параметр С. Н. Журкова, м<sup>3</sup>;

$\sigma$  – напряжение, Н/см<sup>2</sup>;

$R$  – универсальная газовая постоянная,  $R = 8,31 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ ;

$T$  – абсолютная температура, °К.

Согласно термофлуктуационной теории прочности Я. И. Френкеля, С. Н. Журкова внешнее напряжение  $\sigma$ , распределяясь по межатомным связям, несколько ослабляет силы сцепления атомов, снижает потенциальный барьер, препятствующий распаду межатомных связей, от  $U_0$  до  $U_{(\sigma)} = U_0 - \gamma\sigma$ . Затем атомы «ждут» прихода флюктуаций  $E_{\phi\ell} = U_{(\sigma)}$ , которые и разорвут межатомные связи. Такие «разрывные флюктуации» начнут поступать на некоторые атомы, прежде всего, пленочного органического вяжущего в асфальтобетоне сразу после приложения нагрузки, на другие позднее, а за время порядка  $\tau_{\phi\ell}$  флюктуации «посетят» большую долю атомов в каком-либо сечении асфальтобетона и разорвут значительное число связей. В результате долговечность конструктивного слоя из асфальтобетона в дорожной

одежде окажется близкой  $\tau_{\phi\ell}$  [57].

То, что коэффициент  $\tau_0$  имеет значение порядка  $10^{-13}$  с, представляется в свете теории активационных процессов закономерным и необходимым, т.к. предэкспоненциальный множитель в формуле (1.4) для времени ожидания флюктуации энергии должен быть равен периоду собственных колебаний атомов в твердом теле. Этот период для любых тел примерно одинаков и близок к  $10^{-13}$  с.

Таким образом, в свежепредставленной кинетической концепции прочности роль внешней среды заключается прежде всего в снижении начального потенциального барьера, что достигается некоторым раздвижением атомов. Существование энергетических флюктуаций приводит к тому, что при пониженном внешней силой потенциальном барьере резком учащаются случаи разрыва межатомных связей.

Особенно важно то, что внешняя сила определяется направленность процесса. Если в отсутствии силы распад связей хотя и редко, но происходит, то он компенсируется восстановлением связей, и разрушение тел не происходит. При приложении силы не только облегчается распад связей, но и затрудняется их восстановление, поэтому идет необратимое разрушение асфальтобетона [57].

Следовательно, разрушение представляет собой процесс последовательных термофлюктуационных разрывов связей между атомами (молекулами) в твердом теле [57]. Поэтому исследователи полагают, что общим для развития процесса разрушения асфальтобетона, как при статическом, так и при многократном циклическом нагружении является образование микродефектов, формирование и развитие микротрешин в наиболее слабых местах структуры (пленка вяжущего, поры) [52, 55].

В то же время характер процессов разрушения в этих случаях различен. Основное различие проявляется в том, что процесс усталостного разрушения начинается раньше и длится более длительный период [58]. Отмечается, что внутренние микронапряжения при многократном нагружении могут быть несколько выше, чем при статическом, поскольку они являются функцией ускорения макро-

скопических деформаций. Однако, при кратковременном циклическом нагружении внутренние микронапряжения могут релаксировать вследствие проявления вязких свойств. При статической нагрузке (медленное возрастание или постоянное действие нагрузки) данное явление не может развиваться в той же мере [55].

Можно предположить, что процесс усталостного разрушения асфальтобетона включает в себя постепенное накопление внутренних дефектов, сдвигов, перемещений микроскопических частиц материала, что в основном связано с действием касательных напряжений; возникновение микроскопических трещин, скорость роста которых зависит от числа циклов приложения и величины нагрузки; и наконец, распространение и прогрессирующее развитие макроскопической трещины, при этом окончательное разрушение материала происходит по сечению трещины усталости в растянутой зоне [49, 55].

Характерно, что циклическое нагружение вызывает большую деформацию материала, чем статическая той же величины, при этом кривая зависимости деформации от времени при статической нагрузке затухает гораздо быстрее, чем кривая при циклических нагрузлениях (рис. 1.3) [55, 56].

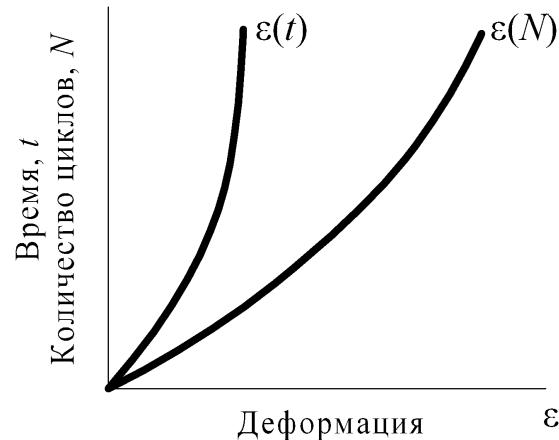


Рис. 1.3. Характер изменения деформации при статической и динамической нагрузке

В работах [55, 58] показано, что после снятия циклической нагрузки возникшая эластическая деформация не успевает полностью восстановиться за период разгрузки до того, как нагрузка снова начнет действовать. Характерно, что

процесс накопления эластической и вязкой деформации зависит не только от реологических свойств асфальтобетона, но и от продолжительности действия нагрузки и периода «отдыха».

На характер развития усталостных разрушений в материале оказывает влияние величина циклической нагрузки. Естественно, что с ростом действующей нагрузки, материал меньше времени противостоит разрушению (количество циклов до разрушения уменьшается) (рис. 1.4) [49, 52, 55, 59].

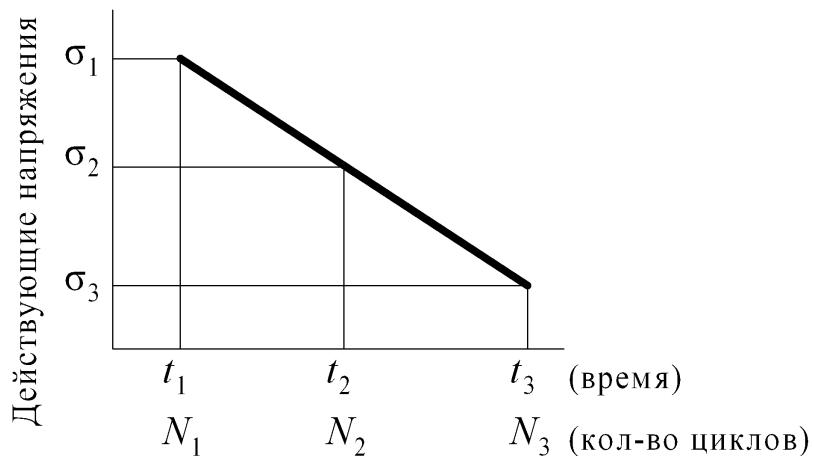


Рис. 1.4. Зависимость величины влияния действующего напряжения на долговечность асфальтобетона

В работах [26, 49, 52, 55] показано, что при испытаниях асфальтобетонных образцов-балочек циклической нагрузкой, составляющей 20 % от разрушающей, достигается наиболее точное моделирование усталостных процессов в асфальтобетоне с достаточно большим количеством циклов нагружения, чем при испытаниях нагрузкой 50 % и более от разрушающей. При напряжениях, близких к пределу выносливости, число циклов до разрушения значительно увеличивается [56]. Это характерно для асфальтобетона при отрицательных температурах, когда приложенная нагрузка равна 10 % от разрушающей [59].

Значительное влияние на развитие усталостных процессов имеет скорость приложения нагрузки. В работе [52] отмечено, что при относительно быстром приложении динамической нагрузки (частота приложения нагрузки 30 – 50 Гц и более) усталостное разрушение носит упругохрупкий характер. Раастягивающие напряже-

ния в зоне контакта достигают таких значений, что прочность адгезионных связей резко уменьшается. Усталостная трещина, подойдя к минеральному зерну, обходит его по контактной зоне, как по энергетически выгодному пути разрушения.

При воздействии изгибающей нагрузки с относительно низкой частотой (от 1 до 5 – 10 Гц) асфальтовяжущее находится в условиях упруговязкого состояния, при котором внутренние напряжения от действия нагрузки успевают релаксировать в течении относительно короткого промежутка времени [52]. Микродефекты в данном случае будут зарождаться в прослойке органического вяжущего, при условии достаточно прочных адгезионных связей между битумом и минеральным заполнителем. Установлено, что возникновению микротрещин предшествует процесс образования так называемых волосяных трещин, разделенных взаимосвязанными порами. Основу волосяных трещин составляют высокомолекулярные структурообразующие элементы органического вяжущего [60]. Волосяные трещины, вытягиваясь и объединяясь, постепенно преобразуются в микротрещины. Отдельные микротрещины могут прекращать свое развитие из-за снижения концентрации напряжений по фронту их роста. Такое явление характерно при встрече микротрещины с порой, минеральной частицей, армирующим включением [52, 61].

Проявление асфальтобетоном упруговязких свойств зависит не только от времени действия нагрузки, но и от времени релаксации напряжений, которое для максвелловского упруговязкого тела зависит от вязкости  $\eta$  и модуля упругости  $E$ , и описывается зависимостью [7, 62]:

$$\theta = \frac{\eta}{E}. \quad (1.5)$$

Л. Б. Гезенцвей считает, что модуль упругости с изменением температуры изменяется незначительно (в интервале температур от 15 до 50 °С снижается всего в 2 – 2,5 раза), поэтому на время релаксации в значительной мере будет влиять вязкость вяжущего, которая в свою очередь зависит от температуры. С ростом температуры, а вместе с тем и уменьшением вязкости, время релаксации будет снижаться, что приведет к накоплению пластических деформаций и снижению усталостной долговечности. Зимой асфальтобетон приобретает достаточно высокую

кую вязкость, благодаря чему время релаксации увеличивается, а материал в меньшей степени деформируется [7, 62].

Результаты испытаний асфальтобетонов динамической нагрузкой [4, 10, 20, 42, 49, 52, 55] позволили установить, что усталостная долговечность меняется с изменением температуры. При испытании материала нагрузкой постоянной величины, сопротивление образцов усталостному разрушению возрастает с понижением температуры. С увеличением температуры сопротивление усталостному разрушению снижается, т.к. материал становится более пластичным, и создаются условия, благоприятствующие перераспределению микродефектов и их накоплению в растянутой зоне материала [20, 55]. Следует отметить, что влияние температуры на долговечность асфальтобетона проявляется в изменении модуля упругости, а следовательно и деформативности. Увеличение модуля упругости с понижением температуры повышает усталостную долговечность [52].

На рис. 1.5 представлены зависимости усталостной долговечности от температуры испытаний для асфальтобетона типа Б [52].

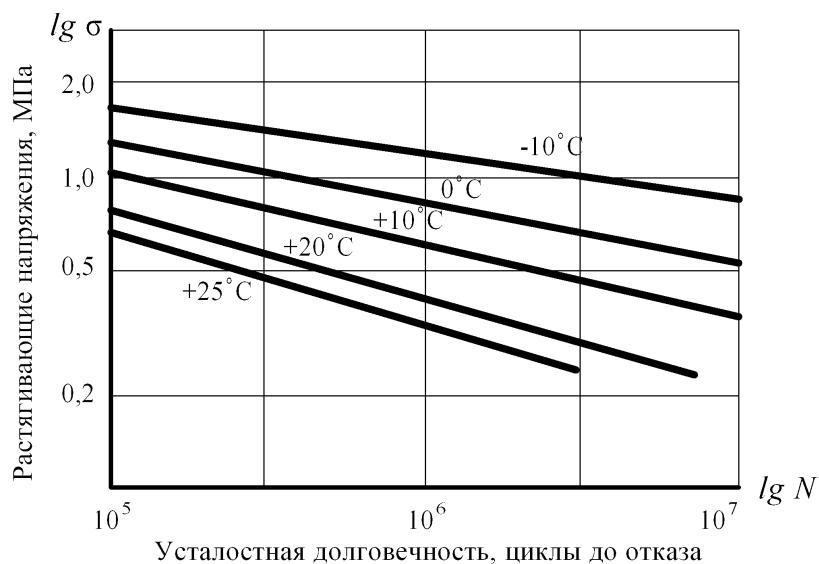


Рис. 1.5. Усталостная долговечность асфальтобетона типа «Б» на битуме БНД 60/90 в зависимости от температуры испытаний [52]

Структура материалов, используемых в слоях дорожных покрытий, является одним из важнейших факторов, определяющих их прочность, как при динамиче-

ских, так и при статических нагрузках [4, 5, 7, 48, 63].

Работы Л. Б. Гезенцевя, П. А. Ребиндера, И. А. Рыбьева, В. А. Золотарева, И. В. Королева, А. В. Руденского и др. [3 – 5, 7, 48 – 52, 63] показывают, что микроструктурные контакты в асфальтобетоне являются коагуляционными, т.е. взаимосвязь между минеральными компонентами осуществляется через прослойки свободного или структурированного вяжущего, что сказывается на его эксплуатационном состоянии в области положительных и отрицательных температур. Наличие подвижных коагуляционных контактов между зернами минерального заполнителя предопределяет неустойчивость асфальтобетона к возникновению пластических деформаций при положительных температурах [4, 7, 48].

Структура асфальтобетона принципиально рассматривается на трех уровнях: макро-, мезо- и микро. На макроуровне это структура минерального остова, представленного частицами щебня. Структурообразующими мезоструктурами являются частицы песка. Микроуровень – структура асфальтовяжущего вещества [4, 5, 7, 64]. Важнейшей составляющей всех подструктур является контактная зона – зона взаимодействия органического вяжущего с поверхностью частиц минеральных материалов. Это обусловлено тем, что в плотных асфальтобетонах контакты между структурообразующими частицами микро-, мезо- и макроструктуры представлены структурированным битумом. Именно адгезионно-когезионно-эластические свойства адсорбционно-сольватных слоев битума в значительной мере определяют физико-механические свойства асфальтобетона [4, 64 – 68].

Исходя из гипотезы кумулятивного накопления дефектов структуры и термофлуктуационного механизма разрушения Б. С. Радовский и А. В. Руденский считают возможным связать усталостную долговечность материала и его структурные особенности с помощью качественного показателя структуры материала  $\gamma$  [55, 69]:

$$\gamma = \frac{nRT}{R'_{th}}, \quad (1.6)$$

где  $n$  – показатель, характеризующий усталостные свойства материала;

$R$  – константа, равная  $1,987 \cdot 10^{-3}$  ккал/град $\times$ г-моль;

$T$  – температура,  $^{\circ}\text{К}$ ;

$R'_{t_H}$  – показатель, представляющий собой прочность материала при заданном

напряженном состоянии и длительности цикла  $t_H$ .

И. А. Рыбьевым показано, что чем выше адгезионно-когезионные свойства органического вяжущего и чем в большей степени структурирован его адсорбционно-сольватный слой на поверхности минеральных зерен, тем выше прочность асфальтобетона [3]:

$$R = R^* \left( \frac{\delta^*}{\delta} \right)^n, \quad (1.7)$$

где  $R$  – предел прочности асфальтобетона, МПа;

$R^*$  – предел прочности асфальтовяжущего вещества оптимального состава, МПа;

$\delta$  и  $\delta^*$  – толщина пленки битума соответственно в асфальтовяжущем веществе асфальтобетона обычного и оптимального составов, мкм, соответственно;

$n$  – показатель степени, зависящий от свойств битума, минеральных материалов и интенсивности процессов взаимодействия между ними.

В. А. Золотарев получил аналитическую зависимость прочности асфальтобетона в вязкоупругом состоянии от вязкости и когезии органического вяжущего, степени его структурированности поверхностью минеральных частиц и уровнем развития каркаса минерального остова [4]:

$$R_{cp} = R_{cpr} \cdot \left( \frac{\delta_{cpr}}{\delta_{cp}} \cdot K_{upl} \right)^n \cdot K_{nov}, \quad (1.8)$$

где  $R_{cp}$  – предел прочности асфальтобетона, МПа;

$\delta_{cpr}$ ,  $\delta_{cp}$  – соответственно толщина пленки битума, отвечающая начальному участку структурообразования на концентрационной кривой прочности

асфальтовяжущего и толщина пленки в асфальтобетоне фактического состава, МКМ;

$K_{upl}$  – коэффициент, характеризующий уменьшение толщины пленки органического вяжущего при уплотнении;

$n$  – коэффициент, характеризующий интенсивность структурирования битума минеральной поверхностью; вязкость и когезия органического вяжущего учитывается значением  $R_{cstr}$  (где  $R_{cstr}$  – максимальная прочность асфальтовяжущего оптимальной структуры, МПа);

$K_{nov}$  – коэффициент развития поверхности, характеризующий закономерности формирования структуры композиционных материалов от структурообразующих факторов.

Следовательно, возникновение микротрещин и их зародышей в значительной степени будет зависеть от наличия микродефектов, вакансий, дислокаций в материале (субмикроструктура), а формирование трещин в большей мере будет определяться микроструктурой (когезия, количество пор) [52].

Как уже ранее отмечалось, на пути формирования микротрещин серьезным препятствием могут выступать достаточно прочные зерна минеральных заполнителей, а также прочные связи между молекулами различных добавок, используемых в качестве модификаторов. Если же прочность на границе раздела «органическое вяжущее – минеральный заполнитель» достаточно мала, то в данном случае крупные минеральные зерна будут лишь ускорять усталостное разрушение асфальтобетона [52, 55].

В работах [20, 49, 52, 55, 70] показано, что повышенной усталостной долговечностью характеризуются наиболее плотные мелкозернистые составы с содержанием битума в смеси около 6 %. Отмечается снижение усталостной долговечности образцов при увеличении пористости (рис. 1.6).

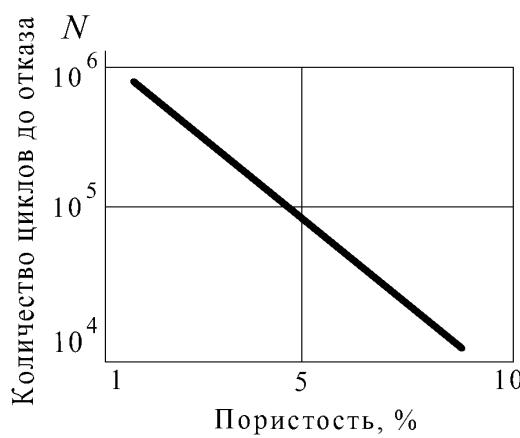


Рис. 1.6. Влияние пористости на усталостную долговечность асфальтобетона [50]

Увеличение содержания минеральных компонентов в асфальтобетоне приводит к уменьшению толщины пленки вяжущего, что, по мнению А. С. Колбановской, способствует росту когезии, вследствие эстафетного механизма структурирования пленочного битума [71]. При минимальных толщинах битумная прослойка находится в зоне интенсивного действия межмолекулярных сил. Прочность такой пленки максимальна, а ее деформации под нагрузками минимальны. Однако, это не свидетельствует о значительной прочности всей системы. Из-за малой толщины пленки площадь контакта между минеральными частицами невелика, что снижает прочность материала при растяжении [48]. При дальнейшем уменьшении толщины битумной пленки в наиболее слабых местах возможен ее разрыв. В результате возникают прямые контакты минеральных зерен с появлением дефектов структуры в виде пустот, раковин и трещин [70, 71].

Это подтверждается результатами экспериментальных данных, полученных в работе [48], которые показывают, что с увеличением крупности минеральных частиц усталостная долговечность асфальтобетона снижается (рис. 1.7). Следовательно, соотношение мелких и крупных фракций минерального материала в асфальтобетоне существенно влияет на его усталостную долговечность [49, 55, 72, 73].

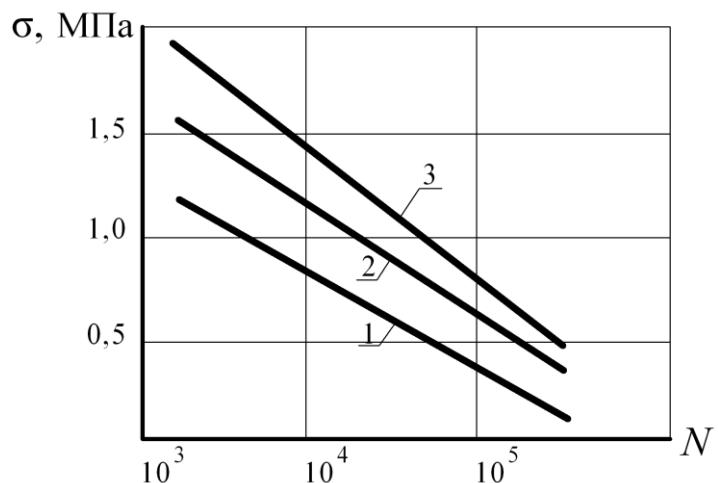


Рис. 1.7. Усталостная долговечность при  $+10\text{ }^{\circ}\text{C}$  [49]: 1 – среднезернистый асфальтобетон; 2 – мелкозернистый асфальтобетон; 3 – песчаный асфальтобетон

Разрушение асфальтобетона, как правило, начинается в поверхностных слоях, поэтому одним из важных факторов, которые определяют его долговечность, является взаимодействие поверхности асфальтобетона с окружающей средой [3, 5, 49, 51, 52, 55, 74–76].

Наиболее уязвимым элементом по отношению к диффузии и аккумуляции воды в асфальтобетоне является органическое вяжущее вещество [77, 78]. Прочность органического вяжущего снижается вследствие того, что вода постепенно проникает сквозь битумную пленку и накапливается в микрополостях. В результате возникают знакопеременные деформации и напряжения, которые изменяют плотность материала, его структуру, нарушают сцепление между минеральной подложкой и вяжущим [3, 49, 78]. Структура вяжущего становится разрыхленной и в ней появляются микропоры, что способствует более интенсивному развитию усталостных трещин [78].

В работе [49] установлено, что после первых пяти циклов попеременного водонасыщения – высушивания усталостная прочность асфальтобетонных образцов снизилась примерно на 20 – 30 %, после 10 – на 50 %, а после 15 циклов снижение усталостной прочности достигло 80 – 90 %, по сравнению с усталостной прочностью контрольных образцов, испытанных при тех же условиях, но не подвергнутых водонасыщению. Автор отмечает, что одной из основных причин снижения уста-

лостной долговечности асфальтобетона при водонасыщении является ослабление адгезии на границе раздела «минеральный наполнитель – органическое вяжущее вещество». Кроме того, водонасыщение вызывает образование пластических деформаций, что сказывается на распределении внутренних напряжений в теле асфальтобетона. Последние в свою очередь, вызывают образование различных микродефектов (поры, микротрешины и т.п.), способствующих необратимым изменениям их механических характеристик.

При замерзании вода увеличивается в объеме на 9 % и, проникнув через пленку вяжущего в поры асфальтобетона, будет вызывать внутреннее разуплотнение покрытия. Низкие температуры способствуют возникновению сильных термических напряжений, которые, в свою очередь, вызывают интенсивное образование дефектов в виде трещин [7, 48, 49, 78].

В работе [79] установлено, что наиболее вероятной причиной появления трещин при совместном действии нагрузок и агрессивных сред является диффузия агрессивной среды в контактную зону между минеральным материалом и пленкой битума. Показано, что под влиянием воды, растворов солей ( $\text{NaCl}$ ), кислот ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ,  $\text{HCl}$ ) и ПАВ разрушение асфальтобетона происходит в результате локальных разрушений битумной пленки, с последующим прониканием агрессивных сред сквозь битумную прослойку и дальнейшего развития трещин по адгезионным связям. Автор выделил четыре наиболее вероятных вариантов развития разрушений в асфальтобетоне при действии нагрузок и агрессивных сред (рис. 1.8).

Характерно, что интенсивность развития трещин по данным вариантам зависит от: вязкости битума; его содержания; основных свойств, включающих адгезию к различным минеральным материалам; гранулометрического состава и плотности асфальтобетона, а также от температурного фактора [79].

Испытание асфальтобетонов типов «А», «Б» при статическом изгибе напряжением величиной 0,25 МПа в различных агрессивных средах показало, что при воздействии водной среды долговечность асфальтобетона снизилась в 2 раза, при воздействии 5 %-го водного раствора  $\text{NaCl}$  – в 2,5 раза, 2 %-го раствора кислот  $\text{HCl}$

и  $\text{H}_2\text{SO}_4$  – более чем в 3 раза, 0,05 %-го водного раствора ПАВ – в 4 – 5 раз [79].

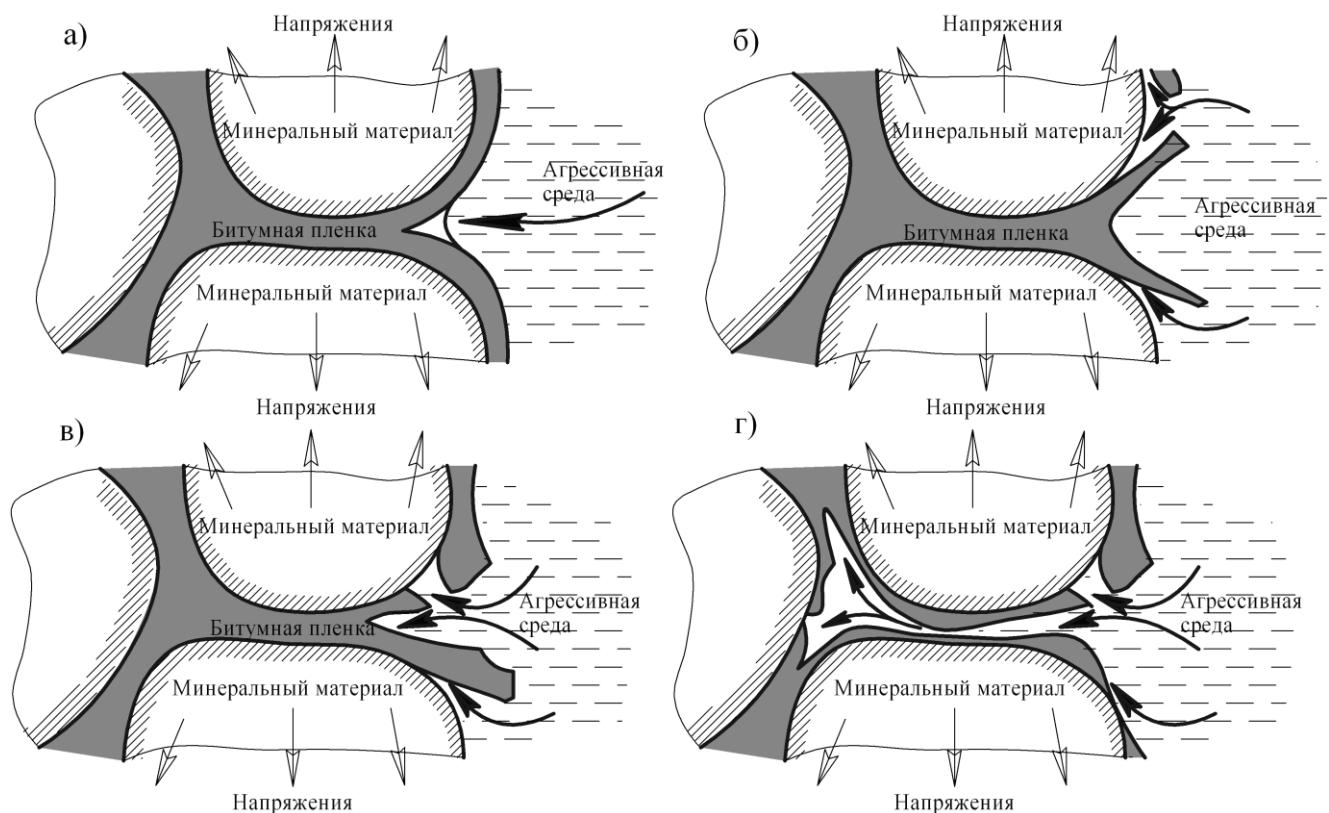


Рис. 1.8. Варианты развития трещин на границе раздела фаз «агрессивная среда – битум – минеральный материал» [79]: а) продольный разрыв пленки по когезионным связям; б) отслоение пленки от минерального материала по адгезионным связям; в) комбинированный вариант двух видов разрушения; г) поперечный разрыв битумной пленки с оголением минеральной поверхности

Следует подчеркнуть, что одним из факторов, влияющих на долговечность дорожного покрытия, является необратимый процесс изменения его микроструктуры и свойств, связанных со старением асфальтобетона [7, 48, 51, 71]. Интенсивность процессов старения асфальтобетона обусловлена, главным образом, интенсивностью старения битума в его составе, которое вызвано окислительно-испарительными процессами и постепенным изменением группового химического состава вяжущего [7, 26, 78]. Отмечается, что при комплексном воздействии тепла, воды, солнечной радиации, в частности ультрафиолета, битумы изменяют свой состав и свойства [78].

До определенного момента времени процессы старения могут способствовать упрочнению структуры асфальтобетона, обусловленных повышением адгезии к минеральным материалам. Повышение вязкости в данный период, вследствие образования коагуляционной сетки из асфальтенов и надмолекулярных образований смол, способствует некоторому повышению прочности и деформативной способности асфальтобетона. Второй период характеризуется развитием пространственной сетки из асфальтеновых комплексов. Последний период характеризуется наиболее явными признаками старения. При этом наблюдается повышение значений температуры хрупкости битума, связанных с разрушением асфальтеновой сетки с последующим снижением адгезионно-когезионных показателей вяжущего [7, 15]. В данном периоде старение битумов характеризуется уменьшением объема вяжущего, а также уплотнением его структурных соединений, что ведет к возникновению микродефектов структуры и повышению пористости асфальтобетона [7, 15, 26, 71]. При увеличении в адсорбционных слоях нейтральных и водорастворимых полярных углеводородов увеличивается диффузия воды в зону контакта с минеральным материалом, что ведет к интенсивному росту усталостных трещин [80].

Таким образом, опираясь на результаты анализа изложенных выше исследований можно сформулировать основные положения, касающиеся механизма усталостного разрушения асфальтобетона.

Механизм усталостного разрушения асфальтобетона носит достаточно сложный характер. Для него характерна существенная зависимость его напряженно-деформируемого состояния от температуры и частоты приложения нагрузки, поэтому разрушение асфальтобетона может носить вязкопластичный, вязкоупругий или хрупкий характер [49, 52, 55]. На начальном этапе общим для данных разрушений будет являться некоторое начальное возмущение, характерное образованием микроразрушений («разрыхлений»), перемещений микроскопических частиц или пластических сдвигов в материале, которые будут возникать в наиболее слабых местах структуры материала [55]. При дальнейшем действии внешних нагрузок в теле асфальтобетона будут накапливаться и развиваться необратимые

процессы изменения структуры, приводящие к постепенному снижению прочности асфальтобетона [49, 58].

Первая стадия разрушения характеризуется ростом необратимых деформаций, связанных с образованием микротрещин (или пластических перемещений) и постепенным их развитием до макротрещины. Причем развитие микротрещин и их зародышей на данном этапе в значительной степени будет зависеть от деформационно-прочностных свойств микроструктуры (асфальтовяжущего), а также от количества пор и дефектов структуры, которые способствуют концентрации внутренних напряжений в наиболее слабых местах структуры материала. В результате усталостные разрушения будут концентрироваться именно в этих областях [49, 52].

Наличие деформаций пластического и упругого характера будет способствовать частичной релаксации действующих напряжений. И чем выше будет релаксационная способность асфальтобетона, особенно в области вязкоупругого состояния, тем большей усталостной долговечностью будет он обладать [48, 49].

На первой стадии разрушения важную роль будет играть водонасыщение. При водонасыщении асфальтобетона в результате процессов миграции агрессивной среды может произойти проникновение среды в зону контакта битумной пленки и минерального материала сквозь пленку вяжущего [49]. В результате одновременного воздействия механической нагрузки могут образовываться новые свободные поверхности, которые подвержены воздействию агрессивных сред, приводящих к интенсификации процесса коррозионного разрушения, что в конечном итоге усугубляет дальнейшее механическое разрушение [79].

Вторая стадия механизма усталостного разрушения будет характеризоваться более быстрым ростом макротрещины до полного разрушения материала. В данном случае, когда напряжения в материале близки к критическим, воздействие водонасыщения и агрессивных сред сводится к нулю [49, 55]. Наибольшее значение на данной стадии разрушения будет иметь только величина приложенной нагрузки и температурные условия [55].

Рассмотренный механизм усталостного разрушения дает возможность

предполагать, что долговечность асфальтобетона, прежде всего, зависит от характера циклического нагружения, тепловых и влажностных условий испытаний, а также от структуры материала. Следовательно, существенного повышения усталостной долговечности асфальтобетона возможно добиться регулированием его структуры, а именно: улучшением деформационно-прочностных показателей асфальтовяжущего, уменьшением пористости макроструктуры.

Таким образом, при реальной оценке усталостной долговечности асфальтобетона следует иметь ввиду неизбежные изменения его структуры, которые зависят от состава смеси, напряженного состояния асфальтобетона, температуры эксплуатации, свойств окружающей среды. Учесть все эти факторы во взаимодействии очень сложно, поэтому изучение воздействия каждого в отдельности фактора имеет большое значение для понимания влияния каждого фактора на усталостную долговечность и его вклада в улучшение работы материала в реальных условиях. Достигнуть этого можно тщательным образом подбрав и оптимизировав состав асфальтобетона с учетом данных, полученных при усталостных испытаниях, технологии устройства асфальтобетонного покрытия, которое обеспечило бы высокую стабильность структуры в условиях совместного влияния температуры, циклических напряжений, влажности [49].

### **1.3 Основные критерии, характеризующие усталостную долговечность асфальтобетона**

В первой половине прошлого столетия основным критерием прочности дорожной конструкции являлась несущая способность подстилающего грунта [17] (Калифорнийский и Канадский методы; метод, предложенный Н. Н. Ивановым) [26]. Это было обусловлено малой толщиной слоев дорожной одежды, и как результат значительными нагрузками на грунт земляного полотна.

Постоянное увеличение интенсивности движения на автомобильных дорогах требовало обязательного упрочнения конструкции дорожной одежды с учетом многократного проезда транспортных средств. Метод расчета, разработанный в

60-70-е годы научными школами МАДИ, ХАДИ, СоюздорНИИ и др., позволил в комплексе учесть природно-климатические условия, состав и интенсивность движения, а также свойства материалов конструктивных слоев. В метод расчета заложены три критерия прочности [81, 82]:

- 1) Предельный упругий прогиб дорожной одежды в неблагоприятный период года под нагрузкой расчетного автомобиля.
- 2) Предельное равновесие по сдвигу в грунтах и в конструктивных слоях, не обладающих связностью.
- 3) Допустимое напряжение при изгибе в монолитных слоях с учетом повторности приложения нагрузки и режима движения.

В СССР в нормативных документах по проектированию дорожных одежд нежесткого типа впервые, при определении расчетных значений сопротивления асфальтобетона или дегтебетона растяжению при изгибе, предлагалось учитывать коэффициент усталости, который зависел от повторности нагружения расчетной приведенной интенсивности движения на полосу. Данный коэффициент имел значение от 0,5 до 2,4 [83].

В действующем российском нормативном документе ОДН 218.046-01 «Проектирование нежестких дорожных одежд» [84] одним из критериев оценки прочности дорожных одежд является сопротивление материала усталостному разрушению при многократном изгибе. При этом усталостные свойства материала определяются коэффициентом, учитывающим снижение прочности вследствие усталостных явлений при многократном приложении нагрузки, который в свою очередь зависит от суммарного числа приложений расчетной нагрузки за срок службы монолитного покрытия, температуры покрытия и свойств материала.

В действующем на Украине ВБН В.2.3-218-186-2004 «Дорожний одяг нежесткого типа» [85], в отличие от российского документа, отсутствует критерий прочности дорожных одежд от усталостного разрушения. Вместо этого используется критерий сопротивления растяжению при изгибе монолитных слоев. При этом усталостные явления описываются коэффициентом  $k_{kn}$ , учитывающим кратковременность и повторяемость нагрузок:

$$k_{kn} = k_{np} \cdot \sum N^{-\left(\frac{1}{m}\right)}, \quad (1.9)$$

где  $k_{np}$  – коэффициент, учитывающий влияние повторных нагрузок в нерасчетный период;

$m$  – показатель усталости;

$\sum N$  – суммарная интенсивность движения.

Следует отметить, что показатель усталости  $m$  в зависимости от материала конструктивного слоя, может принимать значения от 3,5 до 7. Однако методика определения данного показателя в документах не приводится, что не дает возможности оценить степень учета усталостных явлений в оценке прочности материала.

В ряде работ усталостные свойства материалов оцениваются на основе построенных экспериментальным путем кривых усталости.

Так, в работе [53] отмечено, что кривую усталостной долговечности при симметричном цикле нагрузки (рис. 1.9) следует устанавливать экспериментально, а для определения числа циклов до разрушения можно воспользоваться аналитическим описанием полученной кривой усталости.

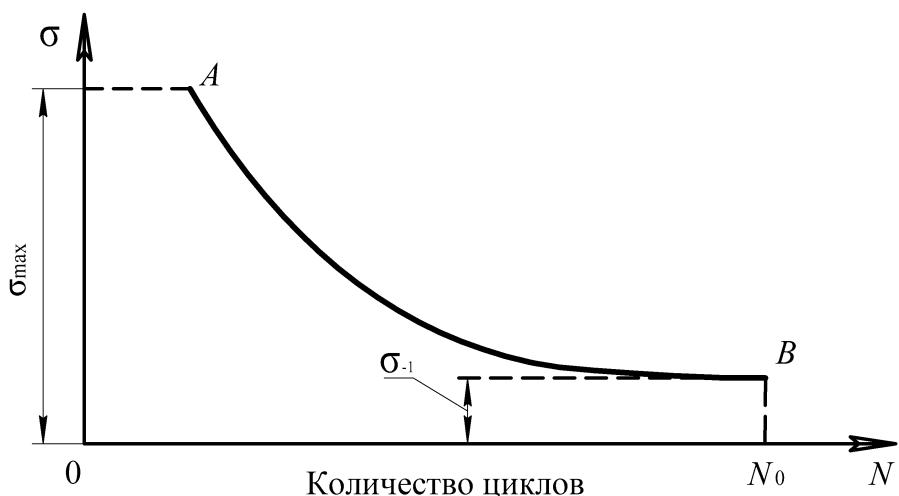


Рис. 1.9. Кривая усталости

$$N = \exp \{m(\sigma_{\max} - \sigma_{-1})\}, \quad (1.10)$$

где  $N$  – число циклов до разрушения;

$m$ ,  $\sigma_0$  – параметры кривой усталости;

$\sigma_{\max}$  – максимальное напряжение или амплитуда цикла.

Исследования, выполненные А. О. Саллем, позволили получить зависимость усталостной прочности от количества циклов нагрузки для песчаного асфальтобетона [86]:

$$\lg \sigma = \lg \sigma_0 + m \lg n, \quad (1.11)$$

где  $\sigma$  – действующее напряжение в материале, Н/см<sup>2</sup>;

$\sigma_0$  – прочность материала, определяемая при длительности действия нагрузки, соответствующей одному циклу, Н/см<sup>2</sup>;

$m$  – коэффициент усталости;

$n$  – число циклов до образования трещин.

R. N. Saal и P. S. Pell получили следующую зависимость для описания усталостного поведения асфальтобетона [30]:

$$\lg \frac{\sigma}{\sigma_0} = -\frac{1}{n} \lg N, \quad (1.12)$$

где  $N$  – число повторных нагрузок, которые выдерживает асфальтобетон до разрушения.

Следовательно, для оценки усталостной долговечности материала необходимо знать коэффициент усталости ( $m$ ) и количество циклов до разрушения ( $N$ ) [30].

А. В. Руденским была установлена связь между числом циклов, которое выдерживает материал до разрушения, и величиной действующего напряжения (или величиной деформаций, возникающих в материале) (рис. 1.10), наклон  $\lg \sigma - \lg N$  характеризует усталостное свойство материалов [20].

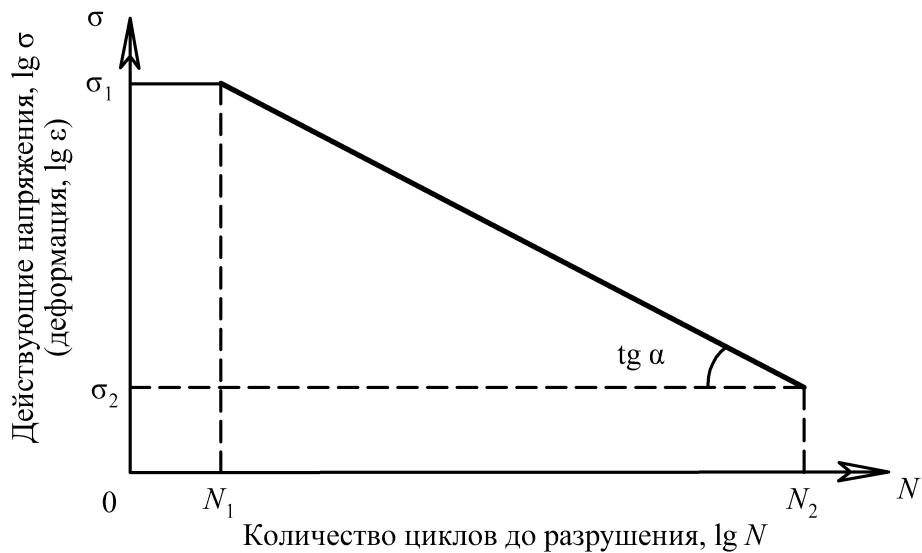


Рис. 1.10. Связь между количеством циклов нагружения асфальтобетона до разрушения и величиной напряжения (деформации)

Исходя из этого, можно определить коэффициент усталости:

$$\operatorname{tg} \alpha = m = \frac{\lg \sigma_1 - \lg \sigma_2}{\lg N_2 - \lg N_1}, \quad (1.13)$$

где  $m$  – коэффициент усталости;

$N_2$  – количество циклов до разрушения при напряжении  $\sigma_2$ ;

$N_1$  – количество циклов до разрушения при напряжении  $\sigma_1$ .

Результаты исследований показали, что полученные значения коэффициентов усталости могут изменяться в пределах от 0,18 до 0,40.

Поскольку с изменением температуры асфальтобетона положение линии  $\lg \sigma - \lg N$  будет меняться, то при прогнозировании усталостной долговечности асфальтобетона в дорожном покрытии необходимо учесть, что эксплуатационные нагрузки даже одинаковой величины, действуя при различных температурных условиях, вносят различный вклад в усталостное разрушение материала [20].

В данном случае усталостную долговечность А. В. Руденский предлагает описывать следующей зависимостью [20]:

$$N = N_p \frac{1}{\sum P_i \left( \frac{\sigma_p}{\sigma_i} \right)^m}, \quad (1.14)$$

где  $N_p$  – долговечность при действии расчетного напряжения  $\sigma_p$ ;

$P_i$  – доля циклов с амплитудой напряжения  $\sigma_i$ ;

$m$  – коэффициент усталости.

В работе [87] установлено, что отношение между количеством циклов до разрушения и напряжением для плотных асфальтобетонов может быть описано формулой:

$$N = c \cdot \left( \frac{S}{\sigma} \right)^b, \quad (1.15)$$

где  $N$  – общее количество циклов до разрушения;

$c, b$  – постоянные, установленные эмпирическим путем,  $c = 1,44 \times 10^{-16}$ ,

$b = 5 \dots 6$  соответственно;

$S$  – жесткость асфальтобетона, МПа;

$\sigma$  – приложенное изгибающее напряжение, Н/см<sup>2</sup>.

Из (1.15) следует, что усталостная долговечность асфальтобетона в первую очередь зависит от величины напряжения, а не от амплитуды растяжения.

В работе [16] отмечено, что зависимость долговечности различных материалов, к которым относится и асфальтобетон, от величины действующего напряжения в условиях динамической усталости может описываться уравнением:

$$N = \left( \frac{R_u}{\sigma} \right)^m, \quad (1.16)$$

где  $N$  – число циклов до разрушения;

$m$  – постоянная, характеризующая усталостные свойства материала;

$R_u$  – прочность материала при разрушении его за один цикл приложения напряжения, МПа;

$\sigma$  – действующее напряжение, Н/см<sup>2</sup>.

Однако данная зависимость не может в полной мере охарактеризовать долговечность асфальтобетонов в реальных условиях работы, т.к. она не учитывает температурные условия, скорость автомобиля, конструктивные особенности дороги и т.д.

В связи с этим Г. С. Бахрах предлагает зависимость

$$N = 0,40 \cdot b^{1/2} v \cdot x_a^{-1} \cdot \sigma^{-b} \cdot C \cdot \exp\left(\frac{U}{R \cdot \Theta}\right), \quad (1.17)$$

которая позволяет определить число циклов, которое может выдержать дорожное покрытие до появления усталостных трещин, учитывающую как константы материала, включая его температурную чувствительность ( $b$ ,  $C$ ,  $U$ ), так и конструктивные особенности дороги, определяющие величину растягивающего напряжения ( $\sigma$ ) и очертание чаши прогиба ( $x_a$ ), температурные условия работы покрытия ( $\Theta$ ) и скорость движения расчетного автомобиля ( $v_a$ ) [16].

Автор полагал, что подстановка этой формулы в уравнение динамической усталости позволит на стадии проектирования оценивать и сравнивать выносливость асфальтобетона в различных слоях. Однако данная формула не нашла практического применения в связи со сложностью определения большого числа экспериментальных исходных данных.

В работе [88] А. В. Руденский отметил, что поскольку соотношение модулей упругости асфальтобетона, связано с длительностями действия нагрузки формулой:  $E_1/E_2 = (t_2/t_1)^m$  то, следовательно, большему сроку службы дорожного покрытия будет соответствовать большее значение расчетного модуля упругости материала. Расчетное значение модуля упругости асфальтобетона  $E_p$  с учетом усталости в первом приближении может быть определено по формуле с учетом коэффициента усталости:

$$E_p = E_{рабл} \left( \frac{t_m}{t_{cm}} \right)^m, \quad (1.18)$$

где  $E_{рабл}$  – расчетное значение модуля упругости, МПа;

$m$  – коэффициент усталости;

$t_{cm}$  – срок службы покрытия при  $E_{рабл}$ , ;

$t_m$  – срок службы покрытия в реальных условиях.

Коэффициент усталости предлагается определять следующей зависимостью [88, 89].

$$m = K \cdot P \cdot \lg e (\lg e - P \lg t_0)^{-1}, \quad (1.19)$$

где  $K$  – коэффициент, характеризующий особенности состава асфальтобетона и условия его работы в покрытии;

$P$  – показатель пластичности асфальтобетона;

$e$  – основание натурального логарифма;

$t_0$  – длительность цикла нагружения, с.

Следует отметить, что данные зависимости также могут быть применимы для определения срока службы модифицированных асфальтобетонов и холодных смесей.

В свою очередь, Б. Г. Печенный исследовал усталостную долговечность битумоминеральных композиций при постоянной деформации и предложил определять усталостную долговечность, в зависимости от амплитуды прикладываемой деформации  $\varepsilon$  с использованием зависимости [90]:

$$N = k \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^n, \quad (1.20)$$

где  $N$  – число циклов до разрушения;

$k$  – коэффициент, зависящий от свойств материала;

$n$  – постоянная, установленная эмпирическим путем.

Также Б. Г. Печенный установил, что для битумоминеральных композиций с увеличением вязкости битумов при испытаниях с постоянной деформацией  $\varepsilon$ , равной  $10^{-4}$  м, усталостная долговечность  $N$  может возрастать по зависимости [90]:

$$N = 6,03 \lg \left[ 100 \frac{V_\delta}{V_\delta + V_n} \right] + 5,99 \lg T_p - 16,34, \quad (1.21)$$

где  $V_\delta$  – объемное содержание битума, %;

$V_n$  – остаточная пористость, %;

$T_p$  – температура размягчения битума по «КиШ», °С.

В большинстве последних работ по исследованию усталости асфальтобетонов, выполненных в США и в Европе [91, 92], для определения числа циклов до разрушения предлагается использовать похожую на (1.20) зависимость, однако с учетом модуля упругости асфальтобетона:

$$N = k_1 \left( \frac{1}{\varepsilon} \right)^{k_2} \left( \frac{1}{E} \right)^{k_3}, \quad (1.22)$$

$N$  – число циклов до разрушения;

$k_1, k_2, k_3$  – лабораторные параметры, полученные для заданных условий испытаний;

$\varepsilon$  – деформация образца асфальтобетона, мм;

$E$  – модуль упругости асфальтобетона, МПа.

Важное значение для срока службы асфальтобетонного покрытия по критерию усталостного разрушения имеет его толщина (экспериментальная зависимость (1.23) получена Г.С. Бахрахом) [6].

$$T = \left( \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_n} \right)^{4,75} T_\delta, \quad (1.23)$$

где  $T$  и  $T_\delta$  – срок службы асфальтобетонного покрытия при данном прогибе и допускаемом прогибе покрытия соответственно;

$\varepsilon_u$  и  $\varepsilon_n$  – деформация (прогиб) в покрытии при  $n$  циклах при допускаемом упругом прогибе или при любом другом значении прогиба покрытия соответственно.

Установлено [6], что срок службы асфальтобетонных покрытий повышенной толщины, например 12 см по сравнению с тонкослойными 5 см и менее по критерию усталостного разрушения 30 лет и 5 лет соответственно. Это свидетельствует том, что тонкие асфальтобетонные слои не могут сопротивляться значительным деформациям при проезде автомобилей, в результате чего возникают постепен-

ные растягивающие напряжения на нижней грани монолитных слоев, приводящие к разрушению тонкослойного асфальтобетонного покрытия.

При увеличении толщины асфальтобетонного покрытия, возникающие в подошве небольшие растягивающие напряжения, требуют значительного времени образования, развития, роста и появления трещины покрытия.

Как показано в работе [38] определяющим внутренним фактором сопротивляемости асфальтобетонов многократным повторным нагрузкам является вид и свойства органического вяжущего:

$$N = \left( \frac{\varepsilon_{\sigma}^{\max}}{\varepsilon} \right)^n, \quad (1.24)$$

где  $N$  – количество повторных нагрузок, вызывающих разрушение материала;

$\varepsilon$  – максимальная амплитуда относительной деформации пленочного битума при каждом цикле «нагрузка – разгрузка»;

$\varepsilon_{\sigma}^{\max}$  – максимальная относительная деформация в битумной пленке от нагрузки, однократное кратковременное приложение, которой разрушает образец материала;

$n$  – константа для данного материала.

Величина  $\varepsilon_{\sigma}^{\max}$  зависит от растяжимости и когезии данного битума при определенных температурных условиях и характеризует прочность битумной пленки и толщину её структурированной зоны [55, 38]. Поэтому при прочих равных условиях выносливость  $N$  битумоминерального материала будет тем выше, чем меньше величина среднего относительного удлинения  $\varepsilon_{\sigma}$  битумных пленок в каждом цикле повторного нагружения.

Проанализировав вышеперечисленные исследования, можно сделать вывод о том, что наиболее информативными критериями оценки усталостной долговечности асфальтобетонов являются: количество циклов до разрушения ( $N$ ) и коэффициент усталости ( $m$ ). При этом видны очевидные различия при определении количественных значений данных критериев. Также следует отметить, что при

определении количества циклов до разрушения исследователи затрагивают чисто механическую сторону вопроса, т.е. влияние на усталость материала только силовых параметров. Структурные особенности материала, а также температурные условия, воздействие водонасыщения в определении основных критериев практически не учитываются, по-видимому, из-за сложности их аналитического описания. К тому же, при определении одних и тех же параметров многие авторы вводят коэффициенты, полученные эмпирическим путем только для заданных условий испытаний. Следовательно, применение данных зависимостей для реальных покрытий достаточно ограничено и не позволяет определить усталостную долговечность с необходимой точностью. Это дает возможность предположить, что проблема оценки усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий, с учетом реальных условий эксплуатации нежестких дорожных одежд является не достаточно решенной.

#### **1.4 Способы повышения усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий нежестких дорожных одежд**

В связи с постоянно меняющимися условиями эксплуатации возрастают требования к эксплуатационным свойствам вяжущих материалов и асфальтобетонов, что вызывает необходимость поиска новых способов повышения их долговечности [51].

В решении этой проблемы на сегодняшний день можно выделить два основных направления [93]:

- устройство трещинопрерывающих (армирующих) прослоек;
- повышение прочности и деформативности асфальтобетона.

В качестве армирующих прослоек в дорожном строительстве применяют геосинтетические материалы. К одним из перспективных направлений относится использование тканых геосеток из высокопрочных материалов. Использование геосеток позволяет повысить долговечность дорожных конструкций, предотвратить распространение отраженных трещин из старого покрытия на новый слой

асфальтобетона, увеличить допустимую несущую нагрузку дорожных одежд [94].

Второе направление в решении проблемы усталостной долговечности дорожных конструкций достигается:

- введением в состав асфальтобетона армирующих волокнистых наполнителей;
- улучшением физико-механических и деформационно-прочностных свойств органических вяжущих [93].

В практике мирового и отечественного дорожного строительства установлено, что принципиального улучшения качества асфальтобетона добиваются за счет направленного регулирования его свойств и, прежде всего, за счет расширения интервала пластичности, понижения температуры стеклования, повышения когезии и адгезии органических вяжущих [8].

Хронологически одним из первых качественных достижений в отношении битума в нашей стране стало повышение его адгезии, что было достигнуто применением катионактивных ПАВ. Это позволило в несколько раз повысить адгезию битума к поверхности минеральных материалов [8, 71]. Однако использование ПАВ не решило задачи повышения сдвигостойчивости и трещиностойкости покрытий и не позволило добиться необходимого сопротивления к развитию в нем пластических деформаций [8].

Начиная с середины XX в. для повышения физико-механических и прочностных свойств дорожных асфальтобетонов широкое распространение получили модифицирующие добавки: каучуки, регенерированная резина, сера, полимеры и др.

Применение каучуков в качестве модifikаторов дорожных битумов позволило обеспечить достаточно высокий комплекс физико-механических свойств асфальтобетона на маловязких битумах, а также на битумном сырье из тяжелой нефти [71, 95, 96]. Введение каучуков позволило снизить температуру хрупкости и повысить теплостойкость материала, что способствует большей деформативной способности асфальтобетона, в том числе и при переменной нагрузке [14, 96].

А. В. Руденским и И. М. Руденской выполнены исследования асфальтобе-

тонов, содержащих дробленую резину. Было доказано, что применение девулканизированной резины в качестве модификатора битумов повышает эластичность вяжущего, понижает температуру хрупкости и расширяет интервал пластичности до 70 – 80 °С, что способствует увеличению трещиностойкости асфальтобетонов в области отрицательных температур [15].

Одним из эффективных модификаторов битума является сера. Разработаны составы высокопрочного асфальтобетона с использованием серы из местных отходов промышленности для дорожного строительства. Добавка серы выполняет двойную роль в структуре материала: повышает его прочность и значительно улучшает сцепление вяжущего с поверхностью минерального заполнителя [15, 98 – 100]. Битумосерные материалы имеют повышенную прочность при сжатии, высокие значения коэффициента водостойкости при длительном водонасыщении [99].

В работах [10, 12, 14, 101 – 103] сформулированы основные требования, предъявляемые к полимерным добавкам. Основным условием получения термодинамически устойчивой системы «органическое вяжущее – полимер» является совместимость компонентов данной системы, которая определяется способностью полимера растворяться в вяжущем до надмолекулярного уровня. Только при выполнении данного условия возможно получить существенное улучшение свойств органических вяжущих.

Совместимость битума и полимера, прежде всего, зависит от химического состава вяжущего, свойств полимера, а также от сходства структуры полимера со структурой углеводородов, входящих в состав битума [12, 14, 103].

Исследователи отмечают, что при модификации битумов полимерами могут возникнуть несколько типов структур модифицированного вяжущего [14, 102]. Первый тип – битумополимерное вяжущее характеризуется тем, что битум выступает в роли матрицы, а полимер – фазой. Во втором типе (полимербитумное вяжущее) основной составляющей, определяющей свойства модифицированного вяжущего, является полимер, а фазой битум. Третий тип является переходным и приближается к первому или второму типу в зависимости от качества битума и

содержания полимера [104].

Содержание полимера в битуме в большинстве случаев устанавливают эмпирически, исходя из функционального назначения полимер-модифицированного вяжущего и характеристикой основного показателя, которому он должен соответствовать. В качестве критериев оценки свойств модифицированного вяжущего предлагается использовать показатели пенетрации, растяжимости, температуры хрупкости, эластичности [105]. При этом существование структурной полимерной сетки предлагается устанавливать реологическими методами [10]. В большинстве случаев концентрация полимера до 2 – 3 % соответствует достаточно резкому изменению кривой эластичности. Это может свидетельствовать об образовании в системе сопряженной асфальтено-полимерной сетки. Увеличение содержания, например, термоэластопласта до 5 – 6 % мас. ведет к существенному понижению температуры хрупкости, что свидетельствует о формировании в системе собственно полимерной сетки [103].

С выходом на Украине национального стандарта ДСТУ Б В.2.7-135:2007 «Бітуни дорожні, модифіковані полімерами» начал этап широкомасштабного применения в дорожной отрасли органических вяжущих нового поколения.

Полимеры, применяемые для улучшения показателей качества дорожных битумов, принято подразделять на следующие группы [13, 14]:

- каучукоподобные полимеры;
- термоэластопластические полимеры;
- термопластичные эластомерные реакционноспособные полимеры (терполимеры).

Термоэластопласти являются наиболее распространенными полимерными модификаторами (свыше 60 % мирового потребления) [106]. К ним относятся различные виды блоксополимеров стирола – SBS, SIS, SE/BS. Наиболее распространеными марками полимеров типа SBS являются: Кратон 1101, Карифлекс ТР 1101, 1184; Финапрен 502; Сопрен 411; Европен Сол-Т-161 [10, 13, 14, 93]. К российским аналогам таких добавок можно отнести ДСТ-30-01 и ДСТ-30Р-01 [103]. Отмечается, что термоэластопласти снижают накопление асфальтобетоном пла-

стических деформации благодаря эластомерной части молекул термоэластопласта, имеющей спиралевидное строение. Это позволяет полимеру при приложении растягивающей силы удлиняться в 10 раз, а при снятии нагрузки восстанавливать свою прежнюю форму [107].

В СоюздорНИИ, под руководством Л. М. Гохмана доказана высокая эффективность применения в асфальтобетоне битумов, модифицированных дивинилстирольными термоэластопластами (ДСТ). Полимеры этого класса имеют способность к высокоэластическим деформациям в достаточно широком интервале температур: от -80 °C до +80 °C [101]. Получаемое битумополимерное вяжущее характеризуется присутствием пространственной структурной сетки, образованной макромолекулами ДСТ, о чем свидетельствует повышенная эластичность и прочность в широком интервале температур [52].

Асфальтополимербетоны, полученные на основе рассмотренного полимерно-битумного вяжущего, отвечают требованиям, предлагаемым к горячему асфальтобетону, превосходя его по деформативной способности при отрицательных температурах и по прочности при высоких температурах, а также по водо- и морозостойкости. Такие асфальтобетоны характеризуются более низким содержанием пор; значительная часть пор замкнута [101].

Добавку термоэластопласта ДСТ рекомендуется вводить в количестве не более 2 – 3 % мас. в окисленные битумы. При более высокой концентрации ДСТ-30-01 или ДСТ-30 Р-01 происходит расслоение полимер-битумного вяжущего. Автор предлагает применять битумополимерные вяжущие на дорогах с интенсивным движением комплексную добавку на основе ДСТ и ПАВ. Полученное вяжущее (полимер + ПАВ), улучшает сцепление с частицами минеральной части, а также повышает прочность модифицированных асфальтобетонов [108].

В работе [109] выполнены исследования усталостной долговечности асфальтобетонов с 2 % ДСТ. Установлено, что значение прочности на растяжение при изгибе после 25000 циклов при 20 °C у модифицированного асфальтобетона составило 0,48 МПа, в то время как обычного асфальтобетона всего 0,27 МПа. Асфальтобетоны с 2 % ДСТ характеризуются более высоким модулем упругости,

по сравнению с обычными асфальтобетонами в 1,6 – 1,7 раз.

Иностранные ученые отмечают, что модификация битума сополимером типа SBS Карифлекс ТР приводит к повышению до 1,3 – 1,5 раз усталостной долговечности при переменном нагружении [110].

Исследования, выполненные W. Peffekovem, Y. Counturier и др. [111, 112], доказали, что применение битума, модифицированного сополимером типа SBS марки Styrelf 13, приводит к повышению прочности асфальтобетона на растяжение при изгибе, а также к повышению устойчивости асфальтобетона к пластическим деформациям при динамических нагрузках (рис. 1.11).

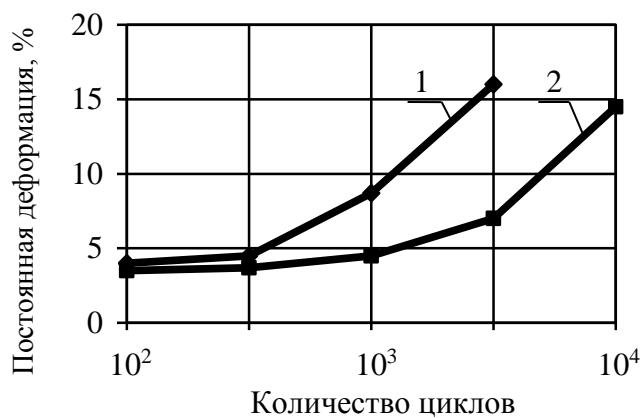


Рис. 1.11. Характер развития пластической деформации асфальтобетона в зависимости от количества циклов на: 1 – обычном битуме, 2 – на битуме, модифицированном добавкой Styrelf 13 [111]

Данные результаты подтверждены российскими учеными [113, 114], которые также доказывают эффективность применения модifikатора SBS Styrelf 13 для асфальтобетонов.

В работе [114] предлагаются результаты исследований битумов с различным процентным содержанием различных модификаторов марок СКМС-30 АРКМ-15, Кратон Д 1101, РТЭП, Каудест-Д и др. По результатам исследования Ю. И. Калгин определил, что асфальтобетон на основе полимерных модификаторов обладает пониженной (в среднем в 1,5 раза) чувствительностью к возникновению пластических деформаций в отличии от обычного асфальтобетона.

Модификация битумов добавками типа SBS марки Кратон Д 1101, рези-

ны РТЭП, адгезионной добавки Кадэм-Вт, позволяет повысить усталостную долговечность асфальтобетонов. Модификация битума 2 % полимера типа SBS марки Кратон Д 1101 позволила повысить усталостную долговечность асфальтобетона типа Б (при частоте нагружения 10 Гц и нагрузке 0,6 МПа) в 2,5 – 3 раза, 3 % резины РТЭП повысило усталостную долговечность асфальтобетона в 1,5 раза, 2 % добавки Кадэм-Вт – в 1,2 раза [47].

Автор подчеркивает, что образование в органическом вяжущем пространственной полимерной сетки замедляет стадию образования и накопления микродефектов благодаря эластичным молекулам полимера, способным снижать концентрацию напряжений в результате изменения своего положения без разрыва связей. В результате чего создаются условия для повышения усталостной долговечности модифицированного асфальтобетона [47].

В работах [10, 115] исследованы реологические свойства асфальтобетонов при динамическом нагружении. На основании лабораторных испытаний было установлено, что полученные значения модулей упругости асфальтобетонов, модифицированных полимером Кратон Д 1101, в 1,2 – 1,8 раз превышают значения модулей упругости стандартных асфальтобетонов. Также расширяется интервал пластичности модифицированного вяжущего от 4 до 20 °С и понижается условная температура стеклования на 4 – 5 °С.

Применение латекса марки Elasta 104 в роли модifikатора битума при массовой концентрации до 10 % приводит к понижению пенетрации более чем в 2 раза, повышению на 10 °С температуры размягчения битума, а также повышению в 1,5 раза модуля упругости асфальтобетона при низких температурах [116].

Итальянские ученые [117] показали положительное влияние применения добавки бутадиенстиренового латекса на свойства асфальтобетонов. Повысилась устойчивость асфальтобетона к образованию пластических деформаций при положительных температурах, а также водо- и морозостойкость. Исследования также показали, что введение в битум карбоксильного латекса приводит к тому, что асфальтобетон в несколько раз более устойчив к колеобразованию и имеет боль-

шую усталостную долговечность, особенно при положительных температурах.

В работе [11] выполнено исследование прочности на растяжение при изгибе асфальтополимербетона и асфальтобетона типа «Г». Асфальтополимербетон содержал битум, модифицированный 4 % латекса марки Butonal NS 104. Установлено, что прочность на растяжение при изгибе модифицированного асфальтобетона при температуре минус 10°C выросла по сравнению с обычным асфальтобетоном в 1,14 раза, при 0°C – в 1,19 раза, при 20 °C – в 1,44 раза.

Усталостная долговечность дорожного покрытия при использовании в асфальтобетоне латекса Butonal в 1,3 – 2,5 раз выше, чем при использовании традиционных асфальтобетонов [118] (рис. 1.12).

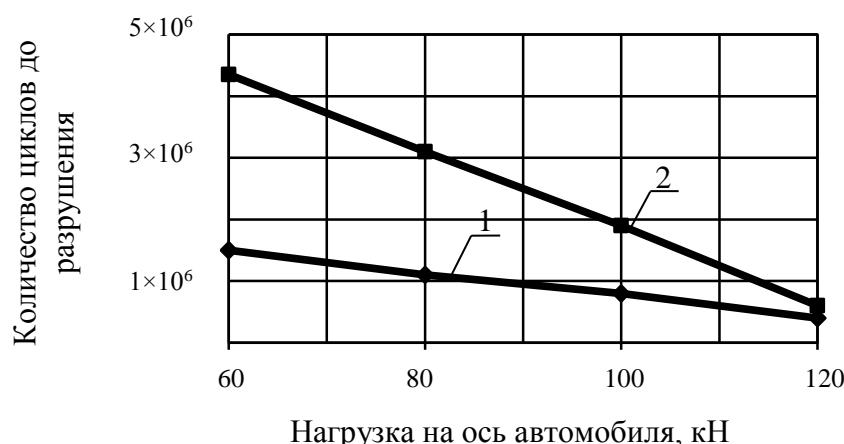


Рис. 1.12. Зависимость усталостной долговечности асфальтобетона на органическом вяжущем (тип «Б») от нагрузки на ось автомобиля: 1 – нефтяной дорожный битум БНД 60/90, 2 – битум БНД 60/90, модифицированный латексом Butonal [118]

Установлено, что введение в битум до 3 % карбоксильного латекса в 1,5 – 2 раза повышает устойчивость асфальтобетона к пластическим деформациям при положительных температурах [119].

Наряду с эффективным и универсальным полимером SBS в ряде стран синтезированы специальные полимеры для модификации нефтяных дорожных битумов. Так, начиная с 90-х гг. XX столетия в странах Западной Европы (Германия, Италия, Бельгия и др.) характерна тенденция широкого применения термопла-

стов, в частности этиленвинилацетата (EVA) в качестве модифицирующей добавки битума взамен SBS [10, 13, 14, 120 – 122]. Этиленвинилацетат занимает второе место по объемам мирового потребления полимерных добавок для модификации нефтяных дорожных битумов (19 %) [123].

EVA в отличие от SBS имеет полярные молекулы, которые активно взаимодействуют с компонентами битума (асфальтенами, ароматическими соединениями) и минеральными материалами в асфальтобетоне. Взаимодействие осуществляется благодаря раскрытию двойных связей углеводородной цепи полимера и использования потенциала полярных ацетатных групп, заключенного в свободных электронных парах кислорода [13, 120, 122, 123].

Этиленвинилацетат, как и SBS способен образовывать пространственную полимерную сетку в битуме. Введение в битум БНД 90/130 5 % EVA при 180 °C приводит к повышению температуры размягчения с 45,5 °C до 61,5 °C, эластичности при +13 °C от 12,5 % до 50,0 %; при этом если температура хрупкости исходного битума – минус 21 °C, то модифицированного EVA – минус 18 °C [13]. Таким образом, можно отметить, что введение EVA в битум повышает устойчивость асфальтобетонов к возникновению пластических деформаций.

В последнее время на рынках России, Белоруссии, Украины и других стран СНГ появился новый модификатор – термопласт американского концерна «Dupon» под торговой маркой «Elvaloy-AM». Главным отличием данного продукта от традиционных термопластичных полимеров состоит в химическом взаимодействии между асфальтенами битума и активными группами полимера [13]. В целом механизм действия данного полимера достаточно близок к действию этиленвинилацетата EVA.

Установлено, что введение в битум этиленвинилацетата в количестве 1,5 – 2,5 % мас. приводит к повышению адгезии в 4 раза, расширению интервала пластичности битумополимерного вяжущего на 15 – 30 °C. Эластичность модифицированного вяжущего достигает 60 – 90 % [92, 124, 125].

В работах [105, 125] отмечается, что асфальтополимербетонные смеси,

модифицированные Elvaloy-AM, характеризуются повышенной уплотняемостью в интервале температур 70 – 130 °С, а асфальтополимербетоны повышенным сопротивлением сдвигу при высоких положительных температурах (условная жесткость при 60°С – 4641–5953 Н/мм), повышенной плотностью, длительной водостойкостью и атмосферостойкостью.

Широкое применение как полимерные добавки к битуму получили и эпоксидные олигомеры [13, 14, 126]. Эпоксидные олигомеры под действием отвердителей образуют в битумно-эпоксидной композиции прочную пространственную сетку, усиливают адгезию модифицированного вяжущего. Прочность покрытия при сжатии возрастает до 35 – 38 МПа, водопоглощение составляет не более 0,2 % [15].

Данные, приведенные в [127], свидетельствуют о том, что прочность при многократном изгибе асфальтополимербетона на основе эпоксидной смолы ЭД-20, сланцевого битума и отвердителя выше на 10 – 20 % по сравнению со стандартными асфальтобетонами. Установлено значительное повышение до 40 – 50 % значений модулей упругости асфальтобетонов при изгибе.

Рассмотрено использование гранулированного вторичного полиэтилена высокого давления (ПЭВД) в качестве модifikатора дорожных битумов [128]. Установлено, что полиэтилен заметно структурирует вяжущее, благодаря чему при четырехпроцентной концентрации ПЭВД пенетрация битумов различных марок понижается в среднем в 2,2 – 2,5 раза, температура размягчения увеличивается на 10 °С. Это дает возможность предположить, что асфальтобетоны на основе данного битумополимерного вяжущего будут обладать большей прочностью на растяжение при изгибе в области положительных температур.

В работах [59, 105, 129, 130], выполненных под руководством профессора В. И. Братчуна, установлено, что существенного повышения прочности асфальтобетонов достигается при комплексном регулировании его микроструктуры модификацией битума полимерными добавками и поверхностной активацией поверхности минерального порошка растворами полимеров и олигомеров. Показано [48,

105, 129], что активация поверхности минерального порошка каучуком СКМС-30 (0,5 % мас.), полимерсодержащими отходами производства эпоксидных смол (ПОЭС), кубовыми остатками ректификации стирола и др. приводит к формированию на поверхности минерального порошка структурно-упрочненного слоя полимера (олигомера), который повышает адгезию битумополимерного вяжущего к поверхности минерального порошка вследствие увеличения количества контактов сегментов надмолекулярных образований полимеров с активными центрами олеофильной поверхности. Это создает прочную и эластичную матрицу асфальтобетона с высокой адгезией и когезией, что и определяет долговечность модифицированного асфальтобетона в условиях эксплуатации.

Как показывают результаты рассмотренных выше исследований, применение различных модifikаторов позволяет повысить эксплуатационные характеристики органических вяжущих, что положительно сказывается на усталостно-прочностных свойствах асфальтобетонов.

### **Выводы по разделу 1:**

1. Анализ работ Г. С. Бахраха, Л. Б. Гезенцевя, В. А. Золотарева, Н. Н. Иванова, А. М. Кривисского, Б. С. Радовского, А. В. Руденского, А. О. Салля, В. М. Смирнова и др. свидетельствует о том, что асфальтобетон в процессе эксплуатации испытывает сложное напряженно-деформируемое состояние, вызванное одновременным появлением растягивающих и сжимающих напряжений при действии транспортной нагрузки, которая имеет циклический характер, при этом время действия нагрузки на покрытие составляет 0,1 – 0,4 с, а частотный спектр воздействия может варьироваться в пределах от 0,01 до 30 – 50 Гц.

2. Показано, что основными факторами, непосредственно влияющими на усталостную долговечность асфальтобетона, являются его структурные особенности (вязкость и качество органического вяжущего, гранулометрия и минералоги-

ческий состав минеральных составляющих, плотность, пористость), величина и время действия циклических нагрузок, температурные и влажностные условия эксплуатации, процессы старения. Это подразумевает, что влияние данных факторов в ходе проведения экспериментов необходимо оценивать комплексно и с учетом временного фактора.

3. Теоретические и экспериментальные исследования процессов и явлений, определяющих механизм усталостного разрушения, позволили установить, что рост усталостных трещин при воздействии переменного нагружения происходит главным образом по прослойке органического вяжущего или по контактной зоне «органическое вяжущее – минеральный материал». Следовательно, для повышения деформационно-прочностных свойств асфальтобетона в условиях воздействия динамических нагрузок, влаги, агрессивных сред необходимо улучшать качество органических вяжущих (повышать термостабильность, расширять интервал пластиичности, увеличивать адгезионно-когезионные свойства, эластичность), а также использовать асфальтобетоны с рациональным гранулометрическим составом, имеющим наиболее плотную структуру.

4. Основными критериями, характеризующими усталостную долговечность асфальтобетонов являются: количество циклов до разрушения и коэффициент усталости. Анализ большинства источников показал значительные различия при определении количественных значений данных критериев. При определении количества циклов до разрушения исследователи задают значения приложенных напряжений или деформаций. Структурные особенности материала, а также температурные условия, воздействие водонасыщения в определении усталостной долговечности практически не учитываются, по-видимому, из-за сложности их аналитического описания. К тому же сложность оценки усталостной долговечности, связанной с учетом различных факторов, влияющих на асфальтобетон, вынуждает исследователей вводить коэффициенты, полученные эмпирически только для заданных условий испытаний. Следовательно, данные зависимости в отношении реальных покрытий не позволяют оценить усталостную долговечность с не-

обходимой точностью.

5. Показано, что наиболее существенного повышения деформационно-прочностных свойств асфальтобетонов возможно добиться комплексной модификацией микроструктуры асфальтобетона, а именно, введением в органические связующие различных полимерных добавок, таких как: термоэластопласти типа SBS (Kraton D 1101, Kariflex-TP, Styrelf 13), термопласти (EVA, полистирол, полиэтилен), терполимеры (Elvaloy-AM), латексы (Butonal) и др. и механоактивацией поверхности минеральных порошков ПАВ, растворами полимеров. Представленные исследования показали, что такой критерий усталостной долговечности, как количество циклов до разрушения при кратковременном изгибе, является достаточно информативным показателем оценки эффективности модифицирующих добавок, применяемых в асфальтобетоне.

## РАЗДЕЛ 2

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ ИССЛЕДОВАНИЙ

#### **2.1. Предполагаемые закономерности формирования структуры модифицированных асфальтобетонов, характеризующихся повышенной усталостной долговечностью**

Асфальтобетон в дорожной конструкции и, особенно в верхнем слое покрытия в процессе эксплуатации подвергается: динамическим и долговременным статическим нагрузкам от транспортного потока, воздействию температурно-влажностных режимов и различных агрессивных сред (кислот, щелочей) и т.д. [2, 12, 51, 79].

Исследования, выполненные научными школами под руководством В. И. Братчуна, Л. Б. Гезенцевя, Н. В. Горелышева, В. А. Золотарева, И. В. Королева, В. В. Мозгового, П. А. Ребиндера, И. А. Рыбьева, и др. [2 – 30] свидетельствуют о том, что структура асфальтобетона, является одним из решающих внутренних факторов, определяющих требуемую деформативность в широком интервале температур, высокую водостойкость и, следовательно, долговечность дорожного покрытия. Структура асфальтобетона рассматривается как результат физико-химического взаимодействия между компонентами органического вяжущего и минерального материала [4, 10, 26, 52]. Частицы минерального материала сорбируют наиболее подвижную малитеновую часть вяжущего, благодаря чему наиболее легкие фракции битума проникают внутрь минеральных зерен (минерального порошка), а на поверхности минеральных частиц образуются сольватные оболочки из высокоструктурированной асфальтено-смолистой части битума, остальная же часть органического вяжущего находится в свободном состоянии [26, 52]. При этом доказано, что сцепление структурных элементов (зерен минерального материала) в коагуляционных контактах осуществляется в основном через равновесные по толщине тонкие прослойки органического вяжущего. Следовательно, свойства микроструктуры (структура асфальтовяжущего) будут опреде-

лять работу асфальтобетона в дорожной одежде. [52].

Как отмечено в исследованиях [26, 33, 42, 49, 52, 55], процессы усталостного трещинообразования в асфальтобетонном покрытии происходят когда материал на находится в относительно упругом реологическом состоянии, поэтому возможно ограничиться рассмотрением условий, при которых асфальтобетон работает в упруговязкой и в упругохрупкой стадиях. При воздействиях на асфальтобетон динамических нагрузок возможно несколько вариантов развития усталостного разрушения. В первом случае асфальтовяжущее может находиться в условиях упруговязкого состояния, т.е. внутренние напряжения могут релаксировать в течении небольшого промежутка времени [52]. Как уже отмечалось ранее, поры и дефекты структуры будут способствовать тому, что напряжения при циклических нагрузлениях будут концентрироваться именно в данных областях [49, 52, 55]. При достаточно прочных адгезионных связях вяжущего с поверхностью минеральных материалов разрушение системы начнется с деформируемого участка структуры свободного битума. При этом между циклами приложения нагрузки возможна релаксация напряжений в свободном битуме, что сопряжено с перестройкой молекул и занятием их равновесного положения. Возникновению микротрещин будут способствовать так называемые волосные трещины, основу которых составляют разрывы высокомолекулярных структурообразующих элементов вяжущего и, следовательно, разрушение будет носить когезионный характер [52, 61].

Второй случай предусматривает, что в зоне контакта органического вяжущего и минерального заполнителя при недостаточных адгезионных связях растягивающие напряжения могут достигнуть таких значений, при которых прочность адгезионных связей уменьшится и разрушение приобретет уже адгезионный характер. В этом случае трещина будет обходить зерно минерального заполнителя по контактной зоне, как по наиболее выгодному энергетическому пути разрушения [52].

Таким образом, научная гипотеза данного исследования состоит в том, что получение асфальтобетона для верхних слоев дорожного покрытия, обладающего повышенной усталостной долговечностью, возможно при создании такой струк-

туры асфальтобетона, которая рационально сочетает наиболее плотную упаковку полидисперсных частиц минерального остова (микроструктура плавно переходит в мезоструктуру, а затем в макроструктуру) и непрерывную пространственную сетку эластичного органического вяжущего с высокими значениями адгезии и когезии при минимально возможной толщине асфальтовяжущего вещества. В связи с тем, что важнейшей составляющей структуры долговечного асфальтобетона является контактная зона – зона взаимодействия органического вяжущего с поверхностью минеральных материалов, регулирование объемного и структурированного битума, а также интенсификация процессов взаимодействия на поверхности раздела фаз «битум – минеральный материал» позволит значительно повысить деформационно-прочностные свойства асфальтобетона [12, 105, 129].

Наиболее эффективными системами с повышенной усталостной долговечностью являются модифицированные асфальтобетоны, которые должны сочетать комплексную модификацию минеральных материалов, в частности, поверхностную активацию минерального порошка полимерными добавками, а также модификацию органического вяжущего полимерными или комплексными добавками [10, 12, 52, 69, 79, 105, 130 – 132].

В структуре асфальтобетона необходимо уменьшать количество пор и дефектов, которые способствуют концентрации внутренних напряжений в наиболее слабых ее местах, в результате чего усталостные трещины инициируются именно в этих областях [52]. В связи с этим для получения долговечного асфальтобетона рекомендуется проектировать II тип макроструктуры асфальтобетона, который позволяет наиболее эффективно использовать как свойства пленочного битума, так и пространственного каркаса, образованного зернами щебня и способствующего повышению усталостной долговечности и сдвигостойчивости при положительных температурах, за счет увеличения протяженности плоскостей скольжения и их шероховатости (достигаются максимальные значения модуля деформации, предела прочности, внутреннего трения и зацепления) [2, 4, 131].

В качестве модифицируемой среды целесообразно использовать битум III структурного типа, который термостабилен, а мальтеновой части достаточно для

диспергирования полимера до надмолекулярного и молекулярного уровней. В этом случае при модификации вяжущего полимерными добавками в битуме образуется самостоятельная пространственная полимерная сетка, прочность которой будет определяться количеством узлов и энергией взаимодействия в них, а эластичность кинетической гибкостью цепей между узлами сетки [71, 131].

Рассмотрим, какие явления и процессы могут наблюдаться при модификации битума одними из наиболее эффективных полимерных добавков, таких как: бутадиенметилстирольный каучук СКМС-30 и этиленглицидилакрилат марки Elvaloy-AM [71, 105, 114, 129, 130].

Бутадиенметилстирольный каучук, этиленглицидилакрилат и модифицируемый битум должны быть совместимыми системами. Только при этом условии можно получить существенное улучшение структуры и свойств органических вяжущих. Для этого необходимы близость значений параметров растворимости полимера и компонентов дисперсионной среды органического вяжущего) [12, 71, 105, 114, 129, 130].

Значения параметров растворимости СКМС-30, Elvaloy-AM и алкановых фракций битума достаточно близки:

$$\delta_n \approx \delta_B, \quad (2.1)$$

где  $\delta_n$ ,  $\delta_B$  – параметры растворимости полимерных добавок и алкановых растворителей битума, соответственно.

В работе [131] расчетным методом, по уравнению Гильденбранда, определен параметр растворимости алкановых фракций битума с температурой кипения до 240 °C  $\delta_B = 16,13 \left( \frac{MДжс}{m^3} \right)^{0,5}$ . Параметр растворимости бутадиенметилстироль-

ного каучука составляет  $\delta_{СКМС-30} = 16,8 - 17,5 \left( \frac{MДжс}{m^3} \right)^{0,5}$  [133]. В связи с тем,

что полимерную основу Elvaloy-AM составляет полиэтилен, модифицированный глицидиловыми и акрилатными функциональными группами (для полиэтилена

$\delta_{Elv} = 15,9 \left( \frac{MДж}{m^3} \right)^{0,5}$  ), поэтому  $\delta_{Elv} (15,9) \approx \delta_B (16,13)$ , т.е. битум и Elvaloy-AM

также термодинамически совместимы в области высокоэластического состояния полимера[105].

Следовательно, при оптимальных температурно-временных режимах производства битумополимерных вяжущих данные полимерные добавки в битуме должны растворяться, или, по меньшей мере, диспергироваться в нем до надмолекулярного уровня без деструкции [105].

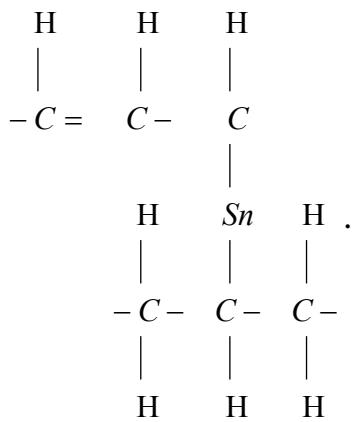
Каучук СКМС-30 целесообразно вводить в нагретый и расплавленный битум, предварительно растворив его в углеводородных фракциях (к примеру, в очищенном бензине или в индустриальном масле). В этом случае при концентрации бутадиенметилстирольного каучука 2 – 3 % мас. в органическом вяжущем в области эксплуатационных температур сформируется термофлуктуационная пространственная полимерная сетка. Узлами цепей из макромолекул и надмолекулярных образований бутадиенметилстирола являются  $\alpha$ -метилстирольные блоки, которые объединяются между собой с понижением температуры до точки перехода полистирола в стеклообразное состояние (около 80 °C ) [131].

Для упрочнения термофлуктуационной бутадиенметилстирольной пространственной сетки битумополимерную композицию рекомендуют структурировать активными дисперсными наполнителями и, в частности, технической серой [71, 99, 131].

При объединении технической серы с битумополимерным вяжущим при температуре около 180 °C наблюдаются следующие явления. По мере увеличения концентрации элементарной серы произойдет увеличение общей структуированности системы в результате того, что незначительная часть серы примет участие в вулканизации бутадиенметилстирольного каучука (образуются преимущественно

моносульфидные –  $C - | S - | C -$  и поперечные полисульфидные связи между мак-

ромолекулами сополимера [131, 132]



До 10 % мас. серы вступит в химическое взаимодействие с углеводородами битума с образованием меркаптанов, сульфидов и полисульфидов, распадающихся далее с образованием непредельных соединений и сероводорода. Произойдет

$-S-$  — дегидрирование в алкены, алкадиены, ацетилен или бензол, которые могут  
 ||  
 далее осерняться и полимеризоваться с выделением  $H_2S$ . Возможны процессы глубокого осернения и  $S$ -дегидрирования, приводящие к образованию высокомолекулярных асфальтеноподобных или углеподобных веществ полимерных сульфидов углерода. Следует также ожидать « $S$ -окисления» в сероуглерод [132, 134].

Часть серы растворится (20-26 % мас). Остальная сера диспергируется в битуме до коллоидного уровня. Именно на поверхности этой серы большая часть растворенного бутадиенметилстирольного каучука перейдет в структурированное состояние. Это приведет к усилению коагуляционного структурообразования в результате взаимодействия частиц серы через прослойки полимера, толщина которых уменьшается по мере увеличения степени объемного наполнения битумополимерного вяжущего серой. При температуре эксплуатации растворимость серы снижается до 8 % мас. Остальная часть, растворенной в битуме серы, выкристаллизовывается [132].

Таким образом, в битумополимерсерном вяжущем возникнет трехмерная сопряженная сетка, узлами которой являются асфальтены, химически связанная сера, кристаллы серы и коллоидно диспергированная сера [131].

Активация поверхности минерального порошка СКМС-30 (механоактивация или поверхностная активация из раствора бензина) должна привести к фор-

мированию на поверхности структурно-упрочненного слоя полимера, который повысит адгезию битумополимерсерного вяжущего к поверхности минерального порошка вследствие увеличения количества контактов сегментов надмолекулярных образований сополимера СКМС-30 с активными центрами олеофильной поверхности, диффузии макромолекул бутадиенметилстирольного каучука в слой СКМС-30 на поверхности минерального порошка (МП). Это создаст прочную и эластичную пространственную матрицу асфальтополимерсеробетона с высокой адгезией и когезией [129, 131, 132].

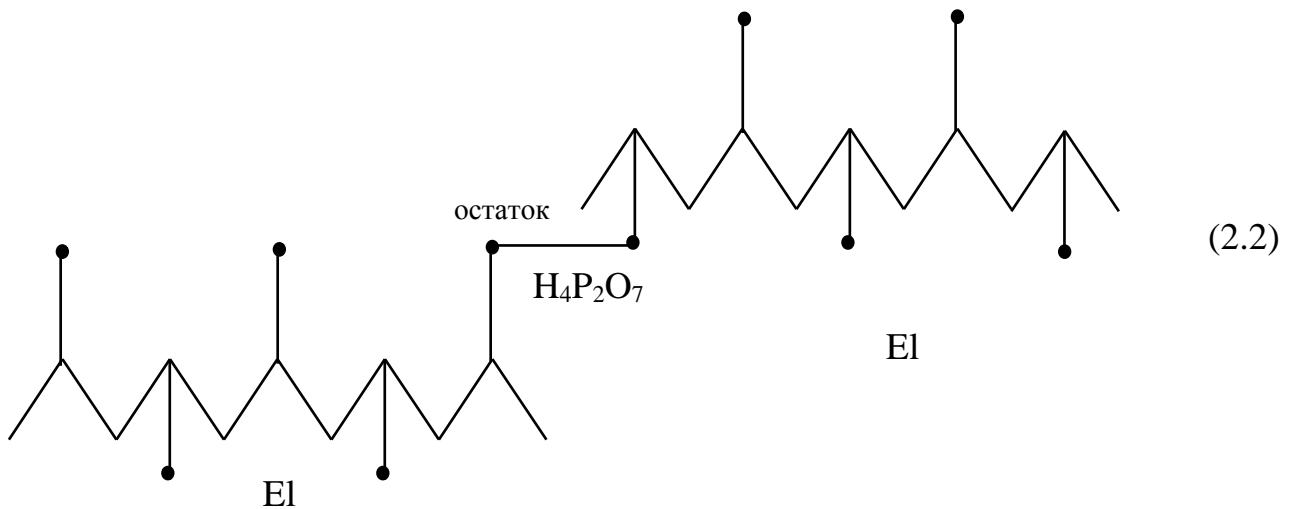
Комплексная модификация микро-, мезо- и макроструктуры дорожного асфальтобетона одновременной поверхностной активацией щебня, песка и минерального порошка этиленглицидилакрилатом и модификацией нефтяного дорожного битума этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой должна привести к следующим явлениям и процессам.

Установлено, что при концентрации в органическом вяжущем терполимера Elvaloy-AM 2,0 % мас. и 0,2 % полифосфорной кислоты (ПФК-105) в модифицированном битуме формируется сетчатая пространственная структура из молекул и надмолекулярных образований терполимера в результате реакций гидратации, конденсации и катионной полимеризации активных протонов ПФК-105 с глицидиловыми группами этиленглицидилакрилата, а также с реакционными группами битума (реакции этерификации гидроксил- и карбоксилсодержащих компонентов) [105, 129, 135].

Следовательно, значительная часть дисперсионной среды нефтяных битумов будет переведена макромолекулами и надмолекулярным образованиями в адсорбционно-сольватное состояние. Это позволит увеличить вязкость битумополимерного вяжущего, так как вязкость в области однофазных полимерных растворов линейно связана с объемной концентрацией вводимого полимера [136]. Можно предположить, что упрочнение структуры органического вяжущего приведет к смешению в область более высоких положительных температур перехода модифицированного вяжущего в вязко-текучее состояние, к повышению температуры размягчения и когезии. Так как модифицированное вяжущее представляет гомогенный структуриро-

ванный концентрированный раствор этиленглицидилакрилата в битуме, то переход в область стеклования битумополимерного вяжущего будет соответствовать температурной области стеклования модифицируемого нефтяного дорожного битума [135, 136].

Олеофильный структурно-упрочненный слой этиленглицидилакрилата при оптимальной массовой концентрации активированной поверхности минеральных материалов, которую целесообразно определять по зависимости:  $R_{max} = f(C_m)$  (где  $R_{max}$  – предел прочности при сжатии бетона, МПа;  $C_m$  – концентрация полимера на поверхности минеральных материалов, %), должен обеспечить молекулярное сродство с активированной поверхностью минеральных материалов битумополимерным вяжущим. При этом на поверхности взаимодействия «МП – этиленглицидилакрилат – полифосфорная кислота», содержащаяся в модифицированном битуме, возможно образование сетчатых структур по схеме (2.2), что определит монолитность и изотропность модифицированного асфальтобетона [135, 136].



Поверхностная активация минеральных материалов этиленглицидилакрилатом обеспечит тонкое регулирование молекулярных свойств поверхности щебня, песка и минерального порошка. Это приведет к максимальному сродству ее с битумополимерным вяжущим, что обеспечит полное смачивание ее модифицированным органическим вяжущим. Произойдет максимальное сближение молекулярных свойств в процессе производства асфальтополимербетонных смесей БПВ

модифицированного нефтяного дорожного битума и олеофильной поверхности минеральных материалов (расстояние менее  $5 \cdot 10^{-10}$  м), на котором могут проявляться все виды межмолекулярных взаимодействий [136].

Структурно-упрочненный слой этиленглицидилакрилата на поверхности механоактивированного минерального материала должен обеспечить высокую адгезию битумополимерного вяжущего в результате увеличения количества контактов сегментов надмолекулярных образований этиленглицидилакрилата структурированного ПФК-105 с олеофильной поверхностью и диффузии макромолекул Элвалоя АМ в адсорбционные слои терполимера на поверхности минеральных материалов. Это должно привести к снижению количества пор и дефектов в структуре асфальтобетона, что положительно скажется и на усталостной долговечности материала [130].

Благодаря тому, что данные полимерные добавки способны образовывать в модифицированном битуме длинные полимерные цепочки с широкими разветвлениями в органическом вяжущем, то это приведет к увеличению вязкости, а также эластичности. После снятия кратковременной циклической нагрузки упруго-деформированный заполнитель (полимер) будет стремиться восстановить свою прежнюю форму, но вязкая среда дорожного битума, демпфирует упругие деформации тем значительнее, чем оно пластичнее и толще его прослойки. Поэтому для уменьшения пластических деформаций, которые определяются суммарной остаточной деформацией при многократном приложении нагрузки, увеличения деформаций упругого последействия за определенный период времени необходимо добиваться эффективного перераспределения их с вяжущего вещества на заполнитель.

Предполагается, что повышение усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий в условиях интенсивного грузонапряженного состояния возможно при комплексной механоактивации или поверхностной активации бутадиенметилстирольным каучуком или этиленглицидилакрилатом поверхности структурообразующих макро-, мезо- и микроструктуры асфальтобетона, которая сочетает плотную упаковку полидисперсных частиц минерального остова и непре-

рывную матрицу комплексно-модифицированного асфальтовяжущего вещества с высокими значениями когезии и адгезии к поверхности минеральных материалов.

Кроме этого предполагается что, модифицированные асфальтобетоны будут иметь повышенную долговечность и при действии различных агрессивных сред, так как введение на поверхность модификатора, к примеру, Elvaloy-AM, содержащего глицидиловые функциональные группы будет блокировать поверхность минеральных материалов, делая ее недоступной для сорбирующейся влаги. Механизм данного процесса заключается в том, что карбонильные электроотрицательные группы этиленглицидилакрилата взаимодействуют с ионами кальция на поверхности минерального порошка в результате чего исключается способность ионов кальция гидратироваться [136].

Таким образом, для повышения усталостной долговечности асфальтобетона в конструктивных слоях нежесткой дорожной одежды оптимальной толщины необходимо в процессе проектирования, производства, транспортирования, укладки и уплотнения смеси снизить количество дефектов и несовершенств в бетоне и в пленочном органическом вяжущем, а именно: пор, пустот, усадочных и технологических микротрещин и др. Необходимо обеспечить сплошность и оптимальную толщину пленочного структурировано-упрочненного слоя органического вяжущего с максимальными значениями адгезионно-когезионных и эластических свойств на поверхности минеральных материалов с запроектированной непрерывной гранулометрией минерального остова с минимальной межзерновой пустотностью (3 – 5 %) с обеспечением концентрационного оптимума структурообразующих микро-, мезо- и макроструктуры (соотношение минерального порошка к эффективному битуму – 0,6 – 1,6). Ибо дефекты и несовершенства – это очаги сильных локальных перенапряжений в местах, где наиболее интенсивно могут идти процессы разрушения. В этих местах действующие напряжения значительно выше, чем среднее  $\sigma$  [6, 8, 16, 21, 26, 38, 44, 50, 69, 90].

## **2.2. Программа экспериментальных исследований**

Для подтверждения теоретических предпосылок и экспериментальной проверки эффективности принятых полимерных и комплексных добавок на усталостную долговечность модифицированных асфальтобетонов принята следующая программа исследований.

- 2.2.1. Обосновать материалы и методы исследований.
- 2.2.2. Изучить процессы структурообразования в системах «нефтяной дорожный битум, модифицированный бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 в комбинации с технической серой – механоактивированные СКМС-30 минеральный порошок» и «нефтяной дорожный битум, модифицированный этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК – поверхностьюактивированные этиленглицидилакрилатом минеральные материалы (щебень, песок, минеральный порошок)».
- 2.2.3. Выполнить исследования усталостной долговечности при кратковременном циклическом и статическом нагружениях асфальтобетонов типов «А» и «Б» для поверхностных слоев дорожного покрытия и установить оптимальное содержание органического вяжущего.
- 2.2.4. Изучить усталостную долговечность модифицированных асфальтобетонов в условиях различных температур и при воздействии различных агрессивных сред.
- 2.2.5. Разработать рекомендации по производству и применению модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности.
- 2.2.6. Рассчитать экономическую эффективность от внедрения принятых асфальтополимербетонных смесей.

### **Выводы по разделу 2:**

Теоретические предпосылки, положенные в основу данной работы заключаются в следующем:

1. На основе рассмотренного механизма усталостного разрушения асфальтобетона, который может носить когезионный, адгезионный и смешанный характер, сформулирована научная гипотеза исследования, которая состоит в том, что получение асфальтобетона для верхних слоев дорожного покрытия, обладающего повышенной усталостной долговечностью, возможно при создании такой структуры асфальтобетона, которая рационально сочетает наиболее плотную упаковку полидисперсных частиц минерального остова (микроструктура плавно переходит в мезоструктуру, а затем в макроструктуру) и непрерывную пространственную сетку эластичного органического вяжущего с высокими значениями адгезии и когезии при минимально возможной толщине асфальтовяжущего вещества.

2. Активация поверхности минерального порошка и минеральных заполнителей и наполнителей полимерными добавками на основе СКМС-30 и Elvaloy-AM должна привести к формированию на поверхности структурно-упрочненного слоя полимера, который повысит адгезию битумополимерного вяжущего к поверхности минерального порошка вследствие увеличения количества контактов сегментов надмолекулярных образований данных полимерных добавок с активными центрами олеофильной поверхности. Это создаст прочную и эластичную пространственную матрицу асфальтополимербетона с высокой адгезией и когезией, что и будет определять повышенную усталостную долговечность асфальтобетонов с комплексно-модифицированной микроструктурой.

3. Для подтверждения сформулированных теоретических предпосылок и выполнения экспериментальных исследований, изучения явлений и процессов, происходящих при формировании структуры битумополимерного вяжущего и микроструктуры и их влияния на усталостную долговечность асфальтополимербетонов, разработана программа экспериментальных исследований.

## РАЗДЕЛ 3

### ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### **3.1 Характеристика материалов, принятых для исследования**

##### **3.1.1 Органические вяжущие**

В качестве базового битума для приготовления дорожных асфальтобетонов типов «А», «Б», литого и щебеноочно-мастичного асфальтобетонов выбран БНД 60/90 Павлодарского НПЗ, дата изготовления – март 2012 г. (паспорт качества № 6 от 29.03.2012 г.). Для сравнительных исследований выбраны битумы марок БНД 40/60 (Кременчугского НПЗ, год изготовления – 2011 г.) и БНД 90/130, полученный путем совмещения битума БНД 60/90 и гудрона. Основные показатели качества принятых дорожных битумов приведены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Показатели качества нефтяных дорожных битумов

Наименование показателя	Ед. измерения	БНД 40/60	БНД 60/90	БНД 90/130	Метод контроля
Пенетрация при температуре 25 °C	0,1 мм	58	67	112	ГОСТ 11501-78
Температура размягчения по «КиШ»	°C	53	50	45	ГОСТ 11506-73
Дуктильность при температуре 0 °C, не меньше 25 °C, не меньше	см	2,5 50,0	3,5 >100	5 92	ГОСТ 11505-75
Температура хрупкости, не более	°C	-13	-15	-18	ГОСТ 11507-78
Коэффициент сцепления со стеклом	%	30	39	40	ГОСТ 11508-74
Интервал пластичности (ИП)	-	66	65	64	ДСТУ 4044-2001
Структурно-реологический тип	-	III (золь-гель)	III (золь-гель)	III (золь-гель)	-

### **3.1.2. Модификаторы микроструктуры асфальтобетона**

3.1.2.1 Каучук синтетический бутадиенметилстирольный СКМС-30 АРКМ-15 ГОСТ 11138-78: жесткость – 7,2 Н; эластическое восстановление – 3,0; вязкость по Муни МБ1 + 4 (100 °C) – 48; условная прочность при растяжении – 25 МПа; относительное удлинение при разрыве – 600 %; эластичность по отскоку – 28 %; массовая доля золы – 0,2 %; массовая доля связанного альфаметилстирола – 24 %.

3.1.2.2. Техническая сера, соответствующая требованиям ГОСТ 127-76.

3.1.2.3. Этиленглицидилакрилат (торговая марка Элвалой АМ концерна «Dupon») использовался гранулированным, диаметр гранул  $(1 - 3) \cdot 10^{-3}$  м; получен в фирме «Лакет», и полностью отвечает требованиям сертификата качества со спецификациями фирмы-производителя.

Фирмой «Dupon» был предложен процесс модификации битума этиленглицидилакрилата в присутствии полифосфорной кислоты в качестве катализатора [105], в частности, ПФК-105.

3.1.2.4. Полифосфорная кислота ПФК-105 общего состава  $H_{n+2}+P_nO_{3n+1}$  использована в качестве катализатора процессов формирования сетчатой структуры в битумополимерном вяжущем из макромолекул и надмолекулярных образований этиленглицидилакрилата.

Состав ПФК (%):  $H_3PO_4$  – 51,  $H_4P_2O_7$  – 42,  $H_5P_3O_{10}$  – 6,  $H_6P_4O_{13}$  – 1; температура плавления –  $T_{пл} = 16 - 30$  °C; температура кипения  $T_{кип} = 310$  °C; эффективная вязкость при 25 °C  $\eta = 840$  сПз, при 105 °C  $\eta = 35$  сПз; плотность при 25 °C  $\rho = 1920$  кг/м<sup>3</sup>.

Полифосфорную кислоту ПФК-105 получали растворением расчетного количества фосфорного ангидрида ( $P_2O_5$ ) в 85 % ортофосфорной кислоте. Концентрацию кислоты проверяли титрованием щелочью [105].

3.1.2.5. Блок-сополимер на основе стирола и бутадиена марки Кратон Д 1101. гранулированный, диаметр гранул  $(0,1 - 1) \cdot 10^{-3}$  м.; содержание стирола – 31 % масс.; удельная плотность – 0,94 г/см<sup>3</sup>; модуль упругости – 2,9 МПа; удлинение на разрыв – 880 %.

3.1.2.6. Растворитель бутадиенметилстирольного каучука и этиленглицидилакрилата для поверхностной активации из раствора минерального порошка – бензин неэтилированный марки Б-70 «Калоша» соответствовал ГОСТ 2084 «Бензины автомобильные».

### **3.1.3. Минеральные компоненты асфальтобетона**

Для исследования влияния комплексно модифицированной микроструктуры асфальтобетона на его физико-механические свойства и усталостную долговечность при воздействии статических и динамических нагрузок были приняты асфальтобетоны мелкозернистые типов «А» и «Б» (составы проф. В. А. Золотарева) с различным процентным содержанием битума, литой асфальтобетон (состав проф. В. И. Братчуна [137]), щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА-10) с добавлением гранулированной стабилизирующей целлюлозной добавки на основе битума Antrocet-G. Гранулометрические составы используемых асфальтобетонов приведены в табл. 3.2.

Для приготовления щебня и искусственного песка использован гранит Карабинского месторождения со следующими свойствами: дробимость в водонасыщенном состоянии – 6,2 %; марка гранита – 1200; износ в полочном барабане – 2,3 %; насыпная плотность – 1410 кг/м<sup>3</sup>; истинная плотность – 2670 кг/м<sup>3</sup>; морозостойкость более 200 циклов; содержание зерен лещадной и игловатой формы – 6 %.

Минеральный порошок использовался известняковый. Содержание CaCO<sub>3</sub> – 99 %; удельная поверхность  $S_{1,2} = 400 \text{ м}^2/\text{кг}$ ; средняя плотность – 2715 кг/м<sup>3</sup>; средняя плотность под нагрузкой 40 МПа – 1880 кг/м<sup>3</sup>; пустотность – 31,8 %; битумоемкость – 60,5 %. Минеральный порошок поверхностно активировался полимерными добавками (бутадиенметилстирольным каучуком, этиленглицидилакрилатом) из раствора в бензине.

Таблица 3.2

## Гранулометрические составы асфальтобетонов

Тип асфальтобетона	Полные остатки на ситах, %									Ориентировочное содержание орг. вяжущего	Добавки в мин. часть
	15 – 10	10 – 5	5 – 2,5	2,5 – 1,25	1,25 – 0,63	0,63 – 0,315	0,315 – 0,14	0,14 – 0,071	<0,071		
Асфальтобетон плотный горячий тип «А» (состав В. А. Золотарева)	29	21	15	1	8	11	5	3	7	5 %	-
Асфальтобетон плотный горячий тип «Б» (состав В. А. Золотарева)	22,8	17,2	17,2	12,8	8,3	6,5	4,8	3,2	7,2	5 %	-
Щебеночно-мастичный асфальтобетон ЩМА-10	50	25	5	2	2	2	2	2	10	6 %	Antrocel-G, 0,45 %
Литой модифицированный асфальтобетон (состав В. И. Братчуна)	22,8	17,2	12,8	12,8	7,3	6,5	3,1	0	17,5	9,5 %, БНД 60/90 + 0,5 % СКМС-30 + 30 % тех. серы.	Активатор МП – СКМС-30

### 3.2. Методы экспериментальных исследований

В диссертационной работе показатели качества битумополимерного вяжущего, нефтяных дорожных битумов, щебня, песка, минерального порошка, асфальтополимербетона определяли с использованием стандартных методов: ГОСТ 11501, ГОСТ 11506, ГОСТ 11505, ГОСТ 11507, ДСТУ Б В.7-81, ТУ УВ.2.7-24-034778-198-2002, ДСТУ Б В.7-119 и специальными методами.

#### 3.2.1. Методика приготовления битумополимерных вяжущих

Совмещение нефтяных дорожных битумов с принятыми полимерными модификаторами выполнено в лабораторной мешалке с 1100 об/мин (рис. 3.1).

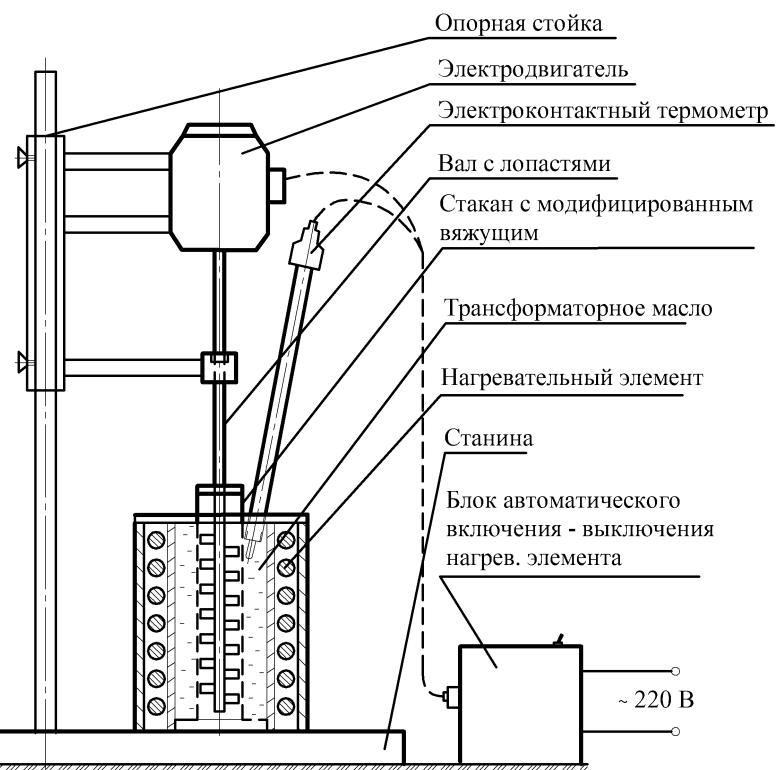


Рис. 3.1. Лабораторная мешалка для приготовления битумополимерных вяжущих.

Модификацию нефтяных дорожных битумов этиленглицидилакрилатом проводили в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [105, 130, 136] перемешиванием битума с 2 % терполимера в течение 60 мин при 165 °C, а затем в двухпроцентный раствор этиленглицидилакрилата в битуме добавляли 0,2 % ПФК-105 и при температуре 165°C продолжали перемешивание модифицированного органического вяжущего 30 минут.

Модификацию нефтяных дорожных битумов комплексной добавкой на основе бутадиенметилстирольного каучука и технической серы проводили в соответствии с рекомендациями, приведенными в работах [131, 137]. Бутадиенметилстирольный каучук растворяли в очищенном бензине «Калоша» и вводили в битум. При температуре 180 – 185 °C в течение одного часа проводилось перемешивание в лабораторной мешалке. Затем вводили 30 % порошкообразной технической серы и продолжали перемешивать в течение 30 минут при температуре 180 – 185 °C.

Модификация битума порошкообразным блок-сополимером типа СБС марки Kraton D 1101 производилась перемешиванием битума с 3 % полимерной добавки в течение 60 мин при 170 °C согласно исследованиям [10, 114].

### **3.2.2. Методика исследований температуры хрупкости битумополимерных вяжущих и комплексно-модифицированных асфальтовяжущих**

Для определения температуры хрупкости модифицированных органических вяжущих и асфальтовяжущих использовался автоматический прибор АТХ-20, который позволяет определить температуру хрупкости в соответствии с ГОСТ 11507-65 (рис. 3.2). Контроль за появлением трещины осуществлялся пьезометрическим датчиком прибора.

### **3.2.3. Методика исследований физико-механических и деформационно-прочностных свойств комплексно-модифицированных асфальтовяжущих**

Физико-механические и деформационно-прочностные свойства асфальтовяжущих (плотность, водонасыщение, предел прочности при сжатии) определя-

лись на образцах-цилиндрах, изготовленных по методике ГОСТ 12784-78. Температура приготовления асфальтовяжущих составляла 150 °С (температура нагрева неактивированных МП – 150–160 °С и активированных – 140 °С, температура нагрева битума – 140–150 °С).



Рис. 3.2. Общий вид прибора АТХ-20.

Цилиндрические образцы асфальтовяжущего изготавливались в форме диаметром 25 мм под давлением 10 МПа. Количество смеси асфальтовяжущего для приготовления одного образца составляло 27 – 28 г. Были приготовлены системы при различном содержании вяжущего: 10 %, 12 %, 14 %, 16 %, 18 %.

### **3.2.4. Методика исследования сдвигостойчивости асфальтобетонов**

Сдвигостойчивость (устойчивость), условную пластичность и условную жесткость асфальтополимербетонов определяли на приборе Маршалла (рис. 3.3).

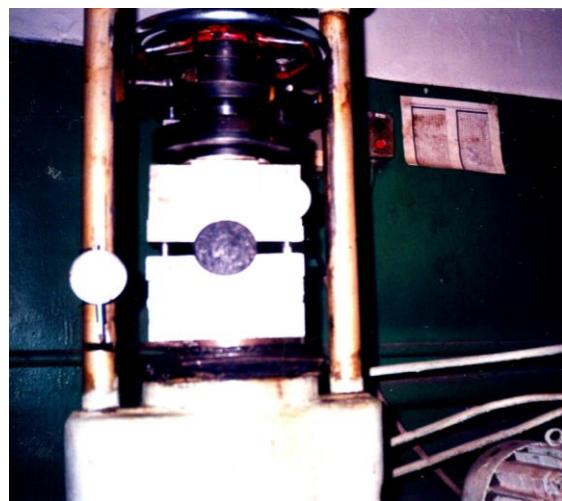


Рис. 3.3. Общий вид прибора Маршалла.

Перед испытанием образцы асфальтополимербетона термостатировали в водяной бане при температуре  $60 \pm 2^{\circ}\text{C}$  в течение 1 часа. Образец нагружали в приборе Маршалла при скорости движения нижней плиты  $50 \pm 1 \text{ мм/мин}$ . Время от момента извлечения образца из водяной бани до момента нагружения не превышало 60 с. Величину устойчивости ( $P$ , Н) определяли как усилие в момент разрушения образца. За показатель условной пластичности ( $l$ ,  $1/10 \text{ мм}$ ) принимали величину критической деформации, фиксируемой по индикатору в момент разрушения образца. Показатель условной жесткости ( $A$ , Н/мм) вычисляли по формуле (3.1).

$$A = \frac{10 \cdot P}{l}. \quad (3.1)$$

### **3.2.5. Методика исследования усталостной долговечности асфальтобетонов**

Наиболее простой, и в тоже время наиболее полно отвечающий реальным условиям работы способом испытания асфальтобетона на усталостную долговечность является циклический изгиб асфальтобетонных образцов-балочек нагрузками меньше разрушающих. Большое количество как отечественных, так и зарубежных исследований [4, 6, 20, 22, 30 – 32, 37, 42, 49, 52] устанавливают возникновение на покрытии при проезде транспортных средств растягивающих и сжимающих напряжений, при этом в основании слоя покрытия напряжения носят в основном

только растягивающий характер. Поэтому наиболее точными формами приложения нагрузок при испытании асфальтобетона в лабораторных условиях являются: синусоидальная форма, позволяющая прикладывать к образцу нагрузку различных знаков, имитируя тем самым появление растягивающих и сжимающих напряжений в покрытии, а также циклическая полусинусоидальная, характеризующаяся испытание балочки на односторонний изгиб с учетом разгрузки (временем «отдыха») (рис. 3.4).

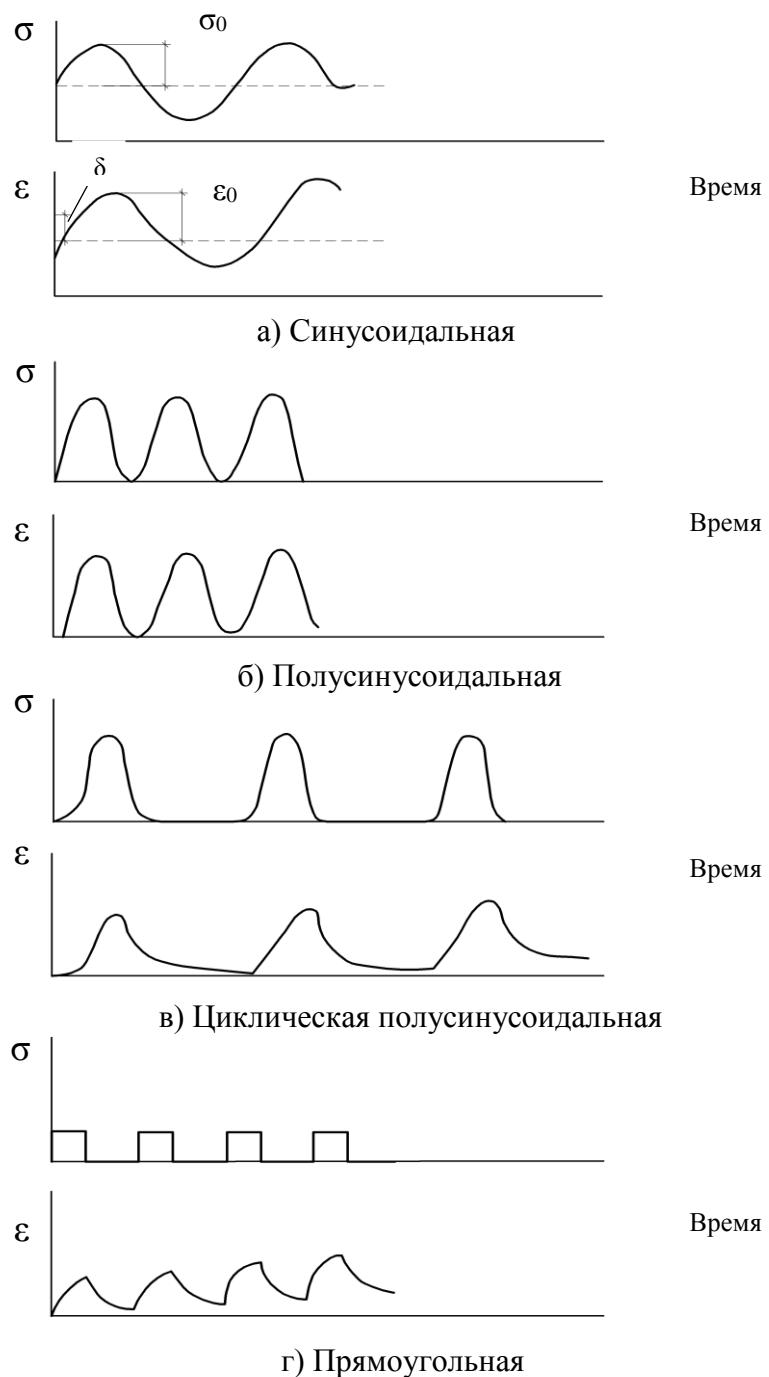


Рис. 3.4. Основные типы нагрузений при постоянной амплитуде напряжений ( $\sigma$ ) и примерный характер роста деформации ( $\epsilon$ )

В табл. 3.3 приведены режимы испытаний асфальтобетонных образцов на усталостную долговечность, выполненных разными исследователями.

Таблица 3.3

## Режимы и параметры нагружения асфальтобетонных образцов

Наименование устройства (исследователь)	Исследование	Описание испытаний		
		Закрепление образца и его размеры (мм)	Параметры нагружения: частота ( $f$ ), Гц; амплитуда нагрузки ( $F$ ), Н	Тип нагружения
Маятниковый прибор ГосдорНИИ (А.О.Салль)	[19, 40]	двуточечное, 160×40×40	время нагружения – 0,1 с; интервал – 1 с; напряжение – 2 – 4 МПа	циклическая полусинусоида
Электромагнитный пульсатор СоюздорНИИ	[40]	двуточечное, 160×40×40	время нагружения – 0,1 с; интервал – до 1 с; напряжение – 2 – 4 МПа	прямоугольная
Пульсатор Б.С.Радовского	[50]	двуточечное, 160×40×40	время нагружения – 0,1 с; интервал – до 0,4 – 0,9 с; $F = 150 – 900$ Н	циклическая полусинусоида
Установка ГП «РосдорНИИ» (А.В.Руденский)	[20]	двуточечное, 160×40×40	$f = 14,5$ Гц, амплитуда прогибов: 0,37, 0,30, 0,22, 0,16 мм	синусоидальная
Вибростенд ХНАДУ (В.А.Золотарев)	[4]	консольное, 250×40×40	$f = 0,01-10$ Гц, $F$ до 100 Н	синусоидальная
Рычажный пресс (Т.Н.Калашникова)	[55]	двуточечное, 160×40×40	$f = 0,8-1,25$ Гц, $F = 20 – 50\%$ от разрушающей	циклическая полусинусоида
Прибор ДНТЦ «Дор'якість» 0901-ДЯ (НТУ)	[11]	двуточечное, 160×40×40	время нагружения – 0,1 с; $f \sim 1,2$ Гц, $F = 150 – 900$ Н	циклическая, прямоугольная
Прибор UTM 021 (Ю.М.Сибирякова, МАДИ),	[42]	двуточечное, 400×60×50	$f = 0,5 – 60$ Гц, $F$ до 4,5 кН	синусоидальная
Прибор В049-30 (стандарт SHRP M009)	[42]	двуточечное, 350×50×50	$f$ до 10 Гц, $F$ до 4,5 кН	синусоидальная
Установка ИУ-01 (РГСУ)	[26, 52]	двуточечное, 160×40×40, 200×50×50	$f = 0,01 – 50$ Гц	синусоидальная
Прибор «ноттингемского» типа	[111, 112]	цилиндрический образец $\varnothing 100 – 150$ мм, высотой 200 мм	время нагружения – 0,1 с; интервал – 0,4 с	циклическая полусинусоида

Таким образом, наиболее целесообразно проводить исследования усталостной долговечности асфальтобетона на образцах-балочках, подвергая их растяжению при изгибе от воздействия циклических нагрузок одинаковой величины, обеспечивая тем самым постоянство напряженного состояния с регистрацией главного критерия оценки усталостной долговечности асфальтобетона – количества циклов до разрушения. В связи с этим, исследования проводились на специально разработанной установке, которая позволяет плавно нагружать образец циклической нагрузкой в форме полусинусоиды различной длительности с разными периодами отдыха, а также позволяет испытывать образцы статическими нагрузками (рис. 3.5).

Установка позволяет проводить исследования стандартных асфальтобетонных образцов-балочек ( $16 \times 4 \times 4$  см) в режиме постоянных циклических напряжений с подсчетом количества циклов до разрушения и замером величин прогиба образца со следующими режимами испытаний:

- режимы циклического нагружения: нагрузка – от 0,1 до 0,5 с, отдых – от 0,2 до 0,9 с (благодаря использованию в качестве тягового элемента электромагнита стало возможным устанавливать различное время действия нагрузки и отдыха независимо друг от друга);

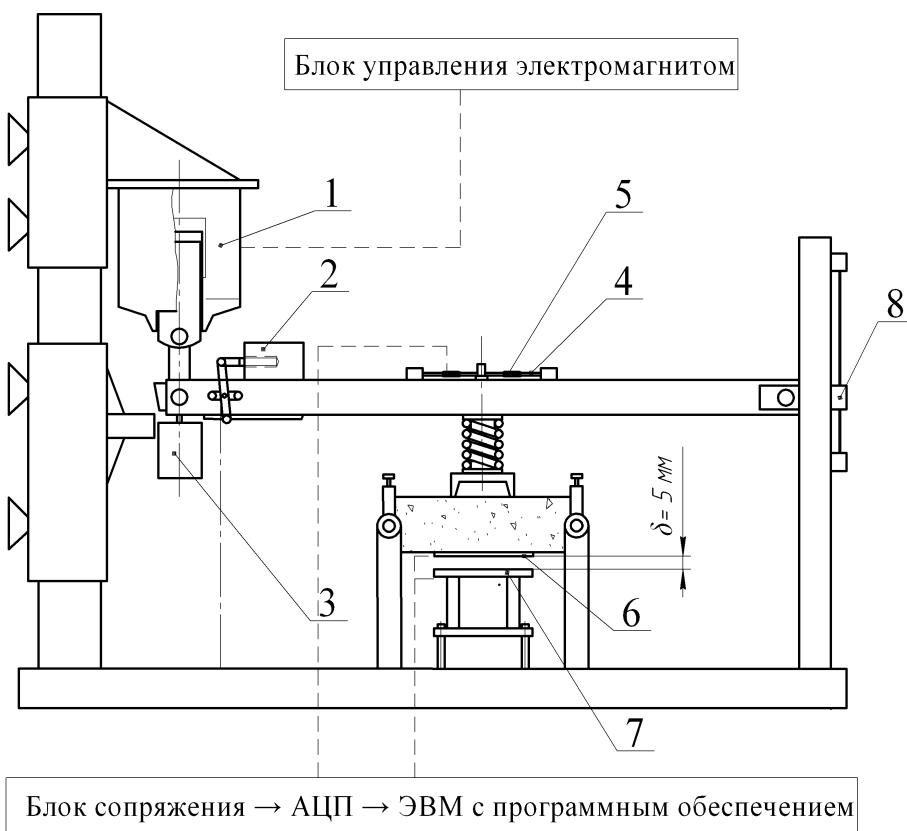
- величина циклической нагрузки – 10 – 50 % от разрушающей.

- температурные режимы испытания:  $-20^{\circ}\text{C}$ ,  $-10^{\circ}\text{C}$ ,  $0^{\circ}\text{C}$ ,  $10^{\circ}\text{C}$ ,  $20^{\circ}\text{C}$ ;

- схема приложения нагрузки (2-хточечная) (рис. 3.6) с целью создания зоны постоянного изгибающего момента в балочке, для обеспечения чистого изгиба образца, т.е. прогиба по линии окружности [4, 10].

Образцы-балочки асфальтобетона изготавливались по стандартной методике согласно ГОСТ 12801-84 «Смеси асфальтобетонные дорожные и аэродромные, дегтебетонные дорожные, асфальтобетон и дегтебетон. Методы испытаний». Асфальтобетонная смесь типов «А» и «Б» уплотнялась под давлением 40 МПа в специальной форме на пятидесятитонном прессе.

Испытание асфальтобетонных балочек на растяжение при изгибе производилось на пятитонном прессе на специальной подставке с двумя опорами (рис. 3.7). Расстояние между опорами 14 см.



- 1 - нагружающий электромагнит;
- 2 - электромагнит-зашелка;
- 3 - сменный груз;
- 4 - датчик измерения усилий;
- 5 - тензометрические датчики;
- 6 - токопроводящая пленка;
- 7 - датчик измерения прогибов;
- 8 - регулировочное устройство.

Рис. 3.5. Общий вид и схема установки, для испытания асфальтобетона на усталостную долговечность.

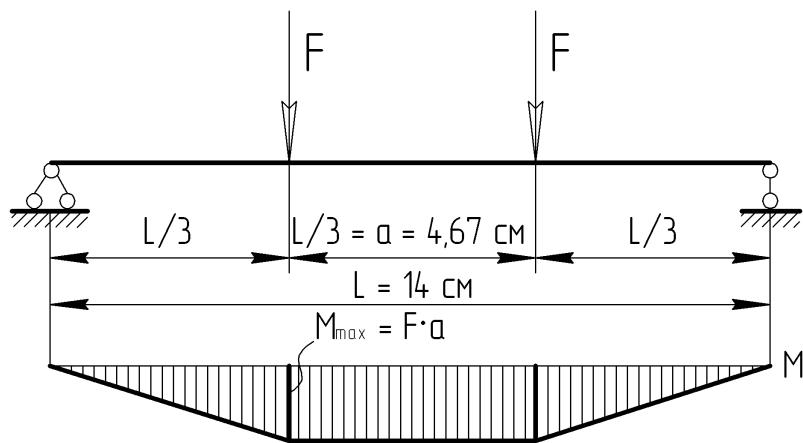


Рис. 3.6. Схема приложения нагрузки и эпюра изгибающих моментов.



Рис. 3.7. Устройство для испытания асфальтобетонных балок на растяжение при изгибе.

### 3.2.6. Обработка результатов исследований по усталостной долговечности

Изгибающие напряжения, возникающие под действием кратковременной нагрузки, рассчитывались методом допускаемых напряжений по формуле:

$$\sigma_{uzg} = \frac{M_{\max} \cdot y_{\max}}{I}; \quad (3.2)$$

где  $M_{\max}$  – максимальный изгибающий момент, Н·см;

$y_{\max}$  – расстояние от нейтральной оси до рассматриваемой точки поперечного сечения балки. Так как рассматриваемая точка находится в растянутой зоне балки, а нейтральная ось проходит через середину высоты балки, то  $y_{\max} = 0,5h$ , ( $h$  – высота балки, см);

$I$  – момент инерции балки,  $I = \frac{b \cdot h^3}{12}$ , см<sup>4</sup>,  $b$  – ширина балки;

$$\frac{I}{y_{\max}} = W \text{ – момент сопротивления изгибу.}$$

Таким образом, максимальное напряжение растяжения балочки при изгибе при кратковременном циклическом нагружении рассчитывалось по формуле:

$$\sigma_{uzg} = \frac{6 \cdot F \cdot a}{b \cdot h^2} \cdot 10^{-2}, \text{ МПа}; \quad (3.3)$$

где  $F$  – значение силы, Н;

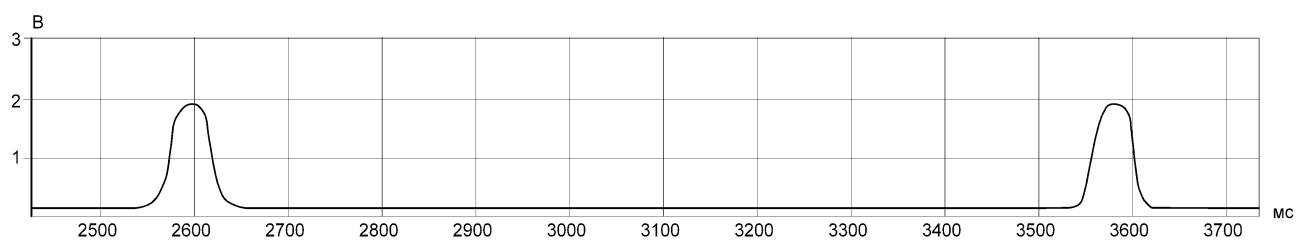
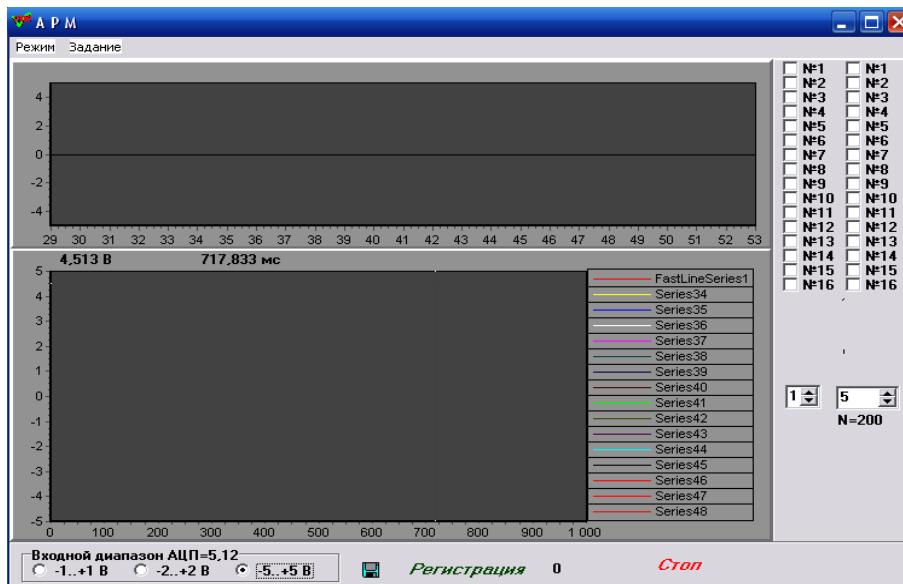
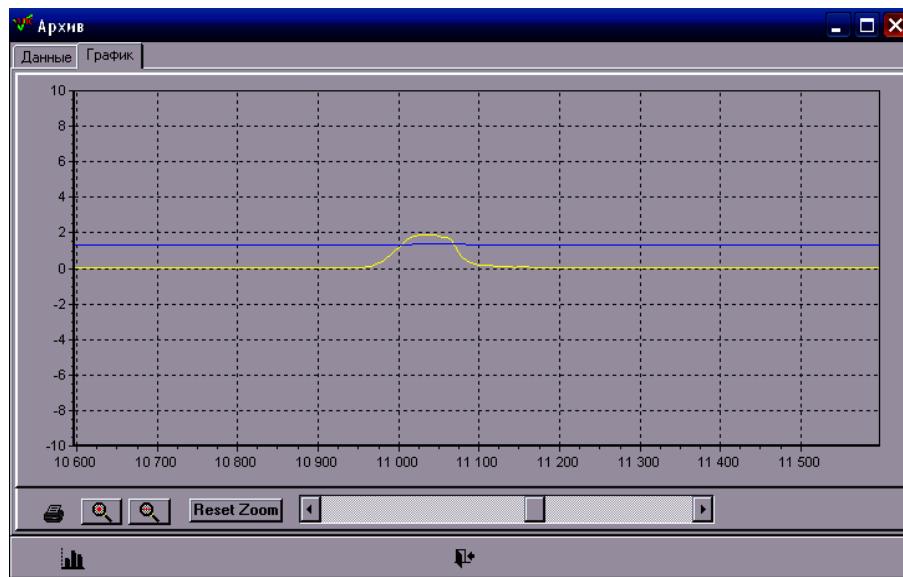
$a$  – расстояние между нагружающими силами,  $a = 4,67$  см;

$b$  – ширина образца-балочки,  $b = 4$  см;

$h$  – высота образца-балочки,  $h = 4$  см.

$10^{-2}$  – переводной коэффициент в МПа.

С помощью аналогово-цифрового преобразователя (АЦП) и специальной программы на персональном компьютере с тензометрического датчика проводилась регистрация величины и формы циклической нагрузки, а благодаря безинерционному датчику, основанному на принципе действия плоского конденсатора (т.е. измерения емкости между двумя обкладками: токопроводящей пленкой под образцом и основанием датчика) производилась регистрация величины изгиба в реальном времени с точностью до 0,01 мм. На рис. 3.8 показан интерфейс программного обеспечения и графическое отображение циклической нагрузки.



$$1 \text{ В} = 100 \text{ Н.}$$

Рис. 3.8. Программный интерфейс и графическое отображение циклической нагрузки.

Количество циклов до разрушения фиксируется стрелочным счетчиком. Прибор производит автоматическое выключение при достижении максимального прогиба образца замыканием контактов (обкладок) датчика измерения прогиба. При этом величина допустимого прогиба, при котором производится отключение

прибора может регулироваться (при отрицательных температурах разрушение образца происходит при прогибе до 1 мм, при положительных при прогибе до 4 мм).

Коэффициент усталости  $m$  рассчитывался по формуле, предложенной Б. С. Радовским и А. В. Руденским как тангенс угла наклона усталостной долговечности к оси ординат (формула 1.13).

### 3.2.7. Статистическая обработка результатов

При незначительном количестве измерений ( $n < 30$ ) (как это часто бывает в дорожном строительстве) рекомендуют использовать для определения грубых ошибок методику, изложенную в СТ СЭВ 545-77, в основу которой положены разработки академика Н. В. Смирнова [137]. В соответствии с этим методом определяют значения критериев  $\beta_1$  и  $\beta_2$ , по которым устанавливают наличие грубых ошибок

$$\beta_1 = \frac{X_{\max} - \bar{X}}{S}, \quad (3.4)$$

$$\beta_2 = \frac{\bar{X} - X_{\min}}{S}, \quad (3.5)$$

где  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  – наибольшее и наименьшее значение результатов измерений, если они значительно отличаются от других результатов;

$\bar{X}$  – среднеарифметическое значение результатов всех измерений;

$S$  – среднеквадратичное отклонение измеряемой величины от среднеарифметического значения

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}}, \quad (3.6)$$

где  $X_i$  – значение каждого отдельного измерения;

$n$  – количество всех измерений.

Для дальнейшего анализа задаются необходимой доверительной вероятностью результатов измерений (надежность результатов). Для этого

задаются значением  $\beta_{\max}$ . Если  $\beta_1$  или  $\beta_2 > \beta_{\max}$ , то значения  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  относятся к грубым ошибкам и исключают из статистического ряда полученных экспериментальных данных. Если же  $\beta_1$  или  $\beta_2 > \beta_{\max}$ , то значения  $X_{\max}$  и  $X_{\min}$  не относятся к грубым ошибкам и их учитывают при дальнейшей обработке измерений [137].

В каждой серии при исследовании усталостной долговечности образцов асфальтобетона одной системы испытанию подвергали в среднем 4 – 6 образцов.

Для примера определения грубых ошибок по данной методике при определении циклов до разрушения возьмем результаты исследований усталостной долговечности асфальтобетона типа «А», полученных при температуре + 20 °C и циклах нагружения 0,1 с – нагрузка, 0,9 с – отдых, количество измерений  $n = 6$ : 19560; 17200; 22100; 19010; 18256; 20540.

1. Рассчитываем среднеарифметическое значение результатов измерений  $\bar{X}$  и среднеквадратичное отклонение  $S$ :

$$\bar{X} = \frac{19560 + 17200 + 22100 + 19010 + 18256 + 20540}{6} = 19444.$$

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} = \sqrt{\frac{(19560 - 19444)^2 + \dots + (20540 - 19444)^2}{6-1}} = 2963.$$

2. Находим значения критерия  $\beta_{\max}$  для 6 измерений и принятой надежности результатов  $P = 0,9$  по табл. 1.1. [137] –  $\beta_{\max} = 1,73$ .

3. Определяем значение критериев  $\beta_1$  и  $\beta_2$ :

$$\beta_1 = \frac{22100 - 19444}{2963} = 0,89 < 1,73;$$

$$\beta_2 = \frac{19444 - 17200}{2963} = 0,75 < 1,73.$$

Следовательно, данные результаты измерений не относятся к грубым и поэтому могут дальше учитываться в расчете среднеарифметического значения для данного исследования, что составляет 19444 циклов до разрушения.

### **Выводы по разделу 3:**

1. Для подтверждения теоретических предпосылок и выполнения намеченной программы экспериментальных исследований приняты объекты исследований, позволяющие осуществить комплексное модифицирование структуры дорожных асфальтобетонов и на этой основе повысить долговечность асфальтобетона при воздействии на него динамических и статических нагрузок. А использованные методы исследования позволяют не только решить эту задачу, но и разобраться в механизме усталостного разрушения существенно повысив эффективность исследования и уровень обобщения экспериментальных данных.

2. В качестве объектов исследований приняты: битумы нефтяные дорожные с пенетрацией  $P_{25} = 58, 67, 112$  град., отвечающие требованиям ДСТУ 4044-2001; каучук синтетический бутадиенметилстирольный СКМС-30 АРКМ-15, отвечающий требованиям ГОСТ 11138-78; техническая сера, соответствующая требованиям ГОСТ 127-76; этиленглицидилакрилат (Elvaloy-AM) гранулированный, отвечающий требованиям сертификата качества со спецификациями производителя «Dupon»; полифосфорная кислота (ПФК-105) следующего состава (%):  $H_3PO_4 - 51$ ;  $H_4P_2O_7 - 42$ ;  $H_5P_3O_{10} - 6$ ;  $H_6P_4O_{13} - 1$ ; блок-сополимер на основе стирола и бутадиена типа SBS марки Kraton D 1101, гранулированный; мелкозернистый асфальтобетон гранулометрии типов «А» и «Б», литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной структурой, щебеноочно-мастичный асфальтобетон (ЩМА-10) для исследования влияния качества модифицированных органических вяжущих и структуры бетонов на их усталостную долговечность.

3. В настоящей работе, кроме стандартных, использован ряд специальных методов исследований: исследование усталостной долговечности асфальтобетонов при действии статических, динамических нагрузок и различных температур проводилось на специально разработанной установке; исследование когезии модифицированных органических вяжущих и предела прочности на изгиб при растяжении асфальтобетонов выполняли на установках, разработанных в ХНАДУ (г. Харьков) и АДИ ГВУЗ «ДонНТУ» в г. Горловка.

## РАЗДЕЛ 4

# **ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ И ДЕФОРМАЦИОННО-ПРОЧНОСТНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ АСФАЛЬТОВЯЖУЩИХ И АСФАЛЬТОБЕТОНОВ С КОМПЛЕКСНО-МОДИФИЦИРОВАННОЙ СТРУКТУРОЙ**

### **4.1. Влияние принятых полимерных добавок на физико-механические свойства модифицированных дорожных битумов**

Наибольший вклад в структурно-механические свойства бетонов на органических вяжущих вносит асфальто- или дегтевяжущее вещество. Известно, что важнейшей составляющей структуры асфальтобетона является контактная зона, зона взаимодействия органического вяжущего с поверхностью минеральных материалов. Это обусловлено тем, что в процессе приготовления асфальтобетонных смесей на поверхности минеральных зерен формируются структурированные адсорбционно-сольватные слои органического вяжущего, свойства которых, такие как: адгезия, когезия, вязкость, пластичность, изменяются по мере удаления от поверхности минеральных частиц и зависят от химико-минералогического состава поверхностных слоев минеральных частиц, текстуры и структуры, удельной поверхности минеральных компонентов, вязкости и состава органических вяжущих [4, 7, 12]. Когезия определяет прочность органического вяжущего и асфальтобетона в целом и обязательно должна обеспечивать необходимое сопротивление напряжениям, возникающим в материале при действии изгибающей нагрузки от автотранспортных средств. Адгезия определяет прочность сцепления вяжущего с минеральными материалами и при воздействии кратковременных циклических нагрузок должна обеспечивать сопротивление напряжениям, возникающим в структурированном слое битума и стремящимся вызвать деформацию отрыва вяжущего вещества от поверхности минеральной частицы [12, 26, 52].

Для улучшения свойств асфальтовяжущего вещества были выбраны полимерные модификаторы, которые позволяют при направленном воздействии на структуру нефтяных дорожных битумов, получить качественно новое вяжущее.

Модификация битумов терполимерами (этиленглицидилакрилат марки Elvaloy-AM), термоэластопластами (в нашем случае блок-сополимер типа СБС марки Kraton D 1101), каучуками (СКМС-30) позволяет получить новое, не присущее обычным вяжущим, свойство эластичности. Это свойство позволяет пленкам органического вяжущего, благодаря пространственной сетке из надмолекулярных образований, снижать концентрацию напряжений из высокомолекулярных соединений, что должно положительно отразиться на прочностных показателях асфальтобетона.

В данной работе исследование физико-механических свойств битума с принятыми модифицирующими добавками оценивалось при помощи следующих основных показателей: пенетрации, растяжимости, температуры размягчения и хрупкости, показателю эластичности. В качестве основного исследуемого битума был принят БНД 60/90.

Введение в битум принятых полимерных модификаторов снижает глубину проникания иглы при 25 °C на 10 – 20 %. При 0 °C пенетрация остается примерно одинаковой (табл. 4.1).

Таблица 4.1

## Пенетрация модифицированных битумов

Температура испытаний, °C	Нормы согласно ДСТУ	Глубина проникания иглы, × 0,1, см			
		БНД 60/90	БНД 60/90 + 2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105	БНД 60/90 + 2 % СКМС-30 + 30 % тех. серы	БНД 60/90 + 3 % Kraton D 1101
25	60 – 90	67	50	60	55
0	Не менее 20	24	18	22	24

Значения температур размягчения и хрупкости позволяют наиболее полно раскрыть степень влияния полимерных модификаторов на свойства битума. Эти показатели позволяют косвенно предполагать, что чем выше температура размягчения вяжущего, тем более оно устойчиво к возникновению пластических дефор-

маций при положительных температурах. Чем ниже температура хрупкости вяжущего, тем более устойчив асфальтобетон на его основе к образованию низкотемпературных трещин и разрывов [52, 59].

Данные о температурах размягчения и хрупкости модифицированных битумов приведены в табл. 4.2.

Таблица 4.2

## Температура размягчения и хрупкости модифицированных битумов

Вид испытания	Нормы согласно ДСТУ	Битумы, модифицированные полимерными добавками			
		БНД 60/90	БНД 60/90 + 2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105	БНД 60/90 + СКМС-30 + 30 % тех. серы	БНД 60/90 + 3 % Kraton D 1101
Температура размягчения, °C	Не ниже 47 °C	49	56	52	54
Температура хрупкости, °C	Не выше -15 °C	-15	-15	-19	-16

Введение принятых полимерных модификаторов в нефтяной дорожный битум повышает температуру размягчения нефтяного битума в среднем на 5 – 7 °C.

Введение комплексной добавки нефтяной дорожный битум на основе бутадиенметилстирольного каучука и технической серы позволило снизить температуру хрупкости на 4 °C. Остальные полимерные модификаторы при данной концентрации не оказали на температуру хрупкости вяжущего значительного влияния.

Применение полимерных добавок вызывает некоторое снижение растяжимости битума при 25 °C. Введение 2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105 снизило растяжимость на 30 %; введение комплексной добавки 2 % СКМС-30 + 30 % технической серы снизило растяжимость на 50 %; применение 3 % Kraton D 1101 – на 56 % (табл. 4.3).

Более объективная характеристика, определяющая упругие свойства битума, чем растяжимость, является эластичность. Высокие значения эластичности обуславливают способность пленки органического вяжущего при воздействии кратковременных циклических нагрузок сопротивляться знакопеременным напряжениям

и совершать упругие деформации растяжения – сжатия без образования микродефектов [52]. Введение принятых полимерных модификаторов позволило получить вяжущее с высокими эластическими свойствами (табл. 4.3), что согласуется с результатами ранее выполненных исследований [10, 12, 89, 103, 104].

Таблица 4.3

## Растяжимость и эластичность модифицированных битумов

Вид испытания	Нормы со-гласно ДСТУ	Битумы, модифицированные полимерными добавками		
		БНД 60/90	БНД 60/90 + 2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105	БНД 60/90 + 2 % СКМС-30 + 30 % тех. серы
Растяжимость при 25 °C, см	Не менее 55 см	90	63	45
Эластичность, при 25 °C, %	Не нормируется	-	75	52
				80

Наибольшей эластичностью (до 80 %) характеризуются битумы, модифицированные Elvaloy-AM, Kraton D 1101, несколько меньшую (52 %) – СКМС-30 совместно с технической серой.

Когезия вяжущих определялась методом профессора В. А. Золотарева (ХНАДУ), заключающимся в определении усилия, которое приводит к потере сплошности образца битума во время плоско-параллельного сдвига при температуре 25 °C [10, 13] (табл. 4.4).

Таблица 4.4

## Когезия модифицированных битумов

Температура испытания, °C	Когезия битумов, МПа			
	БНД 60/90	БНД 60/90 + 2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105	БНД 60/90 + 2 % СКМС-30 + 30 % тех. серы	БНД 60/90 + 3 % Kraton D 1101
25 °C, см	0,079	0,140		0,132

Таким образом, сравнительный анализ результатов испытаний модифицированных битумов показал, что принятые полимерные добавки позволяют расширить интервал пластиичности в среднем на 10 – 15 °С, модифицированный вяжущие обладают значительными эластическими свойствами (эластичность 70 – 80 %), когезия модифицированных битумов выше в 1,5 – 1,7 раз по сравнению с обычным. Это дает возможность предполагать, что данные полимерные модификаторы значительно улучшат деформационно-прочностные показатели асфальтобетонов, предназначенных для устройства верхних слоев дорожного покрытия нежесткого типа.

#### **4.2. Исследование температуры хрупкости комплексно-модифицированных асфальтовяжущих веществ**

Известно, что МП повышает вязкость битума и плотность асфальтобетона, но при определенном соотношении МП и битума может снизиться трещиностойкость асфальтобетона при отрицательных температурах, поэтому концентрацию МП в асфальтовяжущем необходимо назначать такой, чтобы в достаточной степени повысить когезию битума, следовательно и сдвигостойчивость асфальтобетона при высоких температурах, но вместе с тем не получить чрезмерно высокой вязкости и недостаточной деформативной способности асфальтобетона при отрицательных температурах [2, 138]. Исследование температуры хрупкости асфальтовяжущих веществ позволяет хоть и косвенно, но оценить влияние принятых модификаторов на прочность и деформативность пленки асфальтовяжущего при отрицательных температурах.

Значения температуры хрупкости асфальтовяжущих на разных битумополимерных вяжущих (использовался битум БНД 90/130) приведены на рис. 4.1.

Анализируя полученные результаты, можно отметить тенденцию к снижению температуры хрупкости асфальтовяжущих при определенном соотношении МП/Б. При малых концентрациях МП битум находится в объемном состоянии, поэтому на прочность асфальтовяжущего оказывают влияние только когезия вя-

жущего. По мере увеличения концентрации МП толщина пленки битума между минеральными зернами уменьшается и вяжущее, согласно И. В. Королеву, постепенно переходит в структурированное состояние [75]. Расстояние между отдельными частицами становится меньше, чем сумма толщин структурированных оболочек двух соседних частиц, и свойства системы определяются энергией взаимодействия адсорбционно-сольватных слоёв органического вяжущего на поверхности МП, о чём свидетельствует понижение температуры хрупкости [68, 75].

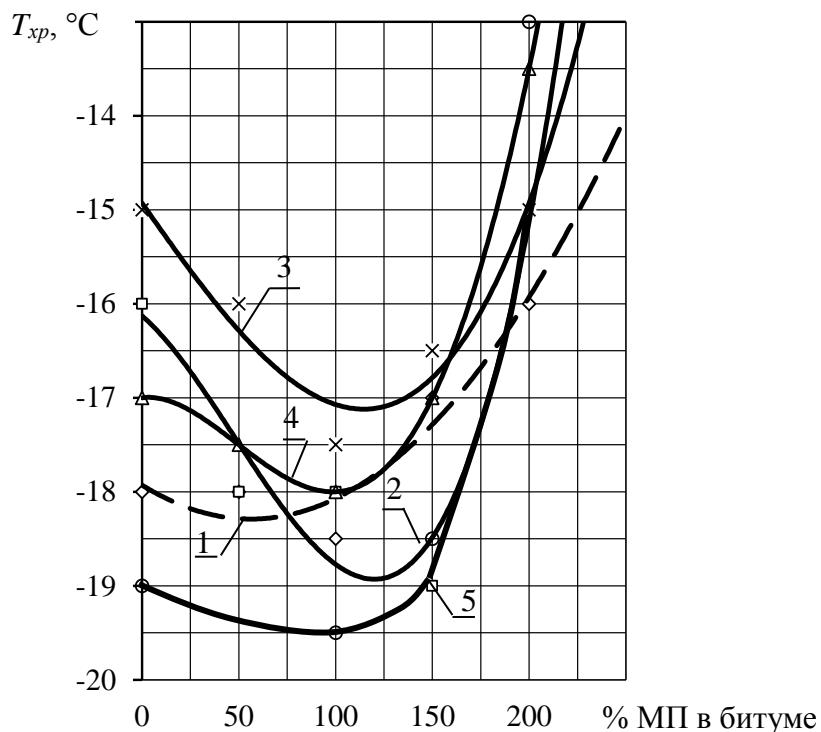


Рис. 4.1. Зависимость температуры хрупкости асфальтовяжущего от содержания МП в битуме: 1 – БНД 90/130; 2 – с 3 % Kraton D 1101; 3 – с 2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК; 4 – с 3 % ПЭВД; 5 – с 2% СКМС + 30 % тех. серы.

Понижению температуры хрупкости способствует и тот факт, что мраморный МП обладая высоким положительным потенциалом с большим количеством адсорбционных центров в виде катионов  $\text{Ca}^{+2}$ , способствует более интенсивному переводу битума в структурированное состояние с образованием хемоадсорбционных связей, которые позволяют прочно удерживать битумные пленки на по-

верхности, тем самым повышая прочность асфальтовяжущего [138].

Вероятно, понижение температуры стеклования нефтяного дорожного битума в асфальтовяжущем веществе обусловлено тем, что происходит блокирование поверхностью минерального порошка полярных групп органического вяжущего, которые определяют ассоциативную способность нефтяного битума при понижении температуры. В аналогичных олигомер-полимерных системах наиболее низкие значения стеклования температуры характерны для неполярных полимеров с гибкими макромолекулами, наиболее высокие значения – для полярных с жесткими макромолекулами. Как правило, введение наполнителя обычно приводит к повышению температуры стеклования ( $T_{cm}$ ), однако при невысоких концентрациях  $T_{cm}$  может снижаться [107].

Дальнейшее повышение содержания МП в битуме свыше 100 % для асфальтовяжущего на чистом битуме вызывает повышение температуры хрупкости. Увеличение концентрации МП приводит к уменьшению толщины пленки битума. Кроме того, большее содержание МП в системе «битум – МП» может вызвать появление воздушной фазы. В результате чего увеличивается пористость, появляются контакты по твердой поверхности, что резко снижает прочность [75]. Помимо этого, повышение температуры хрупкости в данном случае вызвано также повышением температуры стеклования системы «Б – МП». По данным [139] при содержании МП в битуме около 80 – 100 % наблюдается повышение температуры стеклования в 1,5 и более раз.

Температура хрупкости асфальтовяжущих на модифицированных битумах (кривые 2 – 5, рис. 4.1) уменьшается на 1–3 °С по сравнению с асфальтовяжущим на обычном битуме и приобретает наибольшие значения при количестве МП в битуме от 75 % до 100 %. Уменьшение температуры хрупкости в данном случае вызвано повышением эластичности модифицированных вяжущих, вследствие формирования локальных и объемных структур из надмолекулярных образований полимера.

Следует обратить внимание на довольно резкое повышение температуры хрупкости при содержании МП в битуме свыше 100 % у модифицированных ас-

фальтовяжущих по сравнению с асфальтовяжущим на чистом битуме. Это связано с тем, что введение полимерных добавок повышает вязкость битума, толщина пленок между минеральными зернами при этом также закономерно увеличивается [4]. При больших концентрациях МП температура стеклования системы увеличивается, количества вязкого битума не хватает для обволакивания частиц МП, пористость системы «битум – МП» растет, что сказывается на снижении прочности асфальтовяжущего при низких температурах.

Снижение температуры хрупкости асфальтовяжущих с комплексно-модифицированной микроструктурой (рис. 4.2) на 4 °С при содержании МП 100 % в битуме характеризуется с тем, что при концентрации полимеров Elvaloy-AM 0,5 – 0,7 % мас. или СКМС-30 0,5 – 2,0 % мас. на поверхности МП формируется структурированный слой модификатора, прочно связанный межмолекулярными, водородными и донорно-акцепторными связями с поверхностью МП. Это усиливает межмолекулярное взаимодействие на поверхности раздела фаз «БМП – активированный МП» вследствие увеличения количества сегментов пластифицированных надмолекулярных образований полимера с активными центрами олеофильной поверхности [59, 129]. К тому же более низкая температура стеклования полимера (около минус 90 °С), по сравнению с битумом, предопределяет более низкую температуру стеклования и битумополимерного вяжущего, что положительно сказывается на прочности асфальтовяжущего при отрицательных температурах [10].

Полученные результаты дают возможность утверждать, что активация МП упрочняет структурированную дисперсную систему «битум – минеральный порошок», повышает деформативность асфальтовяжущего и, следовательно, позволит повысить трещиностойкость асфальтобетона при отрицательных температурах.

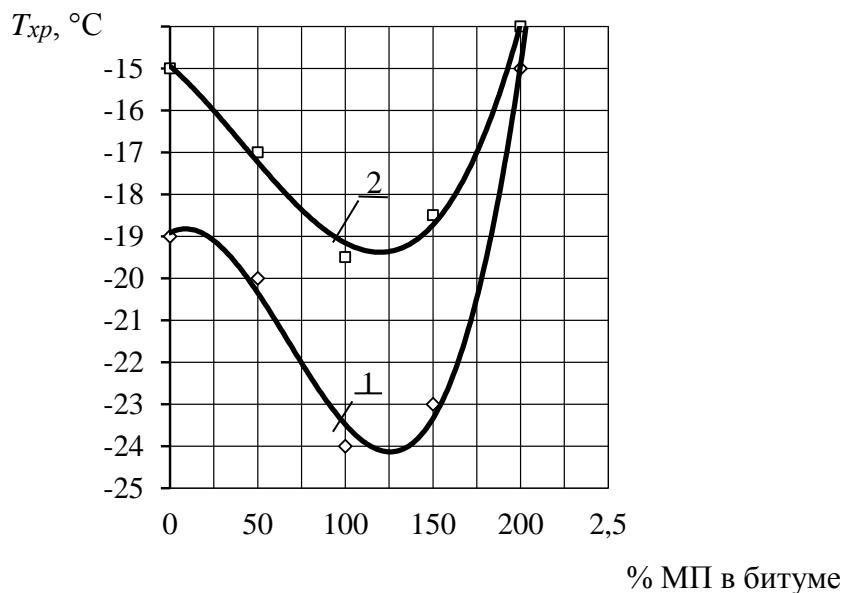


Рис. 4.2. Зависимость температуры хрупкости асфальтовяжущих с комплексно-модифицированной микроструктурой от содержания МП в битуме БНД 90/130: 1 – БМП (СКМС-30) + МП, активированный 0,5 % СКМС; 2 – БМП (2 % Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105) + МП, активированный 0,7 % Elvaloy-AM

### 4.3 Исследование деформационно-прочностных показателей комплексно-модифицированных асфальтовяжущих

Для определения влияния принятых модификаторов на деформационно-прочностные показатели микроструктуры были изготовлены образцы из асфальтовяжущих при различном содержании органического вяжущего: 10 %, 12 %, 14 %, 16 %, 18 %.

Исходя из полученных значений средней плотности и предела прочности при сжатии при 0 °C для каждой системы асфальтовяжущих (рис. 4.3), можно условно выделить три характерных участка.

Первый участок (содержание битума до 12 – 14 %) характеризуется наименьшими значениями средней плотности и прочности. Это свидетельствует о том, что при концентрации органического вяжущего ниже оптимального значения в системе «МП – органическое вяжущее» появляется воздушная фаза (растёт количество пор), система находится в области сыпучих тел [62].

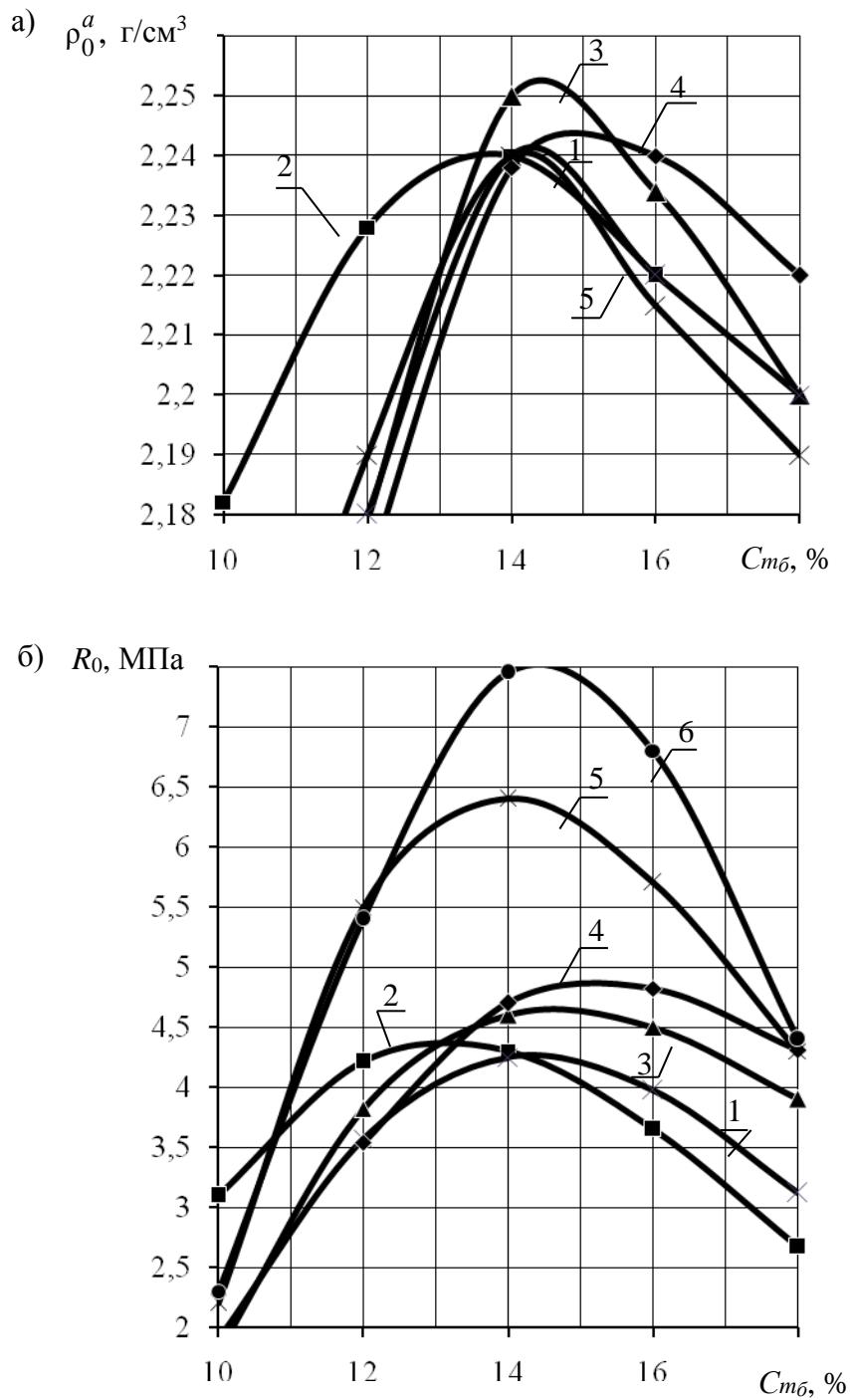


Рис. 4.3. Зависимость средней плотности (а) и предела прочности при сжатии образцов асфальтовяжущих при 0 °С ( $R_0$ ) (б) от содержания битума: 1 – БНД 60/90 + МП; 2 – БНД 60/90 + МП, активированный 0,5% СКМС-30; 3 – БПВ (БНД 60/90,  $\Pi_{25} = 70 \times 0,1$  мм, модифицированный 3 % SBS Kraton D 1101) + МП; 4 – БПВ (БНД 60/90,  $\Pi_{25} = 67 \times 0,1$  мм, модифицированный 2 % СКМС-30 + 30 % тех. серы) + МП, активированный 0,5% СКМС-30; 5 – БНД 60/90 + МП, активированный 0,5 % Elvaloy-AM; 6 – БПВ 60/90 (БНД 60/90,  $\Pi_{25} = 67 \times 0,1$  мм, модифицированный 2 % этиленглицидилакрилата + 0,2 % ПФК) + МП, активированный 0,7 % Elvaloy-AM.

Наличие большого количества пор способствует концентрации внутренних напряжений в наиболее слабых местах структуры материала, что приводит к снижению прочности [16].

Второй участок характеризуется наибольшими значениями плотности и прочности. Структура асфальтовяжущего становится наиболее плотной, количество пор минимально [62]. В данном случае наибольшая часть битума переходит в структурированное состояние; возможны хемосорбционные процессы между асфальтогеновыми кислотами битума и катионами кальция МП [105].

Расстояние между отдельными частицами становится меньше, чем сумма толщин структурированных оболочек двух соседних частиц. Свойства системы определяются энергией взаимодействия адсорбционно-сольватных слоёв органического вяжущего на поверхности МП, формируется прочная пространственная матрица асфальтовяжущего, что приводит к повышению плотности и прочности [62, 140].

Третий участок характеризуется постепенным снижением показателей, что вызвано, повышенным содержанием органического вяжущего. В данном случае суспензия МП в органическом вяжущем является свободнодисперсной и свойства асфальтовяжущего определяются только свойствами объёмного битума [140].

Анализируя полученные графики можно отметить рост плотности и прочности для модифицированных асфальтовяжущих. В случае модификации битума полимером типа SBS прочность растет (в 1,1 раза), предположительно, благодаря повышению когезионной прочности модифицированного вяжущего, вследствие формирования локальных и объемных структур из надмолекулярных образований полимера [135].

При комплексной модификации микроструктуры и, прежде всего, этиленглицидилакрилатом, достигается наибольшая прочность рассматриваемых асфальтовяжущих. Это можно объяснить тем, что при механоактивации поверхности МП этиленглицидилакрилатом происходит формирование на поверхности известнякового порошка структурно-упрочненного слоя из надмолекулярных образований терполимера, что способствует повышению адгезии битумополимерного вя-

жущего к поверхности МП, вследствие увеличения количества контактов сегментов надмолекулярных образований этиленглицидилакрилата с активными центрами олиофильной поверхности, аутогезии макромолекул терполимера [105, 129, 137]. Кроме этого модификация битума этиленглицидилакрилатом приводит к повышению смачиваемости поверхности МП, а, следовательно, и сорбции компонентов на поверхности порошка [105]. Благодаря этому формируется достаточно прочная и эластичная матрица с высокой адгезией и когезией, что и способствует повышению прочности при 0°C модифицированного асфальтовяжущего в 1,8-1,9 раз, по сравнению с немодифицированным. Для системы «битум, модифицированный СКМС-30 + техническая сера + МП, активированный СКМС-30» прочность при сжатии асфальтовяжущего повышается в 1,1 – 1,2 раза.

Кроме того, полученные данные подтвердили, что механоактивация МП полимером, в частности, каучуком СКМС-30 позволяет улучшить смачивание битумом минеральных зерен [129], о чем свидетельствует значение оптимального содержания битума для системы «БНД 60/90 + МП, активированный 0,5% СКМС-30» 13 – 13,5 % против 14 %. Увеличение концентрации битума (до 15–16 %) для системы «битум, модифицированный СКМС-30 + техническая сера + МП, активированный СКМС-30» вызвано, вероятно, сильным структурирующим воздействием каучука и технической серы. В результате модификации в битумополимерсерном вяжущем формируется трехмерная сопряженная сетка, узлами которой являются асфальтены, химически связанная сера, кристаллы и коллоидно-диспергированная сера, что приводит к повышению вязкости системы и увеличению содержания вяжущего [137].

В результате установлено, что оптимальное концентрационное соотношение битума и МП в асфальтовяжущих составляет 14 – 16 %. Показано, что комплексная модификация микроструктуры позволила улучшить основные свойства асфальтовяжущих. Для систем «битум – МП, активированный 0,5 % СКМС-30», «битум с 3 % Kraton D 1101 – МП» и «битум с 2 % СКМС-30 и 30 % тех. серы – МП, активированный 0,5 % СКМС-30» прочность при сжатии (0°C) возросла в 1,1 – 1,2 раза. Также наблюдается увеличение плотности и снижение водонасыщения. Наиболь-

шие значения прочности (в 1,8 – 1,9 раз), по сравнению с немодифицированными асфальтовяжущими имеют системы «битум – МП, активированный 0,7 % Elvaloy-AM» и «битум с 2 % Elvaloy-AM – МП, активированный 0,5 % Elvaloy-AM».

#### **4.4. Оптимизация асфальтовяжущего вещества состава «битум – Elvaloy-AM и ПФК-105 – минеральный порошок, поверхностно активированный Elvaloy-AM»**

В связи с тем, что совокупность факторов (табл. 4.4), действующих на комплексно-модифицированное асфальтовяжущее вещество, а именно массовая концентрация модифицированного дорожного битума, концентрация полимера активатора (Elvaloy-AM) на поверхности МП является сложным сочетанием, то был применен метод планирования эксперимента, позволяющий определить оптимальное содержание полимерного активатора на поверхности, обеспечивающего требуемые физико-механические свойства (среднюю плотность и предел прочности при сжатии асфальтовяжущих при 0 °C).

Таблица 4.4

Значение факторов варьирования, которые действуют на систему «битум – активированный минеральный порошок»

№ п/п	Код фактора	Физический смысл фактора	Ед. изм.	Интервал варьирования	Уровни фактора		
					-1	0	+1
1	X <sub>1</sub>	Содержание модификатора на поверхности МП	%	0,5	0,25	0,75	1,25
2	X <sub>2</sub>	Массовая концентрация битума	%	2,5	12	14,5	17

Использовался композиционный несимметричный план на трех целочисленных уровнях (-1; 0; +1) с коэффициентом корреляции между факторами  $r_i, j < 0,1; i, j = 1, 2, 3 \text{ и } i \neq j$  [83].

В таблицах 4.5 и 4.6 приведены параметры оптимизации системы «битум –

Elvaloy-AM и ПФК-105 – минеральный порошок, активированный Elvaloy-AM», а также матрица планирования и результаты эксперимента.

Таблица 4.5

## Параметры оптимизации и их предельные значения

№ п/п	Код параметра	Физический смысл параметра оптимизации	Ед. изм.	Предельные значения функции отклика
1	$Y_1$	Предел прочности при сжатии при 0 °C	МПа	не более 6,50
2	$Y_2$	Средняя плотность	$\text{г}/\text{см}^3$	не менее 2,21

Таблица 4.6

## Матрица планирования и результаты эксперимента

№ п/п	В кодируемых значениях		В натуральных значениях		Средние значения экспериментальных данных	
	$X_1$	$X_2$	$X_1$ , % Elvaloy в МП	$X_2$ , % битума	$Y_1$ , $R_{cyc}^0$ , МПа	$Y_2$ , $\rho_{cp}$ , $\text{г}/\text{см}^3$
1	0	0	0,75	14,5	6,46	2,21
2	+	+	1,25	17	5,89	2,19
3	-	-	0,25	12	5,67	2,18
4	0	+	0,75	17	5,44	2,17
5	0	-	0,75	12	5,33	2,16
6	+	0	1,25	14,5	5,84	2,19
7	-	0	0,25	14,5	6,35	2,23
8	+	-	1,25	12	5,16	2,15
9	-	+	0,25	17	4,99	2,16

В программе MathCAD 14.0 for Windows выполнен расчет математических моделей с построением графиков функции отклика (рис. 4.5).

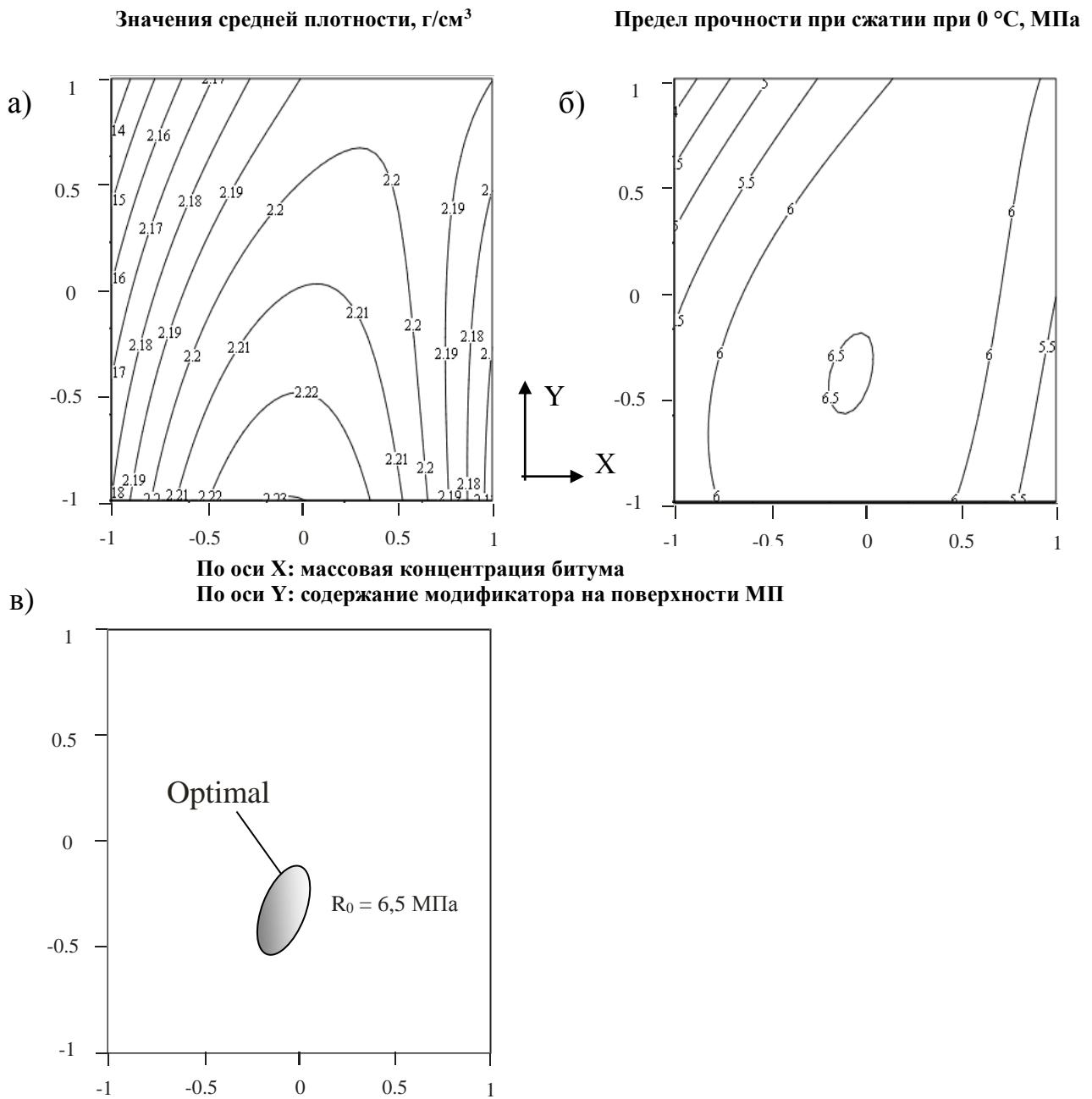


Рис. 4.5 Графики функций: а) средней плотности; б) предела прочности при сжатии; в) область оптимальных значений

Получены математические модели в виде неполных полиномов второй степени:

$$Y_1(X_1, X_2) = -25,858 + 4,501X_1 + 1,982X_2 - 0,159X_1^2 - 10,044X_2^2 + 0,234X_1X_2 - 0,018X_1^2X_2 + 0,592X_1X_2^2, \quad (4.1)$$

$$Y_2(X_1, X_2) = -0,247 + 0,345X_1 - 1,306X_2 - 0,012X_1^2 - 0,116X_2^2 - 0,186X_1X_2 + \\ + 0,0064X_1^2X_2 - 0,008X_1X_2^2, \quad (4.2)$$

Анализируя данные, приведенные на рис. 4.5., можно установить, что оптимальное содержание Elvaloy-AM на поверхности минерального порошка составляет около 0,65 – 0,7 %. При больших концентрациях (1,25 %) наблюдается явный избыток активатора Elvaloy-AM, выраженного в явлении слипания частиц МП между собой в виде «горошинок» и снижению прочности из-за появления плоскостей скольжения по полимолекулярным слоям этиленглицидилакрилата.

#### **4.5. Определение оптимального содержания битума и принятых полимерных модификаторов на поверхности минеральных материалов, обеспечивающих повышенные деформационно-прочностные свойства асфальтобетона**

Для установления оптимального содержания битума в асфальтобетонах типов «А» и «Б» образцы-балочки асфальтобетона испытывали на растяжение при изгибе при 20 °С. (рис. 4.6).

На рис. 4.7. показано изменение усталостной долговечности образцов-балочек асфальтобетонов типов «А» и «Б» при + 20 °С (на битуме БНД 60/90) в зависимости от содержания битума при статическом нагружении величиной 0,4 МПа.

На рис. 4.8. показано изменение усталостной долговечности образцов-балочек асфальтобетонов типов «А» и «Б» при + 20 °С (тип «Б», битум БНД 60/90) в зависимости от содержания битума при воздействии кратковременной циклической нагрузки (напряжение 0,4 МПа, время действия – 0,1 с).

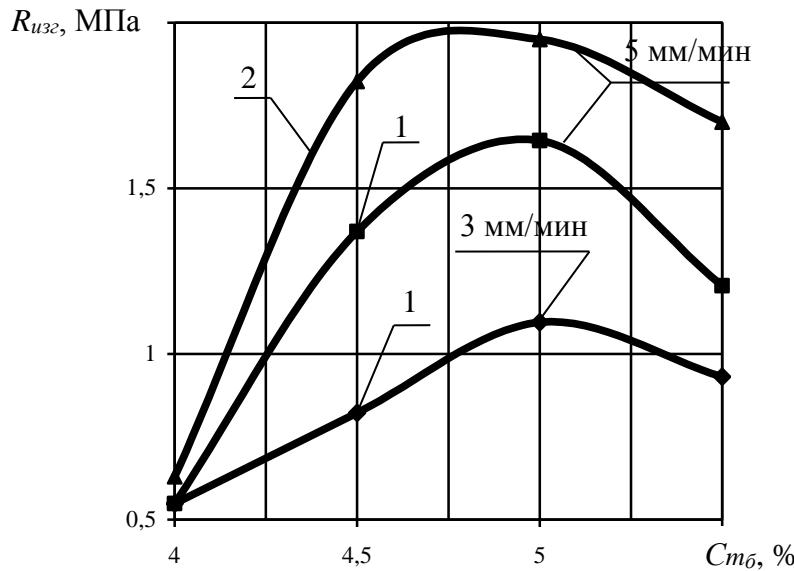


Рис. 4.6. Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе ( $R_{izg}$ ), МПа при 20 °С обычного асфальтобетона (составы В. А. Золотарева) от содержания битума ( $Cm_6$ ) БНД 60/90 и скорости поднятия плиты пресса: 1 – асфальтобетон типа «А»; 2 – асфальтобетон типа «Б».

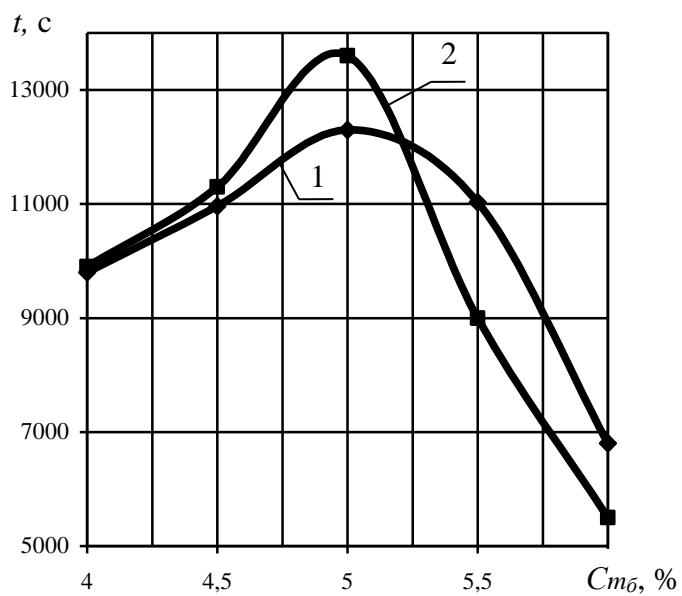


Рис. 4.7. Усталостная долговечность асфальтобетона при статическом нагружении ( $t$ ) (0,4 МПа) и температуре 20 °С в зависимости от содержания битума ( $Cm_6$ ) БНД 60/90: 1 – асфальтобетон тип «А»; 2 – асфальтобетон тип «Б».

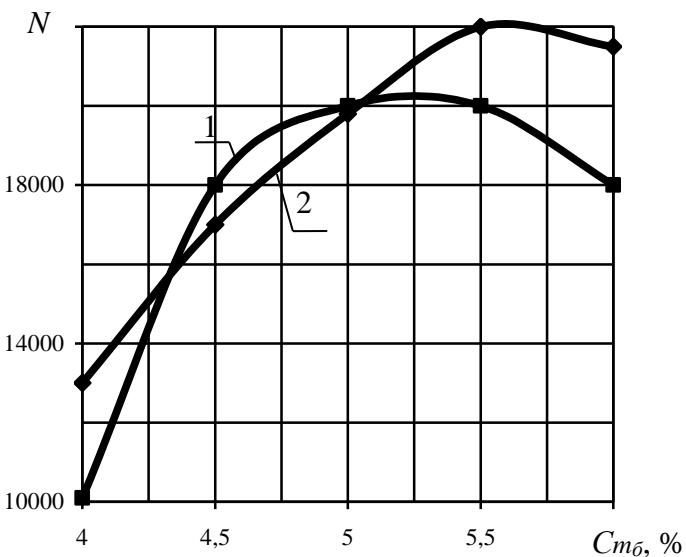


Рис. 4.8. Количество циклов до разрушения асфальтобетона при кратковременных циклических нагрузках ( $N$ ) (0,1 с; 0,4 МПа) в зависимости от содержания битума ( $C_{m\delta}$ ) БНД 60/90: 1 – асфальтобетон типа «А»; 2 – асфальтобетон типа «Б».

Испытания асфальтобетонов типов «А» и «Б» (ДСТУ Б.В.2.7-119) свидетельствуют о том, что оптимальная концентрация битума, обеспечивающая наибольшую усталостную долговечность для асфальтобетона типа «А» составила – 5 % при количестве циклов до разрушения 19440, для типа «Б» – 5,5 % при 22000 циклов. Усталостная долговечность у крупнозернистого асфальтобетона несколько ниже, чем у среднезернистого. Это обусловлено, вероятно, большей интенсивностью разрушения из-за высокого количества пор и пустот внутри материала вследствие большего содержания щебня.

Но в тоже время при испытании асфальтобетона статической нагрузкой такой же величины время до разрушения асфальтобетона типа «А» выше и составляет 13800 сек, а для типа «Б» – 12600 сек при оптимальном содержании битума 4,8 % и 5 % соответственно. Поэтому, для повышенной динамической усталостной долговечности асфальтобетона характерно несколько большее содержание битума, что вызвано более оптимальным заполнением пор битумом в структуре материала и, следовательно, меньшим количеством участков концентрации критических напряжений.

В связи с тем, что в данной работе осуществляется комплексная модификация асфальтобетонов типов «А» и «Б» по (ДСТУ Б В.2.7-119:2011), которые широко применяются для строительства верхних слоев покрытий нежестких дорожных одежд, в составе которых принят битум БНД 60/90 с массовой концентрацией 2,0 % мас. этиленглицидилакрилата и 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105, то для определения оптимальной концентрации этиленглицидилакрилата построены графики зависимости  $R_{cж} = f(C_m)$  (где  $R_{cж}$  – предел прочности при сжатии бетона, МПа;  $C_m$  – концентрация полимера на поверхности минеральных материалов, %) (рис. 4.9, 4.10).

Характерной особенностью для данных по пределу прочности при сжатии является экстремум (максимум) в области массовой концентрации этиленглицидилакрилата на поверхности минеральных материалов 0,7 % (рис. 4.9, 4.10). Это подтверждает известные закономерности структурообразования комплексно-модифицированного этиленглицидилакрилатом полидисперсного асфальтобетона [105].

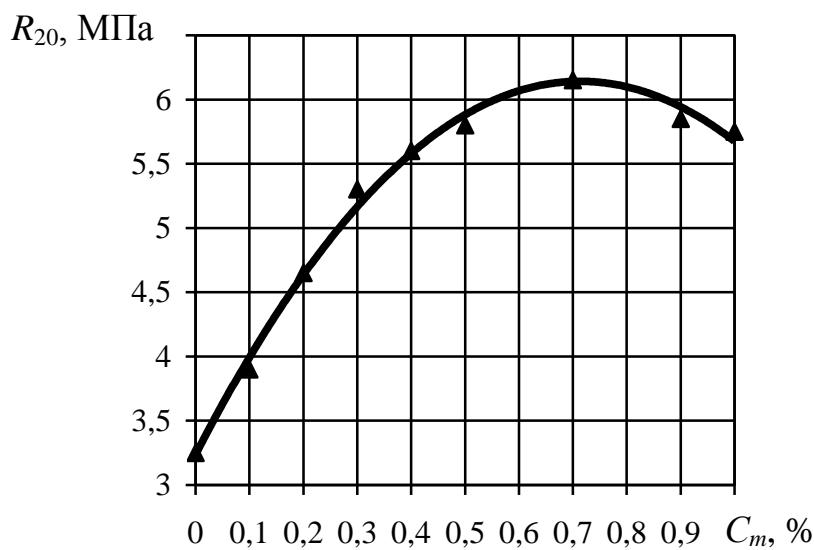


Рис. 4.9. Зависимость предела прочности при сжатии модифицированного асфальтобетона при 20°C ( $R_{20}$ ) от массовой концентрации на поверхности минеральных материалов этиленглицидилакрилата ( $C_m$ ).

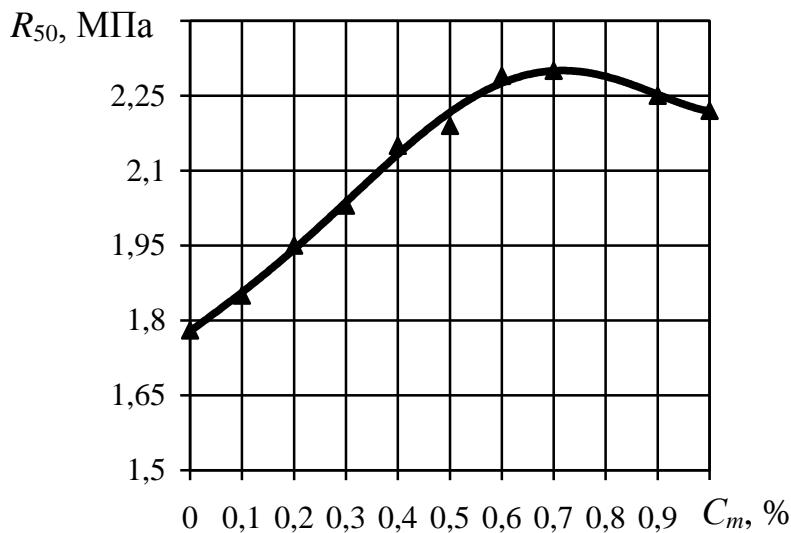


Рис. 4.10. Зависимость предела прочности при сжатии модифицированного асфальтобетона при 50°C ( $R_{50}$ ) от массовой концентрации на поверхности минеральных материалов этиленглицидилакрилата ( $C_m$ ).

Следовательно, можно предположить, что при массовой концентрации этиленглицидилакрилата 0,7 % мас. на поверхности минеральных материалов формируется оптимально структурированный слой из макромолекул этиленглицидилакрилата, который обеспечивает весь комплекс процессов, происходящих при взаимодействии на поверхности раздела фаз «минеральный материал – этиленглицидилакрилат», «модифицированная поверхность минеральных материалов этиленглицидилакрилатом – нефтяной дорожный битум, модифицированный этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-105». Как показано в разделе 2 диссертационной работы при оптимальной концентрации этиленглицидилакрилата формируется непрерывная адсорбционно-сольватная пленка терполимера на поверхности минеральных материалов толщиной 40 – 60 нм под действием адсорбционных процессов и химического взаимодействия глицидиловых групп этиленглицидилакрилата и гидроксильных групп (химическое уравнение 2.2), а при взаимодействии поверхности извесякового минерального порошка с этиленглицидилакрилатом возможны донорно-акцепторные взаимодействия, так как ионы кальция на поверхности минерального порошка имеют свободные орбитали, а этиленглициди-

лакрилат содержит атомы кислорода с неподеленной парой электронов [105, 136].

Следует отметить, что при активации МП этиленглицидилакрилатом на поверхности взаимодействия «этиленглицидилакрилат – полифосфорная кислота», (содержатся в модифицированном битуме), этиленглицидилакрилат на поверхности минеральных материалов возможно образование сетчатых структур по схеме (2.2), что определит монолитность и изотропность модифицированного асфальтобетона [136].

Комплексная модификация структуры литого асфальтобетона по методике профессора В. И. Братчуна включает в себя модификацию нефтяного битума комплексной добавкой на основе 2 % бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 совместно с 30 % тех. серы, а также поверхностную активацию каучуком СКМС-30 минерального порошка. На рис. 4.11 приведена зависимость предела прочности при сжатии комплексно-модифицированного литого асфальтобетона при 20°C ( $R_{20}$ ) от массовой концентрации на поверхности МП каучука СКМС-30.

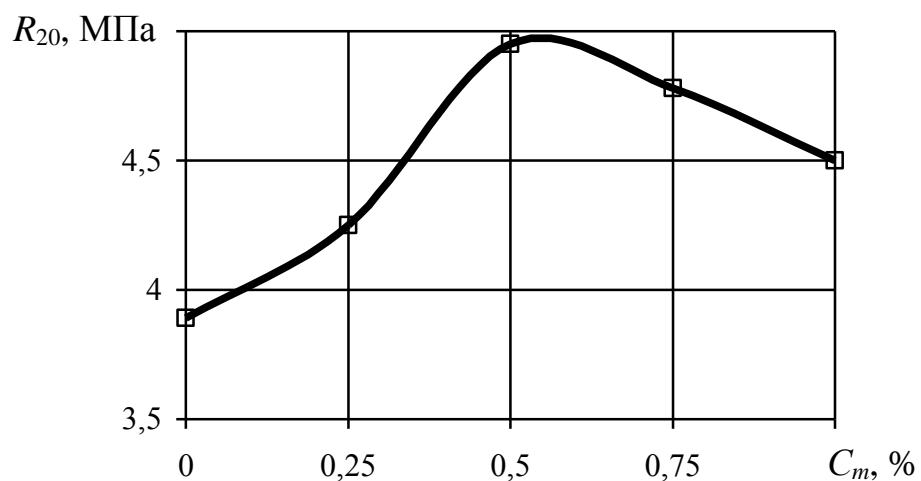


Рис. 4.11. Зависимость предела прочности при сжатии модифицированного литого асфальтобетона при 20 °C ( $R_{20}$ ) от массовой концентрации на поверхности МП бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 ( $C_m$ ).

Предел прочности при сжатии имеет максимум при концентрации 0,5 % мас. СКМС-30 на поверхности минерального порошка. Это свидетельствует о

том, что при данной концентрации СКМС-30 формируется структурно-упрочненный слой бутадиенметилстирольного каучука оптимальной толщины, который повышает адгезию битумополимерного вяжущего к поверхности минерального порошка. Превышение концентрации СКМС-30 на поверхности минерального порошка более 0,5 % мас. приводит к формированию полимолекулярных слоев СКМС-30. Слои полимера являются плоскостями скольжения при деформировании и приводят к снижению прочности.

Таким образом, в дальнейших исследованиях изучались технологические свойства модифицированных асфальтобетонных смесей и деформационно-прочностные свойства асфальтополимербетонов следующих видов:

1) Асфальтобетоны типов «А» и «Б» состава: минеральная часть, представленная гранитным щебнем и песком, а также известняковым минеральным порошком, поверхность которых активирована этиленглицидилакрилатом 0,7 % к массе минеральных материалов в пересчете на сухое вещество из раствора в бензине; нефтяной дорожный битум, модифицированный 2,0 % мас. этиленглицидилакрилата в комплексе с 0,2% полифосфорной кислоты ПФК-105.

2) Литой асфальтобетон состава: минеральная часть, представленная гранитным щебнем и песком, а также известняковым минеральным порошком, поверхность которого активирована бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 0,5 % к массе минеральных материалов в пересчете на сухое вещество из раствора в бензине; нефтяной дорожный битум, модифицированный 2,0 % мас. СКМС-30 в комплексе с 30 % технической серы.

3) Щебеночно-мастичный асфальтобетон состава: минеральная часть, представленная гранитным щебнем, песком и известняковым минеральным порошком с добавлением гранулированной стабилизирующей целлюлозной добавки на основе битума Antrocel-G; нефтяной дорожный битум.

4) Щебеночно-мастичный асфальтобетон состава: минеральная часть, представленная гранитным щебнем, песком и известняковым минеральным порошком, поверхность которых активирована этиленглицидилакрилатом 0,7 % к массе минеральных материалов в пересчете на сухое вещество из раствора в бен-

зине; с добавлением гранулированной стабилизирующей целлюлозной добавки на основе битума Antrocel-G; нефтяной дорожный битум, модифицированный 2,0 % мас. этиленглицидилакрилата в комплексе с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105.

#### **Выводы по разделу 4:**

1. Сравнительный анализ результатов испытаний модифицированных битумов показал, что принятые полимерные добавки позволяют расширить интервал пластичности в среднем на 10 – 15 °С, модифицированные битумы обладают эластическими свойствами (эластичность 70 – 80 %), когезионная прочность возросла в 1,5 – 1,7 раз.

2. Введение в битумы полимерных добавок и активация поверхности МП растворами полимеров позволяет повысить деформативность асфальтовяжущего при отрицательных температурах. Установлено, что наибольшее снижение температуры хрупкости (на 4 – 6 °С) наблюдается у асфальтовяжущих с комплексно-модифицированной структурой, представленной системами «битум – МП, активированный раствором СКМС-30», «битум – СКМС-30 – техническая сера – МП, активированный раствором СКМС-30» и «битум – Elvaloy-AM – МП, активированный Elvaloy-AM». Установлено, что оптимальное количественное соотношение МП в битуме находится в пределах от 75 % до 100 – 125 %.

3. Комплексная модификация микроструктуры этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM, бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30, термоэластопластом Kraton D 1101 позволяет улучшить основные физические и деформационно-прочностные свойства асфальтовяжущих, благодаря чему предел прочности при сжатии повышается в 1,1 – 1,9 раз. Установлено, что оптимальная концентрация битума в асфальтовяжущих находится в пределах от 13 – 14 % до 15 – 16 % и зависит от вязкости битума или битумополимерного вяжущего, а также от степени структурированности минеральным порошком органического вяжущего.

4. С использованием метода экспериментально-статистического моделиро-

вания установлена оптимальная концентрация этиленглицидилакрилата марки Elvaloy-AM на поверхности минерального порошка 0,65 – 0,7 %.

5. Оптимальная концентрация битума в асфальтобетонах типов «А», «Б» при исследовании усталостной долговечности находится в пределах от 5 до 5,5 %.

6. Для мелкозернистых асфальтобетонов (типов «А», «Б»), содержащих в своем составе битум БНД 60/90 ( $\Pi_{25} = 67 \times 0,1$  см), модифицированный 2 % этиленглицидилакрилата в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-105 (0,2 % мас.), определена оптимальная концентрация 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата на поверхности минеральных материалов: щебня, песка, минерального порошка.

7. Для литого асфальтобетона, содержащего в своем составе битум БНД 60/90, модифицированный 2 % бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 в комбинации с технической серой (30 % мас.), установлена оптимальная концентрация 0,5 % мас. СКМС-30 на поверхности минерального порошка.

## РАЗДЕЛ 5

# ИССЛЕДОВАНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ДОЛГОВЕЧНОСТИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ АСФАЛЬТОБЕТОНОВ С УЧЕТОМ ВЛИЯНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ФАКТОРОВ

## **5.1. Усталостная долговечность асфальтополимербетонов в зависимости от температурных условий и режимов нагружения**

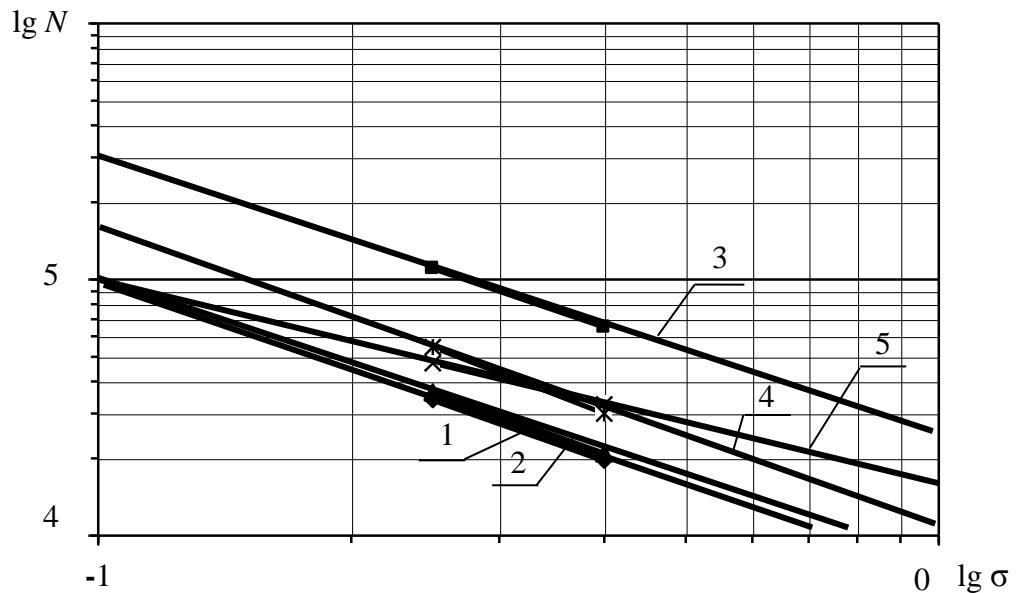
Реологические свойства асфальтобетонов в значительной степени изменяются в зависимости от амплитуды, времени приложения нагрузки, температурных условий. Эти факторы в конечном итоге и определяют характер усталостного разрушения асфальтобетона (хрупкое или вязко-пластичное разрушение) [10, 23, 26].

Как уже было отмечено в первой главе при эксплуатации в верхних слоях дорожной одежды нежесткого типа асфальтобетон работает в условиях действия растягивающих и сжимающих напряжений различных амплитуд с разным временем действия, а также постоянно изменяющейся температурой окружающей среды. Следовательно, необходимо установить влияние температурных условий и режимов нагружения на количественные и качественные показатели усталостной долговечности асфальтобетонов выбранных типов.

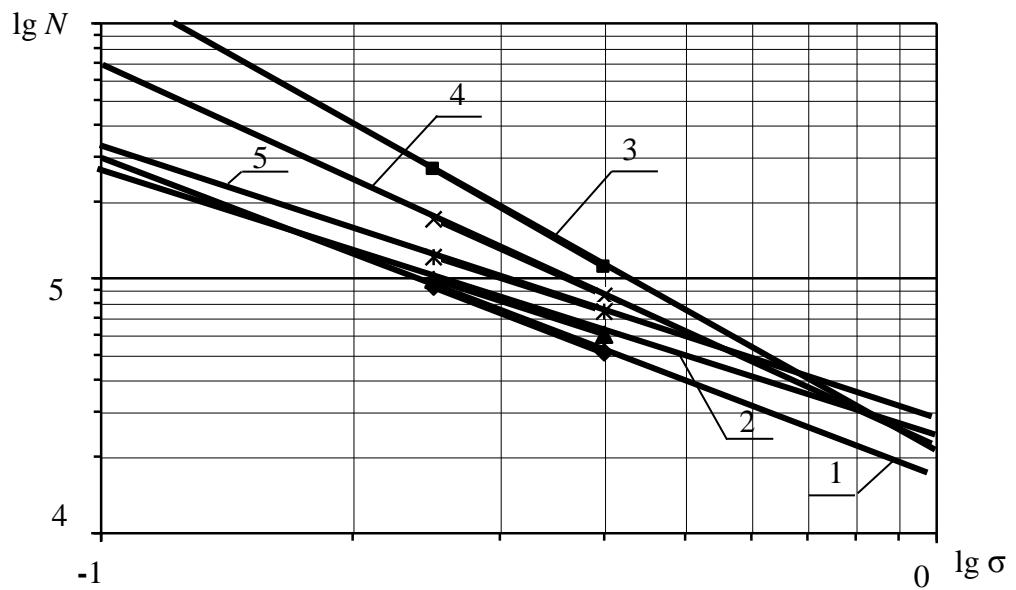
В соответствии с выбранными режимами испытания (глава 3) для оценки влияния температурных условий были приняты следующие температурные режимы: + 20 °C; + 10 °C; 0 °C; – 10 °C. Амплитуды растягивающих напряжений от кратковременной циклической нагрузки находятся в пределах от 0,2 МПа до 1,0 МПа.

Усталостная долговечность асфальтобетонов в логарифмической системе координат в зависимости от температуры испытаний приведена на рис. 5.1, 5.2. Режим действия кратковременной нагрузки: 0,1 с – нагружение; 0,9 с – отдых, т.е. циклическая нагрузка с частотой в 1 Гц.

а)

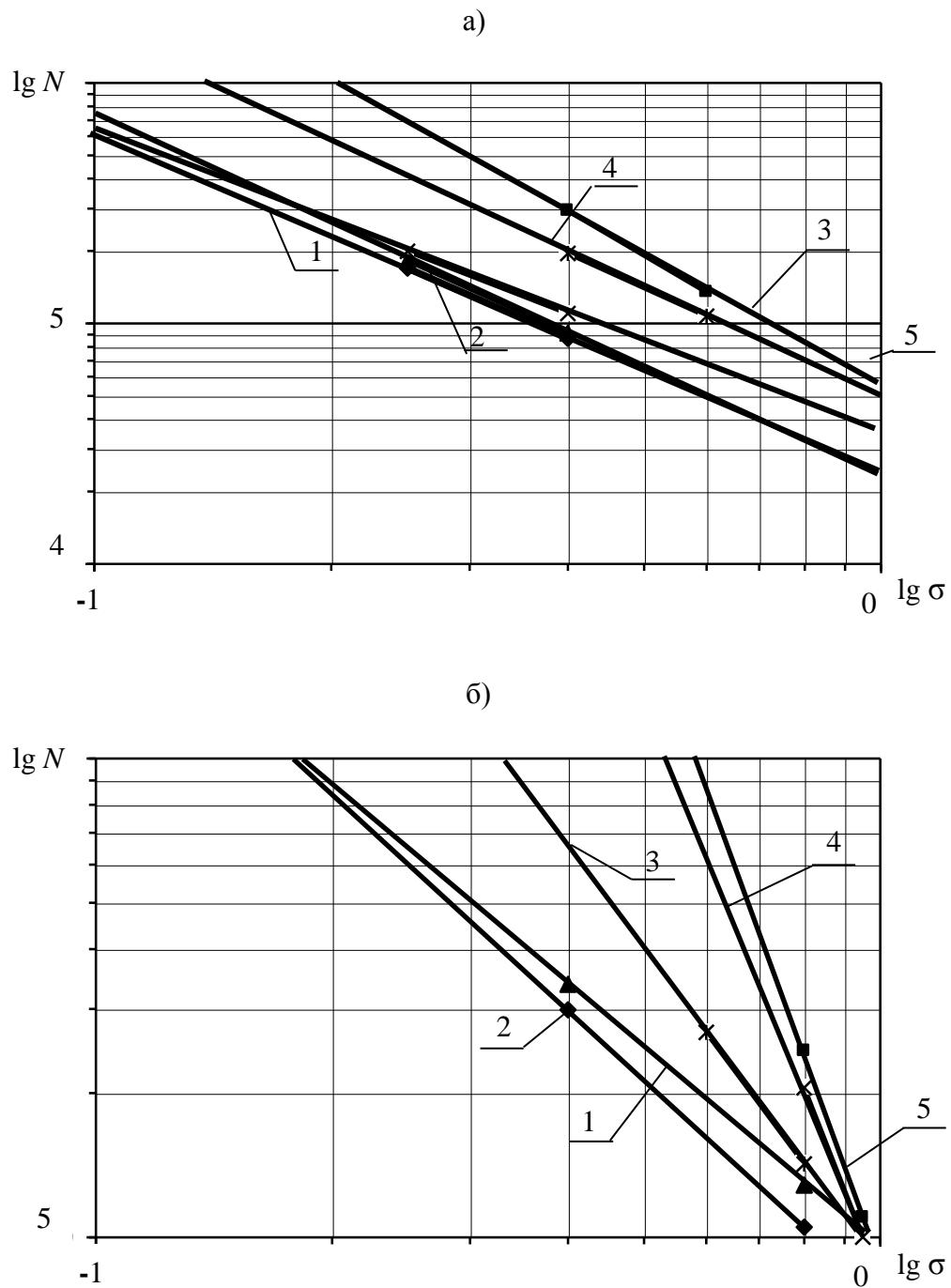


б)



а) + 20 °C; б) +10 °C.

Рис. 5.1. Усталостная долговечность асфальтобетонов: 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой СКМС-30. 5 – ЩМА-10 с добавкой Antrocet-G.



а) 0 °C;      б) минус 10 °C.

Рис. 5.2. Усталостная долговечность асфальтобетонов: 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой СКМС-30. 5 – ЩМА-10 с добавкой Antrocel-G.

В качестве критерия отказа (критической выносливости) асфальтобетонного образца под действием кратковременных циклических и статических нагрузок был принят прогиб балки величиной 4 мм. Как показали наблюдения такой прогиб достаточен для появления магистральных усталостных трещин в диапазоне температур от +20 °С до минус 10 °С.

Характер усталостного разрушения образца-балочки асфальтобетона от действия динамических нагрузок приведен на рис. 5.3.



Рис. 5.3. Характер усталостного разрушения образца-балочки асфальтобетона.

Исходя из полученных зависимостей (рис. 5.1, 5.2), данные коэффициентов усталостной долговечности, рассчитанные по формуле проф. А. В. Руденского (1.13) [20] для исследуемых асфальтобетонов, приведены в табл. 5.1.

Испытания асфальтобетонов типов «А», «Б» (ДСТУ Б В.2.7-119: 2011) показали, что количество циклов до разрушения крупнозернистого асфальтобетона при заданных напряжениях несколько ниже, чем среднезернистого, и характеризуется, вероятно, большей интенсивностью разрушения в связи с более высоким количеством пор и пустот внутри материала из-за повышенного содержания

крупного минерального заполнителя. Полученные данные согласуются с данными, приведенными в работах [20, 49, 50, 52, 55]. При этом коэффициенты усталостной долговечности для обоих типов асфальтобетонов различаются незначительно.

Таблица 5.1

## Значения коэффициентов усталостной долговечности

Температура испытания, °C	Коэффициенты усталостной долговечности*( $m$ ) асфальтобетонов следующих типов				
	Тип «А»	Тип «Б»	Тип «Б» + Elvaloy-AM	Литой асфальтобетон + СКМС-30	ЩМА-10
+20	0,65	0,67	0,60	0,57	0,83
+10	0,56	0,59	0,48	0,55	0,80
0	0,52	0,48	0,40	0,49	0,56
-10	0,46	0,39	0,27	0,29	0,40

\*Примечание: меньшие значения коэффициента  $m$  свидетельствуют о большей усталостной долговечности асфальтобетона.

Большим количеством циклов до разрушения по сравнению со стандартными асфальтобетонами при всех температурах испытания характеризуется ЩМА, несмотря на повышенное содержание крупных фракций щебня. Это свидетельствует о том, что структура ЩМА имеет более жесткий пространственный каркас, который способен более эффективно воспринимать заданные динамические напряжения. Повышенное содержание асфальтовяжущего вещества в ЩМА приводит к снижению остаточной пористости и, следовательно, источников концентраторов напряжений и повышению усталостной долговечности. Но в тоже время, на всех зависимостях (рис. 5.1, 5.2) заметно, что линия наклона усталостной долговечности к линии абсцисс имеет более пологий угол по сравнению с другими асфальтобетонами, поэтому коэффициент  $m$  для ЩМА оказался самым высоким из всех типов асфальтобетонов. Следовательно, при большом количестве циклов

динамической нагрузки усталостные разрушения в материале будут развиваться быстрее, чем в обычном асфальтобетоне. Это связано с тем, что слабоструктурированный битум раздвигает зерна минерального остова ЩМА. Присутствие слабоструктурированного битума в ЩМА способствует некоторому увеличению пластической деформативности при растяжении (особенно при отрицательных температурах), а также снижению когезионной прочности материала при положительных температурах. Это подтверждается в работе [52], в которой показано, что в результате испытаний на прочность при сжатии ЩМА имел более низкие показатели в сравнении с горячими асфальтобетонами типов «А» и «Б», тогда как предел прочности при изгибе достаточно высок (выше, чем у типов «А» и «Б»).

Литой асфальтобетон характеризуется в среднем на 20 – 30 % более высокой усталостной долговечностью по сравнению с асфальтобетонами (ДСТУ Б.В.2.7-119: 2011), что выражается и в пониженных коэффициентах усталостной долговечности. При положительных температурах (+20 °C, +10 °C) коэффициент усталостной долговечности равен в среднем 0,56, а при минус 10 °C – 0,29. Несмотря на то, что повышенное содержание органического вяжущего как правило снижает прочность при положительных температурах, вследствие накопления пластической деформации из-за большой концентрации свободного битума, однако благодаря комплексной модификации бутадиенметилстирольным каучуком структуры литого асфальтобетона, по-видимому, значительное количество модифицированного вяжущего перешло в структурированное состояние. В периодах отдыха, пленки вяжущего проявляют эластические свойства и обеспечивают релаксацию внутренних напряжений, а надмолекулярный структурно-упрочненный слой бутадиенметилстирольного каучука на поверхности МП, повышает адгезию битумополимерного вяжущего к поверхности минерального порошка [131].

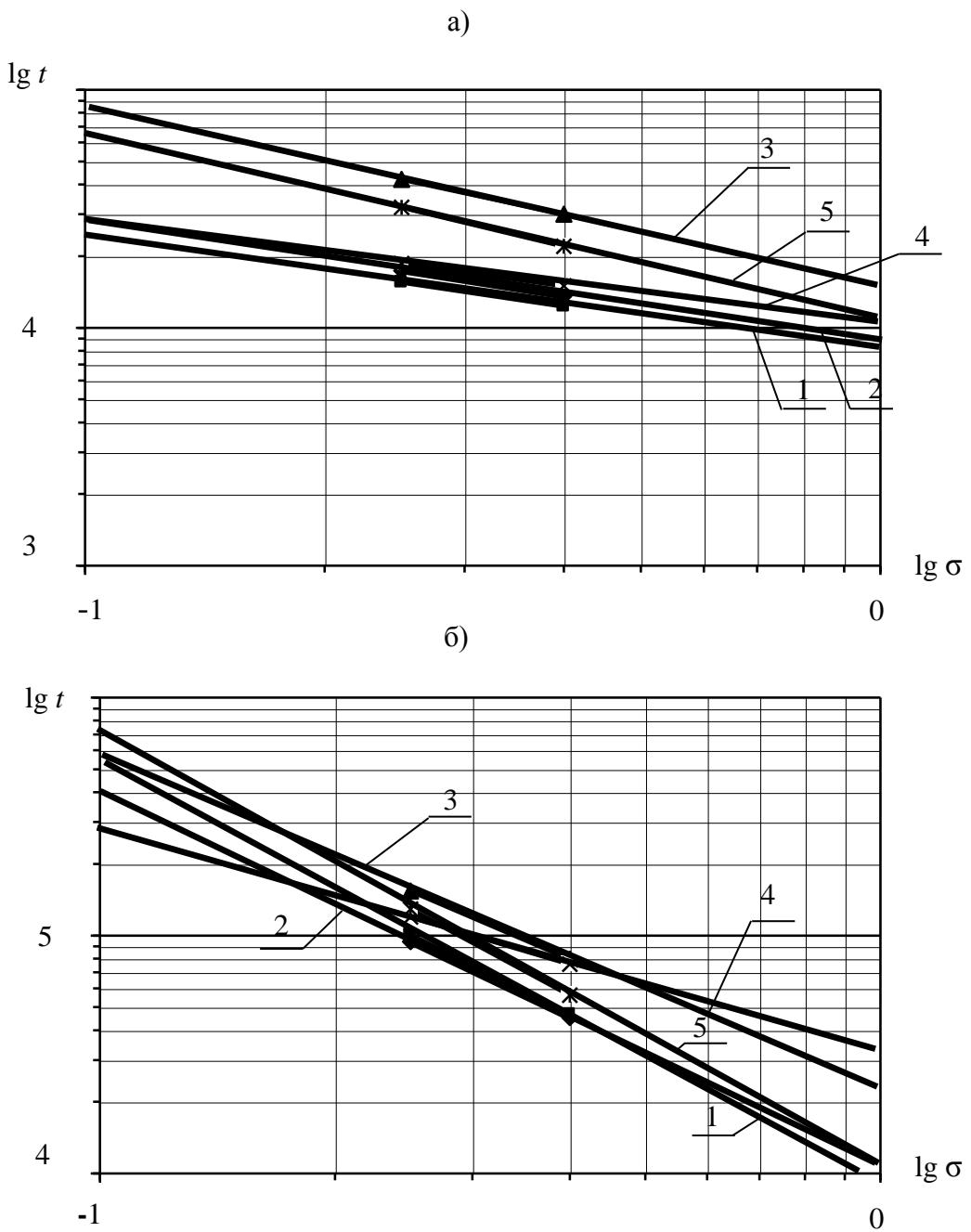
Значительное уменьшение коэффициента усталости при отрицательных температурах коррелирует с графиками по температуре хрупкости асфальтовяжущих веществ (рис. 4.1, 4.2), где асфальтовяжущее с комплексно-модифицированной структурой каучуком СКМС-30 имеет на 4 °C меньшую тем-

пературу хрупкости. Следовательно, данный тип асфальтобетона более долговечен в области отрицательных температур и воздействии сил, вызывающих переменные напряжения.

Самой высокой усталостной долговечностью характеризуются образцы асфальтобетона типа «Б» с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM. Это подтверждает высказанное предположение о том, что оптимальная концентрация Elvaloy-AM (2,0 % мас. и 0,2 % полифосфорной кислоты (ПФК-105)) в модифицированном битуме и структурно-упрочненный слой этиленглицидилакрилата на поверхности поверхностно-активированного минерального материала обеспечивает значительно прочную пространственную матрицу, благодаря чему коэффициенты усталости у данного типа асфальтобетона имеют меньшие значения, по сравнению со всеми другими типами исследуемых асфальтобетонов.

Таким образом, усталостная долговечность асфальтобетонов при кратковременных циклических нагрузках значительно зависит от структуры материала и находится в прямой зависимости от адгезионно-когезионных показателей и эластичных свойств пленочного битума. Чем выше данные показатели у материала, тем большей усталостной долговечностью он будет обладать при воздействии динамических нагрузок.

При статическом нагружении усталостная долговечность имеет аналогичный вид с зависимостями при циклическом нагружении (рис. 5.4, 5.5). В данном случае характерно, что асфальтобетоны с комплексно-модифицированной структурой, особенно асфальтобетоны, комплексно-модифицированные этиленглицидилакрилатом, в среднем на 50 – 90 % характеризуются более высокой долговечностью.



a) +20 °C; б) 0 °C.

Рис. 5.4. Усталостная долговечность асфальтобетонов при статическом нагружении: 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой СКМС-30. 5 – ЩМА-10 с добавкой Antrocet-G.

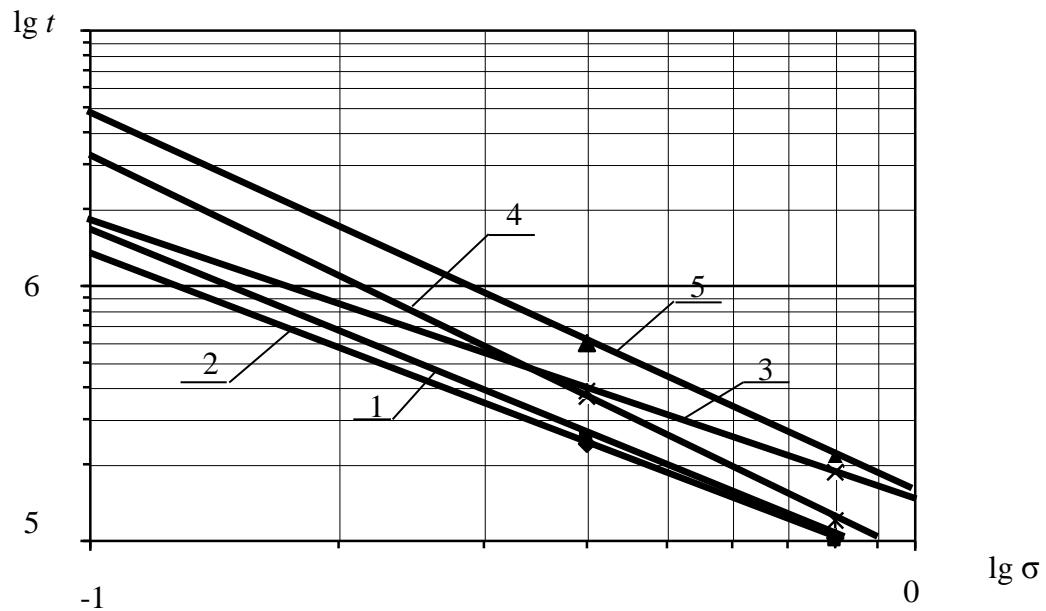


Рис. 5.5. Усталостная долговечность асфальтобетонов при статическом нагружении (температура – минус 20 °С): 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой СКМС-30. 5 – ЩМА-10 с добавкой Antrocel-G.

Характерно, что несколько большую долговечность по сравнению с литым асфальтобетоном имеет ЩМА, особенно при положительных температурах (+20 °С). В данном случае при воздействии постоянных нагрузок пластические деформации в литом асфальтобетоне развиваются значительно быстрее, т.к. напряжения в структуре материала не успеют релаксировать, как это было при циклическом нагружении. Пленки свободного битума, которые содержатся в литом асфальтобетоне под влиянием растягивающих напряжений начинают деформироваться, сплошность структуры нарушается и материал постепенно разрушается. При отрицательных температурах прочность литого асфальтобетона выше, чем у ЩМА. Это объясняется значительно большей когезионной прочностью ориентированных слоев модифицированного вяжущего и значительно меньшей температурой стеклования битума, модифицированного комплексной добавкой на основе СКМС-30 и технической серы [142]. Сравнительно более высокая усталостная дол-

говечность ЦМА при воздействии статических нагрузок (температура испытаний +20 °C) определяется, по-видимому, его достаточно прочным пространственным каркасом минеральных компонентов за счет трения и зацепления.

Температурная зависимость динамической циклической усталостной долговечности бетонов на органических вяжущих (рис. 5.6) свидетельствует о том, что комплексно-модифицированный этиленглицидилакрилатом асфальтобетон и ЦМА-10 имеют более пологий характер в диапазоне температур от 20 °C до минус 30 °C. Это свидетельствует об их меньшей температурной чувствительности. С повышением температуры снижается выносливость асфальтобетонов при заданных режимах нагружения.

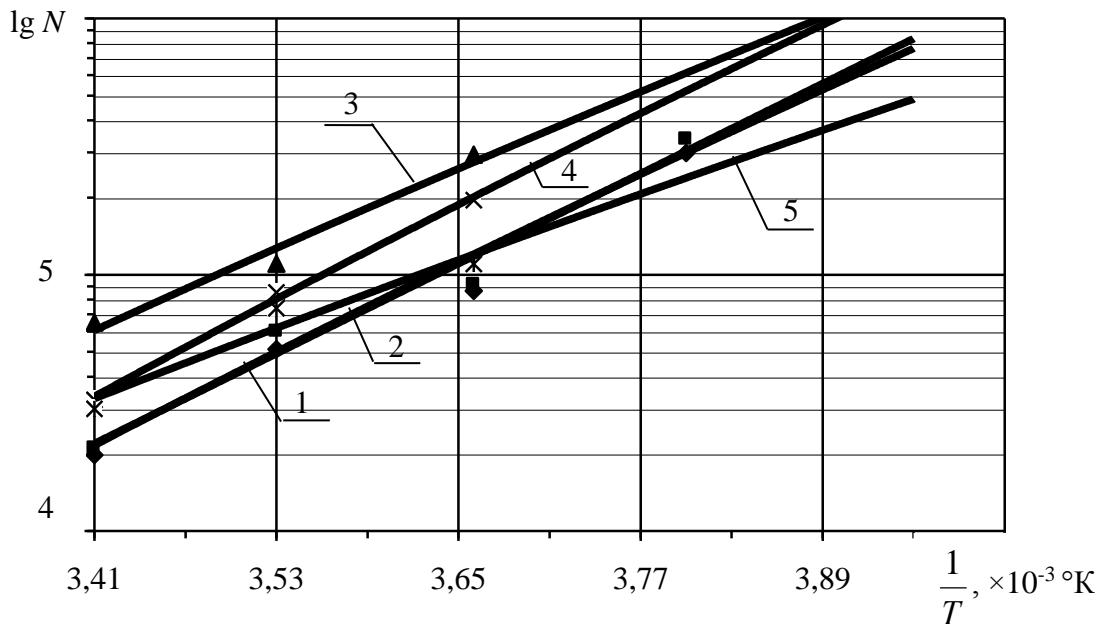


Рис. 5.6. Температурная зависимость усталостной долговечности асфальтобетонов при кратковременном циклическом напряжении 0,4 МПа: 1 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «А»); 2 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»); 3 – асфальтобетон на битуме БНД 60/90 (тип «Б»), с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM; 4 – литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной микроструктурой СКМС-30. 5 – ЦМА-10 с добавкой Antrocel-G.

Данные, приведенные на рис. 5.7., свидетельствуют об усилении однородности коагуляционных контактов в ЩМА с комплексно-модифицированной микро-, мезо-, макроструктурой и более высокой адгезионной прочностью и меньшей величины относительной деформации пленочного модифицированного органического вяжущего. В частности, модифицированный этиленглицидилакрилатом (2 % мас.) нефтяной дорожный битум БНД 130/200 ( $\Pi_{25} = 151$  град.) имеет интервал пластичности 78 °С против ИП БНД 130/200 57 °С, эластичность при 0 °С – 62 %, против 0 %, а при 25 °С  $\mathcal{E}_{25} = 77$  % против 0 %, адгезия по ДСТУ Б.В.2.7-81-98 составляет 89 % против 18 %, когезия – 0,039 МПа против 0,022 МПа.

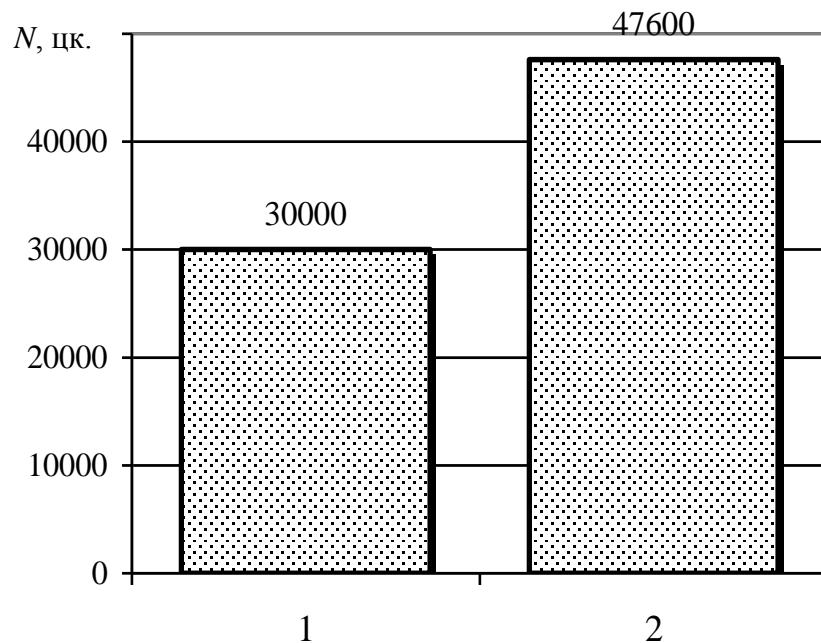


Рис. 5.7. Сравнительные данные усталостной долговечности (20 °С, 0,4 – 0,45 МПа): 1 – стандартный ЩМА-10; 2 – ЩМА-10 с комплексно-модифицированной структурой Elvaloy-AM.

В тоже время в горячем асфальтобетоне, соответствующего требованиям ДСТУ Б.В.2.7-119:2011 существует неоднородность по толщине слоя и недостаточная прочность адгезионно-когезионных контактов органического вяжущего с поверхностью минеральных материалов. Это обусловлено тем, что смачивание немодифицированным нефтяным битумом неактивированной поверхности мине-

ральных материалов невелика, вследствие гидрофильных свойств поверхности минеральных частиц, низкой дисперсности неактивированного минерального порошка и большой шероховатости поверхности. Это приводит к возмущению «слабых» коагуляционных связей, и как следствие, к неравномерности в загрузке молекул и надмолекулярных образований нефтяного дорожного битума, которые могут превышать средние напряжения в десятки и сотни раз.

При модификации же поверхности минерального порошка и всех минеральных компонентов (рис. 5.1 – 5.7) полимерами и, прежде всего, этиленглицидилакрилатом, содержащего функциональные группы разной степени полярности, осуществляется тонкое регулирование молекулярных свойств поверхности минеральных материалов. Это приводит к максимальному сближению ее по природе с битумополимерным вяжущим. При одновременном выходе на поверхность модифицированных минеральных материалов большого количества макромолекул и надмолекулярных образований битумополимерного вяжущего образованный адсорбционный слой заполняется плотно упакованными агрегатами и надмолекулярными образованиями. При этом битумополимерное вяжущее формирует на поверхности, прежде всего, активированного минерального порошка слои большей толщины, чем традиционные нефтяные дорожные битумы. Комплексная модификация структуры асфальтобетона приводит к повышению ее однородности, увеличению количества связей и повышению энергии активации разрыва межмолекулярных химических связей, о чем свидетельствуют данные рис. 5.1. – 5.7.

К сожалению, исследовать усталостную долговечность при воздействии более высоких температур ( $40^{\circ}\text{C}$ ,  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $60^{\circ}\text{C}$  и более) не предоставляется возможным, т.к. в данном случае сильное влияние оказывает собственный вес образца балочки, из-за которого значительно быстро накапливаются пластические деформации, поэтому определить количество циклов до разрушения с необходимой точностью затруднительно. Характеристикой, которая позволяет косвенно оценить прочность асфальтобетона при высоких положительных температурах является испытание по методике Маршалла на устойчивость, условную пластичность и условную жесткость (табл. 5.2) [131, 138].

Таблица 5.2

Значение показателей, характеризующих сдвигостойчивость бетонов  
(тип «Б») по Маршаллу (температура испытания 60 °C)

№ п/п	Состав асфальтобетонной смеси	Условная пластичность, $l / 10$ , мм	Устойчивость, $P$ , Н	Условная жесткость, $A$ , Н/мм
1	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип «Б»), приготовленная на битуме БНД 60/90; минеральный порошок – известняковый неактивирован.	46	15256	3316
2	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип «Б»), приготовленная на битумополимерном вяжущем (БНД 60/90 с 2,0 % бутадиенметилстирольного каучука СКМС-30 и 30 % технической серы); минеральный порошок – известняковый поверхностью активирован 0,5 % СКМС-30.	39	22981	5892
3	Мелкозернистая асфальтобетонная смесь (тип Б), приготовленная на битуме БНД 60/90, который модифицирован 2,0 % этиленглицидилакрилата в комбинации с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105; минеральные материалы поверхностью активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.	37	30000	8108
4	Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 60/90; минеральные компоненты поверхностью неактивированы.	46	12580	2735
5	Щебеночно-мастичная асфальтобетонная смесь, приготовленная на битуме БНД 60/90, который модифицирован 2,0 % этиленглицидилакрилата в комбинации с 0,2 % полифосфорной кислоты ПФК-105; минеральные материалы поверхностью активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.	42	20100	4786

На рис. 5.8 показано изменение количества циклов до разрушения в зависимости от периода «отдыха» (разгрузки) образца при испытании кратковременными циклическими нагрузками.

Из полученных данных очевидно, что асфальтобетон с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом выдерживает более чем в 2 раза циклов нагружения до разрушения по сравнению с горячим асфальтобетоном. Увеличение усталостной долговечности при повышении времени отдыха у модифицированного асфальтобетона свидетельствует о большей способности модифицированного асфальтовяжущего к эластической деформации, благодаря чему растягивающие переменные напряжения в паузе между нагрузкой снижаются и, следовательно, усталостные трещины развиваются менее интенсивнее, чем у горячего асфальтобетона типа «Б».

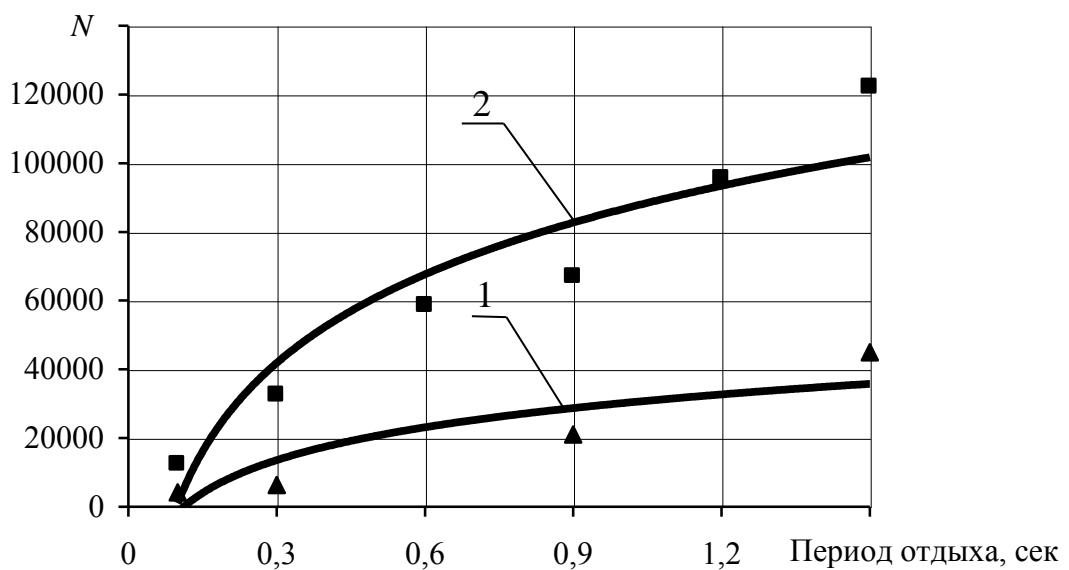


Рис. 5.8. Зависимость количества циклов до разрушения от периода отдыха при воздействии циклической нагрузки в 0,1 сек при температуре 20 °С: 1 – вяжущее в асфальтобетоне – нефтяной дорожный битум  $\Pi_{25} = 67$  град. шкалы пенетрометра; минеральный порошок известняковый не активирован; 2 – вяжущее в асфальтополимербетоне – нефтяной дорожный битум  $\Pi_{25} = 67$  град. шкалы пенетрометра модифицирован 2 % мас. Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105, минеральные компоненты активированы 0,7 % мас. Elvaloy-AM.

В доказательство этому была изучена связь между напряжением  $\sigma$  в мелкозернистом асфальтобетоне (тип «Б») и асфальтобетона с комплексно-модифицированной структурой Elvaloy-AM и деформацией  $\varepsilon$  при частоте деформирования 0,5 Гц и температуре 20 °C по результатам исследований [10, 131, 136] (рис. 5.9). Асфальтополимербетон с комплексно-модифицированной структурой этиленглицидилакрилатом характеризуется большей устойчивостью к возникновению пластических деформаций, по сравнению с традиционным горячим асфальтобетоном.

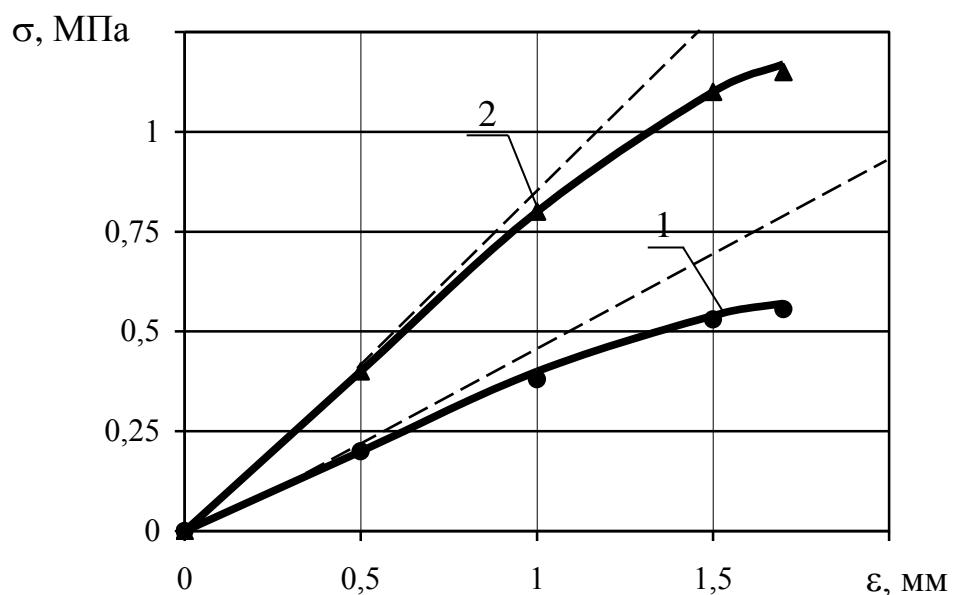


Рис. 5.9. Зависимость между напряжением ( $\sigma$ ) в мелкозернистом асфальтобетоне (тип «Б») и деформацией ( $\varepsilon$ ) при частоте деформирования 0,5 Гц и температуре 20 °C: 1 – вяжущее в асфальтобетоне – нефтяной дорожный битум  $P_{25} = 67$  град. шкалы пенетрометра; минеральный порошок известняковый не активирован; 2 – вяжущее в асфальтополимербетоне – нефтяной дорожный битум  $P_{25} = 67$  град. шкалы пенетрометра модифицирован 2 % мас. Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105, минеральные компоненты активированы 0,7 % мас. Elvaloy-AM.

Таким образом, основываясь на результатах испытаний динамическими и статическими нагрузками можно предположить, что область применения мелкозернистого асфальтобетона, с комплексно-модифицированной структурой эти-

ленглицидилакрилатом марки Elvaloy-AM достаточно обширна ввиду его высоких деформационно-прочностных показателей. Область применения литых асфальтобетонов относится преимущественно к скоростным горизонтальным участкам дорог (слои износа). Применение их на перекрестках и автобусных остановках приведет к постепенному накоплению различных сдвиговых дефектов в виде волн и колейности особенно в теплое время года. Покрытия из смесей ЩМА целесообразно устраивать на участках дорог где действуют преимущественно статические нагрузки от автотранспортных средств (остановки, развязки в одном уровне).

## **5.2. Влияние агрессивных сред на усталостную долговечность модифицированных асфальтобетонов**

Основной причиной снижения сроков службы асфальтобетонных покрытий дорог является возникновение деформаций и разрушений под действием механических напряжений от транспортных средств и агрессивных растворов (чаще всего антигололедных реагентов), что связано с недостаточной коррозионной устойчивостью применяемых асфальтобетонов. Асфальтобетон разрушается, главным образом, при длительном или периодическом увлажнении, а также в результате попеременного замораживания и оттаивания. Более разрушительное действие воды, замерзающей в порах асфальтобетона и увеличиваясь в объеме, она вызывает напряжения растяжения в стенках пор. Химическая стойкость асфальтобетонного покрытия в отношении агрессивных сред определяется способностью битума противостоять агрессивной среде, степенью водонасыщения и набухания в агрессивной среде, коэффициентом диффузии, характеризующим скорость проникновения среды в покрытие, устойчивостью к агрессивной среде минерального материала, сохранением прочностных свойств асфальтобетона [79, 143, 144].

Химические реагенты, находящиеся в воде, взаимодействуют с компонентами асфальтобетона, разрушая его структуру и снижая важнейшие показатели его технических свойств. Эти процессы происходят в результате увеличения ко-

личества полярных групп и растворимости отдельных компонентов битума, вызывая изменения в групповом составе органического вяжущего, либо за счет уменьшения краевого угла смачивания в дальнейшем происходит химическое взаимодействие и вымывание растворимых продуктов реакции карбоната кальция из тонкодисперсного известнякового наполнителя. Воздействие динамических нагрузок способствует еще большему раскрытию трещин. Это приведет к более интенсивному проникновению агрессивных сред внутрь структуры материала и тем самым значительно снизит усталостную долговечность асфальтобетона. В связи с этим представляет интерес изучение влияния агрессивных сред на усталостную долговечность обычных и модифицированных бетонов [144 – 147].

Из рис. 5.8 (нагрузка частотой в 1 Гц, напряжение – 0,4 – 0,45 МПа при температуре + 20 °C) следует, что водонасыщение негативно влияет на усталостную долговечность. Уменьшение количества циклов до разрушения у стандартного горячего асфальтобетона типа «Б» после 30 суток водонасыщения составляет более 30 %. Значительно более стойкими к водной среде оказались асфальтобетоны с комплексно-модифицированной структурой. Снижение количества циклов до разрушения асфальтобетона комплексно-модифицированного этиленглицидилакрилатом составило не более 10 %. Модифицированный литой асфальтобетон закономерно имеет большую стойкость к воздействию водонасыщения (снижение долговечности составило около 2 %). Это свидетельствует о том, что повышение содержания модифицированного вяжущего достаточно для закрытия всех пор на поверхности образца, что не дает водной среде проникнуть внутрь структуры материала [145].

На рис. 5.9 показано влияние количества циклов до разрушения (нагрузка частотой в 1 Гц, напряжение – 0,4 – 0,45 МПа при температуре + 20 °C) исследуемых асфальтобетонов после 20 циклов попаременного замораживания-оттаивания:

- 1) замораживание – в течение 12 ч при температуре минус 18 °C;
- 2) оттаивание (полное размораживание) – в течение 12 ч при комнатной температуре в воде с температурой 18 – 23 °C.

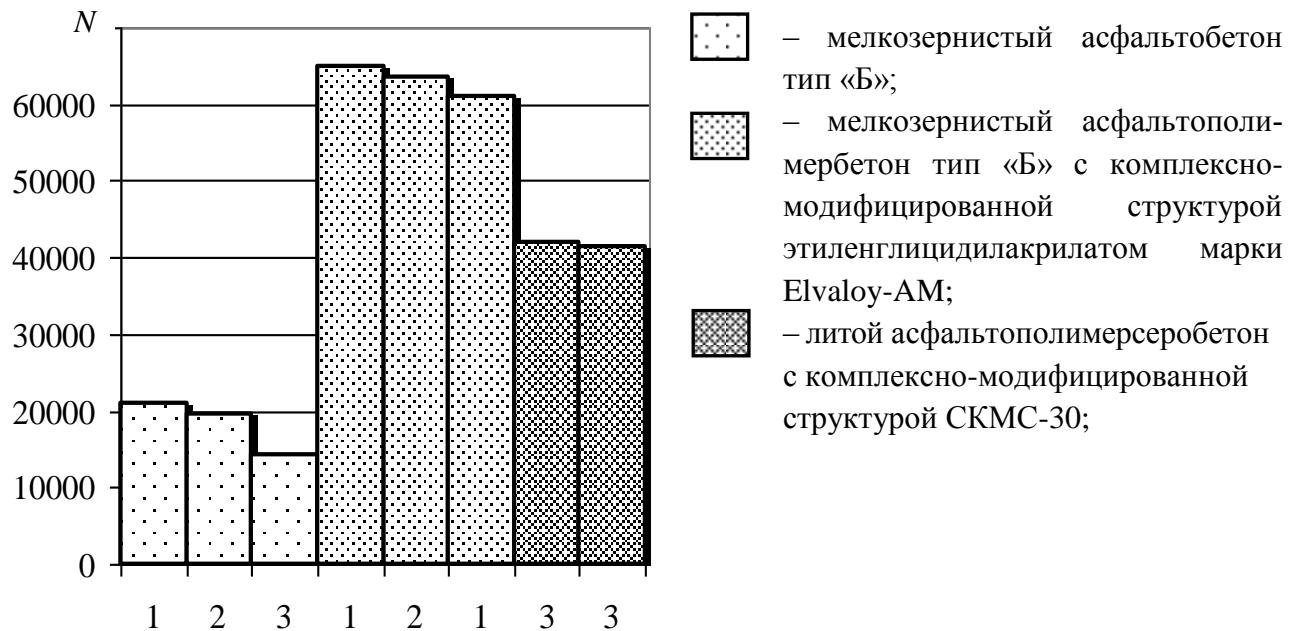


Рис. 5.8. Сравнение значений усталостной долговечности различных типов асфальтобетонов ( $N$ ) в зависимости от времени водонасыщения: 1 – без водонасыщения; 2 – после 15 суток водонасыщения; 2 – после 30 суток водонасыщения.

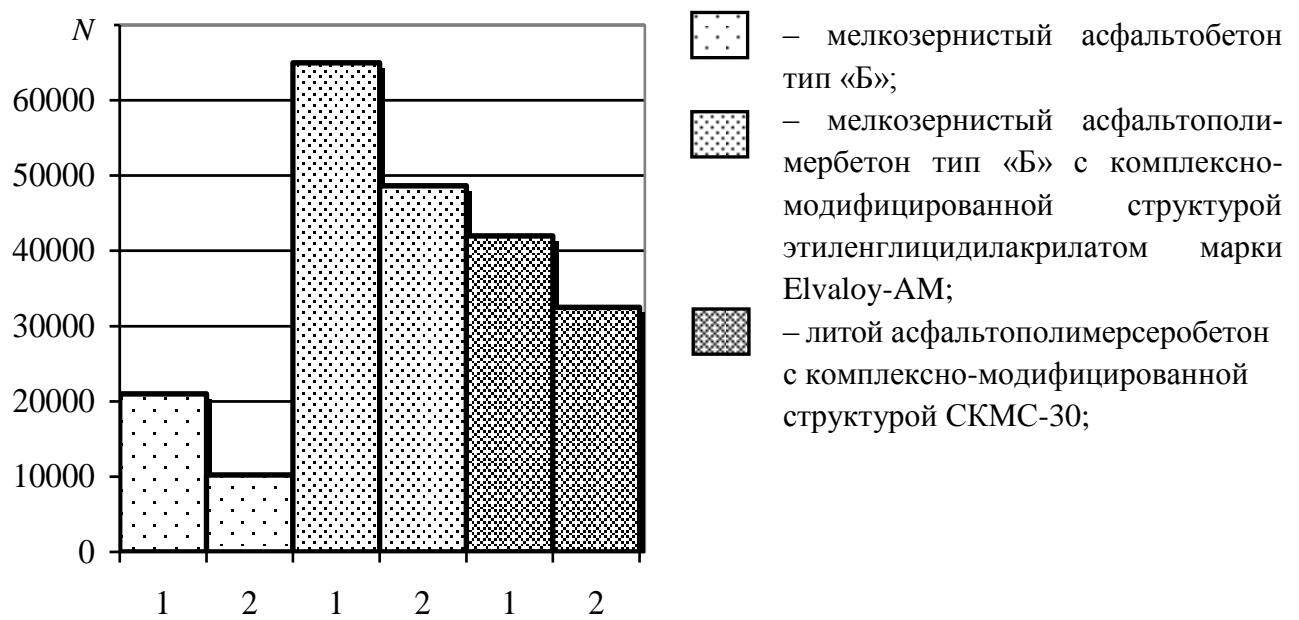


Рис. 5.9. Зависимость усталостной долговечности различных типов асфальтобетонов ( $N$ ) после попеременного замораживания-оттаивания: 1 – без замораживания-оттаивания; 2 – после 20 циклов замораживания-оттаивания.

После 20 циклов попеременного замораживания-оттаивания усталостная долговечность горячего асфальтобетона типа «Б» снизилась более чем на 50 %; долговечность асфальтобетона с комплексно-модифицированной структурой Elvaloy-AM снизилась на 25 %; комплексно-модифицированного литого асфальтобетона – на 20 %.

В качестве агрессивных химических сред, с целью исследования их влияния на долговечность асфальтобетона, были приняты: вода, 5 %-й раствор соли ( $\text{NaCl}$ ), 2 %-й раствор соляной кислоты ( $\text{HCl}$ ) в соответствии с исследованиями, выполненными под руководством проф. В. А. Золотарева в ХНАДУ [79, 143]. Результаты испытаний приведены на рис. 5.10.

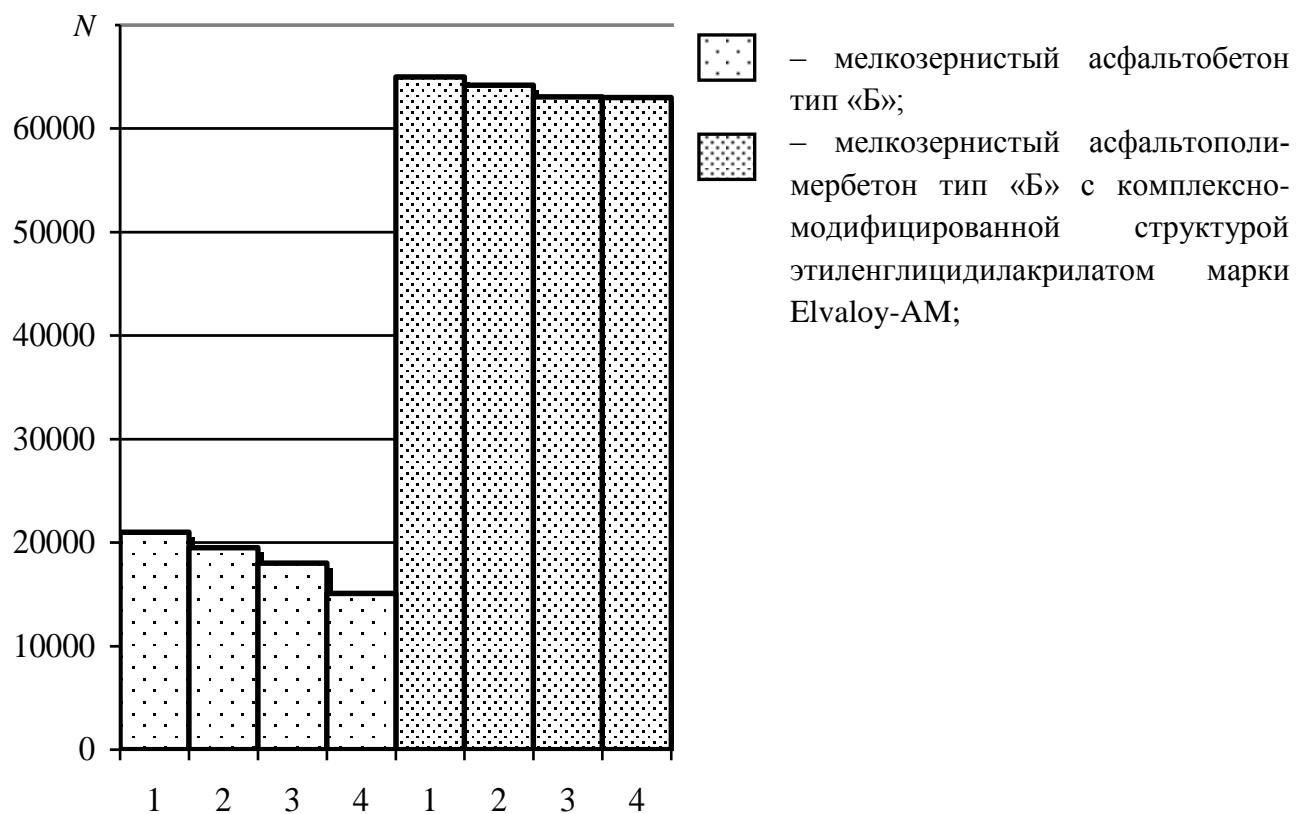


Рис. 5.10. Сравнение значений усталостной долговечности различных типов асфальтобетонов ( $N$ ) в зависимости от воздействия на них в течении 15 суток агрессивных сред: 1 – воздух; 2 – вода; 3 – водный раствор 5 %  $\text{NaCl}$ ; 4 – водный раствор 2 %  $\text{HCl}$ .

Хлориды, содержащиеся в растворах солей и кислот, способствуют более глубокому прониканию растворов в поры и микротрешины асфальтобетона, значительно ослабляя тем самым прочность коагуляционных контактов. При этом величина насыщения и набухания асфальтобетона раствором соли NaCl в 1,5 раз больше, чем водой. По этой причине усталостная долговечность мелкозернистого асфальтобетона после 15 суток выдерживания в водном растворе NaCl и HCl снижается на 15 – 20 % [146, 147].

Таким образом, асфальтобетоны с комплексно-модифицированной структурой характеризуются более высокой усталостной долговечностью при действии различных агрессивных сред.

### **5.3. Исследование влияния усталостной долговечности в зависимости от температуры производства асфальтобетонной смеси**

При производстве асфальтобетонных смесей необходимо обеспечить оптимальные температуры производства, т.к. при превышении температуры производства сверх нормативной в асфальтобетонной смеси развиваются процессы технологического старения органического вяжущего, что может негативно отразиться на усталостной долговечности асфальтобетона [148, 149].

Как следует из данных (табл. 5.3) повышение температуры производства асфальтобетонной смеси приводит к росту предела прочности на растяжение при изгибе  $R_{uz}$  при 20 °C. Это обусловлено тем, что действие высоких температур способствует интенсификации процессов окисления, которое приводит к химическому изменению компонентов битума с образованием новых более высокомолекулярных органических соединений и испарению масел, входящих в состав битумов, что способствует увеличению его вязкости. В то же время, горячие мелкозернистые асфальтобетоны, приготовленные при повышенных температурах (165 °C и выше) характеризуются более низкой усталостной долговечностью. Рост вязкости органического вяжущего, вследствие процессов старения, приводит к увеличению концентрации пор и пустот внутри структуры материала, и как

следствие, происходит рост числа очагов концентрации критических напряжений при действии динамических нагрузок [149 – 151].

Таблица 5.3

Результаты испытаний асфальтобетонных образцов, изготовленных из горячей мелкозернистой асфальтобетонной смеси типа «Б», приготовленной при различных технологических температурах

Температура производства смеси, °C	$R_{uzg}$ , МПа	$N \cdot 10^4$ , цк
150	1,1	2,34
165	1,1	2,3
180	1,3	1,95

По данным табл. 5.1 построены сравнительные диаграммы (рис. 5.11, 5.12).

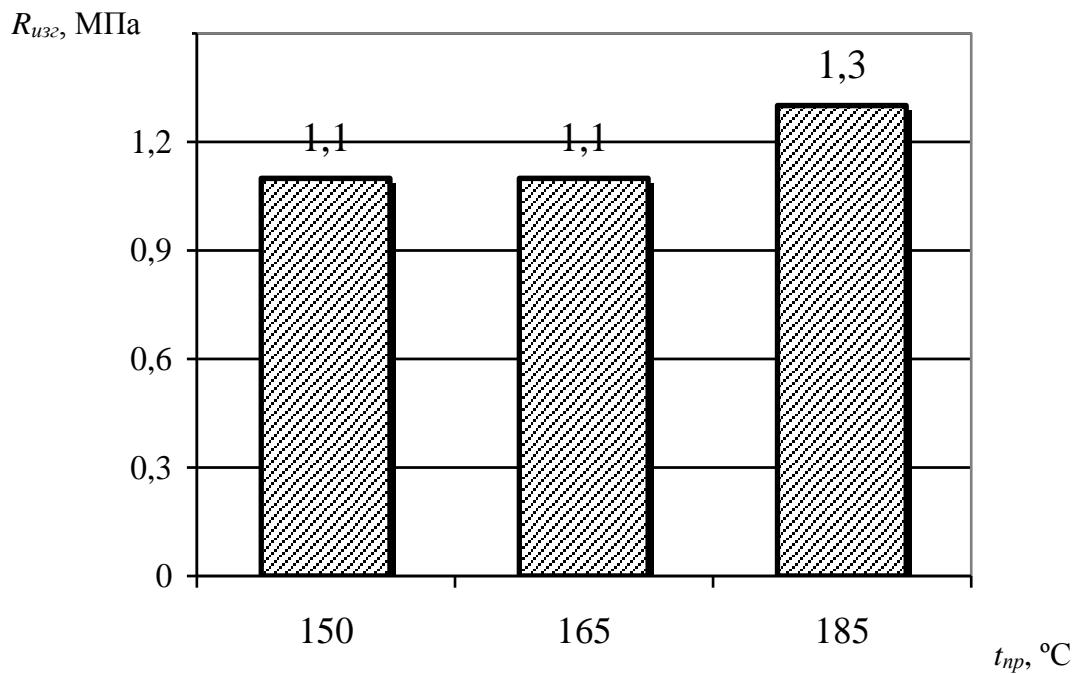


Рис. 5.11. Зависимость предела прочности на растяжение при изгибе ( $R_{uzg}$ ) при 20 °C горячего мелкозернистого асфальтобетона типа «Б» от температуры производства асфальтобетонной смеси ( $t_{np}$ ).

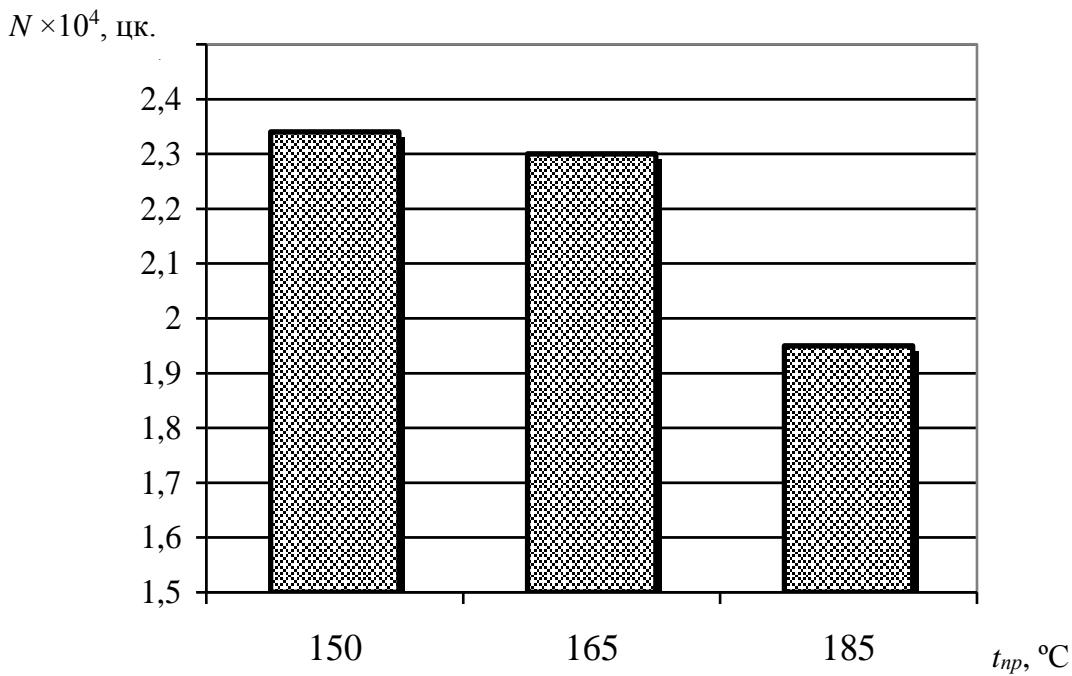


Рис. 5.12. Зависимость количества циклов ( $N$ ) до усталостного разрушения горячего мелкозернистого асфальтобетона типа «Б» от температуры производства асфальтобетонной смеси ( $t_{np}$ ).

Результаты испытания асфальтобетонных образцов, изготовленных из асфальтобетонной смеси, прошедшей технологические этапы приведены в табл. 5.4.

Таблица 5.4

Результаты испытания асфальтобетонных образцов, изготовленных из асфальтобетонной смеси, прошедшей следующие технологические этапы

Технологические этапы	$R_{cyc}^0, \text{ МПа}$	$R_{cyc}^{20}, \text{ МПа}$	$R_{pack}, \text{ МПа}$	$R_{uzg}, \text{ МПа}$	$N \cdot 10^3, \text{ цк}$
Исходная смесь (А)	8,24	5,85	4,31	1,31	31
Хранение в термосбункере (Б) 2 ч 45 мин, 165°C	8,93	6,16	4,37	1,64	30
Транспортирование (В) 1 ч 30 мин, 165 – 131°C	9,45	6,27	4,53	1,92	27,7

Как свидетельствуют результаты исследований (табл. 5.2), усталостная долговечность асфальтобетона понижается уже на стадиях транспортировки, укладки и уплотнения смеси.

## **Выводы по разделу 5:**

1. Установлено, что при различных температурах испытания усталостная долговечность асфальтобетонов с комплексно-модифицированной структурой значительно выше, по сравнению с обычными асфальтобетонами. Рост усталостной выносливости в 1,5 – 2 раза наблюдается у асфальтобетона, в котором «битум модифицирован 2,0 % мас. этиленглицидилакрилатом марки Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105, а минеральные материалы, поверхностно активированы 0,7 % мас. Elvaloy-AM» и в 1,1 – 1,5 раз у литого асфальтополимербетона, в котором битум, модифицирован 2,0 % мас. бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 + 30 % технической серы, минеральный порошок, поверхностно активирован 0,5 % мас. СКМС-30».

2. Установлены коэффициенты усталостной долговечности ( $m$ ) при динамическом нагружении для каждого типа асфальтобетона в зависимости от температуры испытания. Асфальтобетоны с комплексно-модифицированной структурой характеризуются в 1,1 – 1,4 раз меньшими ми коэффициента усталостной долговечности ( $m$ ), что свидетельствует о их более высокой усталостной долговечности.

3. Исследована долговечность асфальтобетонов при воздействии статического нагружения. Установлено, что асфальтобетоны с комплексно-модифицированной структурой имеют также повышенную (в 1,5 раза) усталостную долговечность.

4. Исследована связь между напряжением ( $\sigma$ ) в мелкозернистом асфальтобетоне (тип «Б») и асфальтобетоне с комплексно-модифицированной структурой Elvaloy-AM и деформацией ( $\varepsilon$ ) при частоте деформирования 0,5 Гц и температуре 20°C. Установлено, что комплексно-модифицированный асфальтобетон имеет большую устойчивость к возникновению пластических деформаций.

5. Исследована долговечность асфальтобетонов при воздействии различных агрессивных сред (водной среды, попаременного замораживания-оттаивания, растворов солей и кислот). Установлено, что наиболее стойким асфальтобетоном к воздействию агрессивных сред является модифицированный литой асфальтобетон (снижение долговечности в водной среде составило всего 2 %).

6. Установлено, что усталостная долговечность асфальтобетона понижается уже на стадиях транспортирования, укладки и уплотнения смеси.

## РАЗДЕЛ 6

### ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

#### 6.1 Рекомендации по производству и применению модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности

ДОНБАССКАЯ НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА  
И АРХИТЕКТУРЫ

**СОГЛАСОВАНО:**

Председатель правления  
ПАО «Облдорремстрой»

С. В. Григалашвили  
  
 «21» 05 2015 г.

**УТВЕРЖДАЮ:**

Проректор по научной работе  
ДонНАСА, д.т.н., профессор

В. Ф. Мущанов  
  
 «19» 05 2015 г.

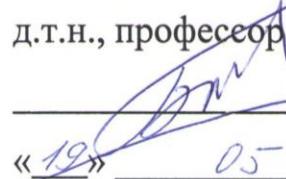
**РЕКОМЕНДАЦИИ**

по производству и применению модифицированных асфальтобетонов  
повышенной усталостной долговечности

**РАЗРАБОТАНО:**

Научный руководитель:

д.т.н., профессор

В. И. Братчун  
  
 «19» 05 2015 г.

Аспирант кафедры «Автомобильные  
дороги и аэродромы» ДонНАСА

  
 Е. А. Ромасюк  
 «19» 05 2015 г.

**СОДЕРЖАНИЕ**

<b>ПРЕДИСЛОВИЕ .....</b>	<b>142</b>
6.1.1 Общие положения .....	144
6.1.2 Технология производства асфальтополимербетонных смесей содержащих битум, модифицированный этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой и минеральные материалы поверхности активиро-ванные этиленглицидилакрилатом.....	144
6.1.3 Технические требования и область применения модифицированных асфальтополимербетонов .....	148
6.1.4 Технический контроль.....	148
6.1.5 Требования по технике безопасности .....	149

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Погодно-климатические условия и интенсивные транспортные нагрузки приводят к накоплению необратимых пластических деформаций. Характерными деформациями асфальтобетонных покрытий, эксплуатируемых в Донецкой области, являются: наплывы, колеи, усталостно-отраженные трещины. Это обусловлено высокой интенсивностью движения автотранспортных средств, достигающих более 15000 авт/сутки, а также большой доли в потоке большегрузных автомобилей, автомобильных поездов, автобусов. Нагрузки на ось колеса автомобилей достигают от 80 до 110 кН.

Расчетный срок службы покрытий магистральных асфальтобетонных дорог 1а и 1б технических категорий до капитального ремонта (10 – 12 лет) в условиях климата в Донецкой области и высокой грузонапряженности не выдерживаются. После пяти лет эксплуатации они нуждаются в капитальном ремонте.

Свойства асфальтобетонов определяются, прежде всего, качеством органического вяжущего и энергией взаимодействия на поверхности раздела фаз «битум – минеральный материал». Необходимо отметить, что вязкие нефтяные дорожные битумы, используемые в Украине и России для производства горячих асфальтобетонных смесей, характеризуются высокими температурами перехода в упруго-хрупкое состояние, невысокими температурами текучести, а также неудовлетворительными адгезионно-когезионными свойствами адсорбционно-сольватных слоев на поверхности минеральных материалов.

Одним из эффективных способов регулирования адгезионно-когезионных свойств органических вяжущих, обеспечивающих прочную связь на поверхности раздела фаз «нефтяной дорожный битум – минеральный материал», является комплексная модификация, как органического вяжущего, так и минеральных компонентов структурообразующих макро-, мезо- и микроструктуры асфальтобетонов, а именно одновременным воздействием на дисперсионную среду (смолисто-масляная часть битумов) нефтяного битума этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой и поверхности щебня, песка и минерального

порошка активацией их этиленглицидилакрилатом из раствора в углеводородах.

Модифицированные асфальтополимербетонные смеси обладают повышенной удобоукладываемостью и уплотняемостью в более широком диапазоне температур, чем горячие асфальтобетонные смеси (ДСТУ Б В 2.7-119:2011) [105, 136]. Это позволяет увеличить дальность транспортирования асфальтополимербетонных смесей и расширить сроки строительного сезона на 20 – 30 %.

Разработанные составы модифицированных асфальтополимербетонов характеризуются более высокой атмосферостойкостью, сдвигостойчивостью и усталостной прочностью, чем асфальтобетоны, представленные в ДСТУ Б В 2.7-119:2011.

В «Рекомендациях» изложены требования к материалам, параметрам режимов технологического процесса производства, модифицированных этиленглицидилакрилатом асфальтополимербетонных смесей с комплексно-модифицированной макро-, мезо- и микроструктурой; указаны технологические режимы производства, укладки и уплотнения модифицированных асфальтополимербетонных смесей в верхние конструктивные слои дорожной одежды.

### **6.1.1 Общие положения**

- Модифицированный асфальтополимербетон – это искусственный строительный материал, получаемый уплотнением (коэффициент уплотнения не менее  $K_y = 0,99$ ), перемешанной до однородного состояния (коэффициент вариации однородности, найденный по содержанию ключевого компонента, должен быть не более,  $K_e < 7 \%$ ) при температуре 150 – 160 °С смеси битумополимерного вяжущего (битум БНД 60/90 модифицирован 2,0 % мас. этиленглицидилакрилата в комплексе с полифосфорной кислотой ПФК-105 (0,2 % от мас.) и поверхностно активированных 0,7% мас. этиленглицидилакрилата щебня,нского песка и минерального порошка.
- Этиленглицидилакрилат применяется в виде дисперсии гранул белого цвета диаметром  $(1 – 3) \cdot 10^{-3}$  и должен отвечать требованиям сертификата качества концерна – производителя «DUPON» США.
- Для производства битумополимерных вяжущих применяют нефтяные дорожные битумы марок БНД 40/60 и БНД 60/90, которые должны отвечать требованиям ДСТУ 4044-2001.
- Минеральные материалы, предназначенные для производства асфальтополимербетонных смесей, должны соответствовать требованиям ДСТУ Б В.2.7-75-98, ДСТУ Б В.2.7-32-92, ДСТУ Б В.2.7-121-2003. Зерновой состав минеральной части асфальтобетонных смесей должен соответствовать требованиям ДСТУ Б В.2.7-119:2011.

### **6.1.2 Технология производства асфальтополимербетонных смесей содержащих битум, модифицированный этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой и минеральные материалы поверхностью активированые этиленглицидилакрилатом**

Для производства модифицированных асфальтополимербетонных смесей асфальтобетонный завод (АБЗ) дооборудуют технологическими линиями по производству битумополимерного вяжущего (БПВ) и поверхностно активированного минерального порошка (рис. 6.1). Щебень и искусственный песок поверхностью активируют в карьерах, производящих эти материалы.

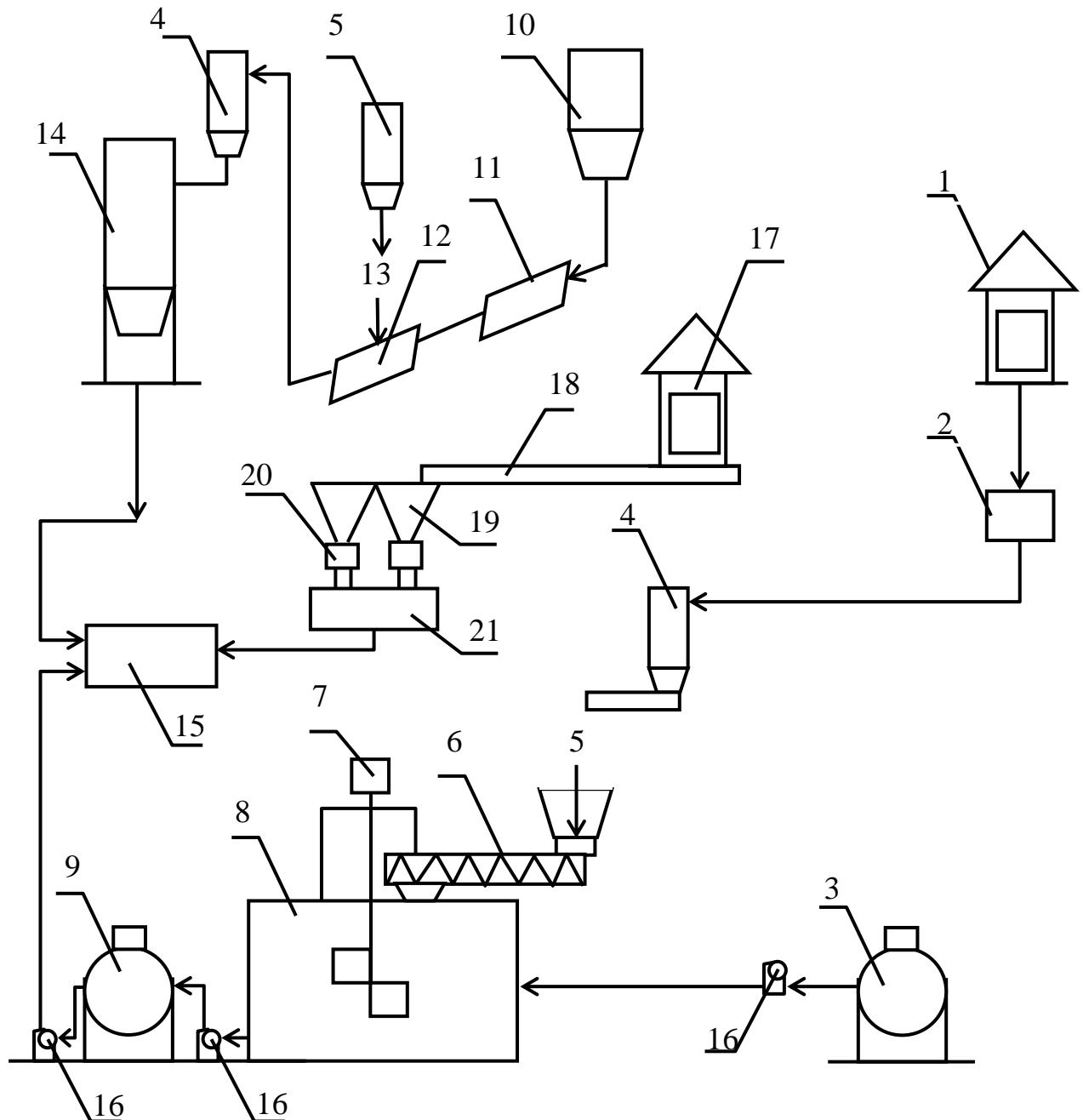


Рис. 6.1. Принципиальная технологическая схема производства модифицированной асфальтополимербетонной смеси, которая содержит поверхностно активированные щебень, песок, минеральный порошок и битумополимерное вяжущее: 1 – склад этиленглицидилакрилата; 2 – камерный насос; 3 – емкость с раствором полифосфорной кислоты ПФК-105; 4 – циклон; 5 – бункер для межоперационного хранения этиленглицидилакрилата; 6 – шнековый питатель; 7 – мешалка; 8 – битумоварочный котёл приготовления битумополимерного вяжущего; 9 – расходный котёл битумополимерного вяжущего; 10 – бункер для межоперационного складирования известнякового песка; 11 – сушильный барабан; 12 – шаровая мельница; 13 – дозатор раствора этиленглицидилакрилата; 14 – силосный склад активированного минерального порошка; 15 – асфальтосмеситель; 16 – битумонасос; 17 – склад щебня и песка; 18 – ленточный конвейер; 19 – бункера межоперационного складирования щебня и песка; 20 – дозаторы; 21 – смеситель перемешивания щебня и песка с раствором этиленглицидилакрилата.

При производстве БПВ завод дооборудуют закрытым складом для хранения в мешках гранулированного этиленглицидилакрилата (1), весовыми дозаторами для дозирования этиленглицидилакрилата (АВДу-425, АВДу-425Ф); шнековым питателем (6) для подачи терполимера в битумоварочный котел для производства битумополимерного вяжущего. Котел, например, Д-506, должен быть оборудован вертикально установленной мешалкой (7) пропеллерного или лопастного типов (мощность двигателя при емкости битумоварочного котла 12 – 15 т не менее 25 кВт). Параметры мешалки (число оборотов и геометрические размеры лопастей) должны обеспечивать турбулентность потока в месте введения полимера при температурах 160 – 165°C.

Рекомендуемое число оборотов ( $n$ ) лопастной мешалки в месте введения полимера при длине ( $\ell$ ) лопастей мешалки следующие:

$$\begin{aligned} \ell = 0,2 \text{ м} & \quad n = 300 \text{ об/мин}; \quad \ell = 0,3 \text{ м} & \quad n = 140 \text{ об/мин}; \\ \ell = 0,4 \text{ м} & \quad n = 100 \text{ об/мин}; \quad \ell = 0,5 \text{ м} & \quad n = 60 \text{ об/мин}. \end{aligned}$$

Крышку котла дооборудуют небольшими герметично закрывающимися клапанами, служащими для замера уровня БПВ рейками и для отбора проб.

Технология производства БПВ заключается в следующем.

- Обезвоживание нефтяного дорожного битума при температуре 105 – 110 °С. Перекачивание битума в битумоварочный котел (8), оборудованный мешалкой.
- Подогрев битума до температуры 165 – 170 °С. Введение раствора этиленглицидилакрилата в битум.
- Концентрация этиленглицидилакрилата в битуме должна быть 2,0 % по массе.
- Продолжительность перемешивания битумополимерного вяжущего при температуре 165 – 170 °С один час.
- Введение в битумополимерное вяжущее полифосфорной кислоты ПФК-105 в количестве 0,2 % от массы битума по линии 3 – 16 – 1. Перемешивание композиции «битумополимерное вяжущее – полифосфорная кислота ПФК-105» 30 минут.
- Перекачивание битумополимерного вяжущего в расходный битумова-

рочный котел (9).

– При приготовлении поверхности активированных минеральных порошков завод дооборудуют сушильным барабаном (11), мельницей (12), силосом для складирования активированного этиленглицидилакрилатом минерального порошка (14) (рис. 6.1).

– Известняковый песок просушивается в сушильном барабане и подаётся в шаровую мельницу (12), в которой объединяется с активатором (массовая концентрация этиленглицидилакрилата на поверхности минерального порошка – 0,7% мас.). В шаровой мельнице известняковый песок измельчается до требуемой тонкости помола (100% частиц проходят сквозь сито № 0071). Поверхностно активированный минеральный порошок направляется в силос (14, рис. 6.1).

Таблица 6.1

**Список оборудования необходимого для организации участка  
по производству активированных минеральных порошков**

Наименование	Индекс	Кол-во	Завод-изготовитель
1. Мельница	СММ 206.3	1 шт. 50 т/ч	«Волгомехмаш»
2. Ленточный конвейер	ТК-11А (С-1002А)	1 шт.	Орловский завод строительных машин
3. Дозаторы	СБ-26А	3 шт. ВПП 39 т/ч НПП 7,5 т/ч	Киевский машзавод
4. Пневматический винтовой насос	ТА-14А (С-991А)	2 шт. 36 т/ч	Завод строительных машин (г. Санкт - Петербург)
5. Отсасывающий вентилятор	В-Ц-14-46-2	1 шт.	Крюковский вентиляторный завод
6. Элеватор ковшовый	СМЦ-130А	1 шт. 550 м <sup>3</sup> /ч	
7. Фильтр рукавный всасывающий	СМЦ-705	1 шт. 1250-1500 м/ч	Киевский машзавод
8. Расходные бункера, V = 5 м <sup>3</sup>	Нестандартизированное оборудование	3 шт.	

### **6.1.3 Технические требования и область применения модифицированных асфальтополимербетонов**

- Модифицированные асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированными макро-, мезо- и микроструктурой с использованием реакционноспособного этиленглицидилакрилата и полифосфорной кислоты ПФК-105 и поверхностно активированными этиленглицидилакрилатом минеральными материалами по показателям качества должны соответствовать требованиям для горячего асфальтобетона (ДСТУ Б.В.2.7-119:2011).
- Асфальтополимербетонные смеси следует применять для устройства верхних слоев покрытий автомобильных дорог I – II технических категорий.
- Асфальтополимербетонные смеси приготавливаются только в асфальто-смесителях, оборудованных лопастными мешалками с принудительным перемешиванием (AMMANN GLOBAL 160 версии QUICK, ДС - 168637 производительностью 160 т/ч, Кредмаш), в соответствии с режимами перемешивания, применяемыми для горячих асфальтобетонных смесей. Температура нагрева минеральных материалов и битумополимерных вяжущих 150 – 155 °C.
- Температура асфальтополимербетонных смесей при выпуске из смесителя должна быть в пределах 150 – 155 °C.
- Уплотнение асфальтополимербетонных смесей необходимо вести в интервале температур 70 – 140 °C.

### **6.1.4 Технический контроль**

- Этиленглицидилакрилат, полифосфорная кислота и нефтяные дорожные битумы принимают по паспортным данным завода-поставщика.
- Качество минеральных материалов (щебня, песка и минерального порошка) должно соответствовать требованиям ДСТУ Б В.2.7-75-98, ДСТУ Б В.2.7-32-92, ДСТУ Б В.2.7-121-2003.
- Процесс приготовления битумополимерных вяжущих ведётся с осуществлением контроля за температурно-временным режимом производства и концентрационными соотношениями «битум – этиленглицидилакрилат – поли-

фосфорная кислота ПФК-105».

– Основными контрольными испытаниями модифицированных вяжущих являются определение пенетрации, растяжимости и эластичности при 0°C, температур размягчения и хрупкости.

– В процессе производства модифицированных этиленглицидилакрилатом асфальтополимербетонных смесей контролируют: температуру нагрева минеральных материалов, температуру модифицированного органического вяжущего в котлах каждые 2 – 3 ч и температуру асфальтополимербетонных смесей.

– При устройстве покрытия проверяют температуру асфальтополимербетонной смеси в каждой машине, привозящей смесь на место укладки; толщину уложенного слоя; качество уплотнения и качество швов в местах сопряжения полос.

### **6.1.5 Требования по технике безопасности**

При производстве и применении модифицированных этиленглицидилакрилатом асфальтополимербетонных смесей должны соблюдаться требования, предусмотренные «Правилами техники безопасности при строительстве, ремонте и содержании автомобильных дорог» (М.: Транспорт, 1978), а также ВСН 123-77).

## **Выводы по разделу 6**

По результатам исследования разработаны «Рекомендации по производству и применению модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности». Определена предполагаемая экономическая эффективность от внедрения 1 т асфальтополимербетонов повышенной усталостной долговечности, которая составит 691,70 руб. (см. Приложения Б, В).

## ВЫВОДЫ

1. Теоретически и экспериментально доказано, что эффективным способом получения дорожных асфальтобетонов характеризующихся повышенной усталостной долговечностью при воздействии кратковременных циклических и статических нагрузок является комплексная модификация нефтяного дорожного битума этиленглицидилакрилатом в комбинации с полифосфорной кислотой и поверхностная активация щебня, искусственного песка и минерального порошка этиленглицидилакрилатом, а также комплексная модификация нефтяного дорожного битума бутадиенметилстирольным каучуком в комбинации с технической серой и поверхностной активацией минерального порошка каучуком.

2. Введение в битумы полимерных добавок и активация поверхности минерального порошка растворами полимеров позволяет повысить деформативность асфальтовяжущего при отрицательных температурах. Установлено, что наибольшее снижение температуры хрупкости (на 4 – 6 °С) наблюдается у асфальтовяжущих с комплексно-модифицированной структурой, представленной системами «битум – МП, активированный раствором СКМС-30», «битум – СКМС-30 – техническая сера – МП, активированный раствором СКМС-30» и «битум – этиленглицидилакрилат марки Elvaloy-AM – МП, активированный этиленглицидилакрилатом марки Elvaloy-AM». Установлено, что оптимальное количественное соотношение МП в битуме находится в пределах от 75 % до 100 – 125 %.

3. Комплексная модификация микроструктуры этиленглицидилакрилатом Elvaloy-AM, бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30, термоэластопластом Kraton D 1101 позволяет повысить основные физические и деформационно-прочностные свойства асфальтовяжущих, благодаря чему предел прочности при сжатии повышается в 1,1 – 1,9 раз. Установлено, что оптимальная концентрация битума в асфальтовяжущих находится в пределах от 13 – 14 % до 15 – 16 % и зависит от вязкости битума или битумополимерного вяжущего, а также от степени структурированности минеральным порошком органического вяжущего.

4. С использованием метода экспериментально-статистического моделирования определена оптимальная концентрация этиленглицидилакрилата марки Elvaloy-AM на

поверхности известнякового минерального порошка 0,65 – 0,7 %. Определена оптимальная концентрация этиленглицидилакрилата (0,7 % мас.) на поверхности минеральных материалов (щебня, песка и минерального порошка) при объединении с нефтяным дорожным битумом, который модифицирован этиленглицидилакрилатом (2,0 % мас.) в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-105 (0,2 % мас.).

5. Установлено, что при различных температурах испытания усталостная долговечность асфальтобетонов с комплексно-модифицированной структурой значительно выше, по сравнению с обычными асфальтобетонами. Повышение усталостной долговечности в 1,5 – 2 раза наблюдается у асфальтобетона в котором битум модифицирован 2,0 % мас. этиленглицидилакрилатом марки Elvaloy-AM + 0,2 % ПФК-105, а минеральные материалы поверхностью активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата марки Elvaloy-AM» и в 1,1 – 1,5 раз у комплексно-модифицированного литого асфальтобетона, в котором битум модифицирован 2,0 % мас. бутадиенметилстирольным каучуком СКМС-30 + 30 % технической серы, а минеральный порошок поверхностью активирован 0,5 % мас. СКМС-30».

6. Исследована усталостная долговечность асфальтобетонов при воздействии различных агрессивных сред (вода, растворы солей и кислот). Наиболее устойчивым к воздействию агрессивных сред является литой асфальтобетон с комплексно-модифицированной структурой бутадиенметилстирольным каучуком и технической серой. Установлено, что усталостная долговечность асфальтобетона понижается на стадиях транспортирования смеси, укладки и уплотнения смеси.

7. По результатам исследований для ПАО «Донецкоблдорремстрой» разработаны «Рекомендации по производству и применению модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности». Определена предполагаемая экономическая эффективность от внедрения 1 т асфальтополимербетонов повышенной усталостной долговечности, которая составит 691,70 руб. Результаты исследований внедрены в учебный процесс при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилю «Автомобильные дороги» в дисциплинах «Строительное материаловедение» и «Физико-химическая механика строительных материалов».

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Транспортна політика України та її наближення до норм Європейського Союзу / [Сирийчик Т., Фургалські А., Клімкевич Ч., Камола М., та ін.] / за ред. Марчіна Свєнчіцкі. – К.: Аналітично-дорадчий центр Блакитної стрічки, 2010. – 102 с.
2. Ладыгин Б. И. Прочность и долговечность асфальтобетонов / Б. И. Ладыгин, И. К. Яцевич. – Минск: Наука и техника, 1972. – 288 с.
3. Рыбьев И. А. Строительные материалы на основе органических вяжущих веществ / И. А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1978. – 309 с.
4. Золотарев В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. – Харьков: Вища школа, 1977 – 116 с.
5. Руденский А. В. Дорожные асфальтобетонные покрытия / А. В. Руденский. – М.: Транспорт, 1992. – 254 с.
6. 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.
7. Дорожный асфальтобетон / Гезенцвей Л. Б., Горелышев Н. В., Богуславский А. М., Королев И. В.. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.
8. Золотарев В. А. Перспективы повышения долговечности асфальтобетона / В. А. Золотарев // Автомобильный транспорт и дорожное хозяйство на рубеже 3-го тысячелетия: Материалы международной научной конференции. – Харьков: ХГАДТУ, 2000. – С. 58–61.
9. Гончаренко Ф. П. Результати наукових досліджень ДержДорНДУ та аналіз практичного досвіду забезпечення якості асфальтобетону та асфальтобетонних покрівель / Ф. П. Гончаренко // Вестник Харківського національного автомобільно-дорожнього університета. – Харьков: 2002. – № 19. – С.101–104.
10. Лапченко А. С. Реологические свойства асфальтополимербетонов при

- динамическом воздействии: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / А. С. Лапченко. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 231 с.
11. Онищенко А. М. Підвищення довговічності асфальтобетонних шарів за рахунок використання полімерних латексів: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / А. М. Онищенко. – К.: НТУ, 2008. – 229 с.
  12. Братчун В. И. Повышение долговечности бетонов на органических вяжущих регулированием свойств микроструктуры / В. И. Братчун // Вестник Харьковского автомобильно-дорожного технического университета. – Харьков, 2000 – № 12–13. – С. 141–144.
  13. Золотарев В. А. Модифицированные битумные вяжущие, специальные битумы с добавками в дорожном строительстве. / В. А. Золотарев, В. И. Братчун. // Всемирная дорожная ассоциация. Технический комитет «Нежесткие дороги» (S8). – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 229 с.
  14. Иванськи М. Основы улучшения и регулирования эксплуатационных свойств асфальтобетона: дис. ... доктора тех. наук: 05.23.05, 05.23.11 / М. Иванськи. – М., 2004. – 541 с.
  15. Руденская И. М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – М: Транспорт, 1984. – 229 с.
  16. Бахрах Г. С. Об оценке выносливости дорожных асфальтобетонных покрытий / Г. С. Бахрах // Труды ГипроДорНИИ. – М.: 1980. – С. 57–65.
  17. Гезенцвей Л. Б. Асфальтовый бетон / Л. Б. Гезенцвей. – М.: Стройиздат, 1964. – 477 с.
  18. Иванов Н. Н. Причины образования трещин в асфальтобетонных покрытиях / Н. Н. Иванов. // Сборник научных трудов МАДИ. – М.: МАДИ, 1953. – № 23. – С. 3 –11.
  19. Иванов Н. Н. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд / Н. Н. Иванов. – М.: Транспорт, 1973. – 328 с.
  20. Руденский А. В. Исследование усталости асфальтобетона / А. В. Руденский, Т. Н. Калашникова // Труды ГипроДорНИИ. – М., 1973. – № 7. – С. 3 – 13.
  21. Илиополов С. К. Усталостное разрушение асфальтобетона в широком

- частотном диапазоне / С. К. Илиополов, Е. В. Углова, О. В. Дровалева // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ, 2007. – № 17 (1). – С. 245–251.
22. Илиополов С. К. Динамика дорожных конструкций / Илиополов С. К., М. Г. Селезнев, Е. В. Углова. – Ростов-на-Дону, 2002. – 258 с.
  23. Телтаев Б. Б. Характеристики деформирования асфальтобетонного покрытия автомобильных дорог / Б. Б. Телтаев. // Дорожная техника. – СПб, 2011. – С. 88 – 100.
  24. Кривисский А. М. Принципы назначения конструкций одежд нежесткого дорожного типа на магистральных автомобильных дорогах: дис. ... д-ра. тех. наук / А. М. Кривисский. – Ленинград, 1962. – 420 с.
  25. Смирнов В. М. Определение усталостной прочности материалов монолитных слоев дорожных одежд / В. М. Смирнов // Труды Союздорнии. – М., 1990. – С. 110 – 115.
  26. Углова Е. В. Теоретические и методологические основы оценки остаточного усталостного ресурса асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог дис. ... доктора тех. наук: 05.23.11 / Е. В. Углова. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009. – 350 с.
  27. Hveen F. N. Pavement deflections and fatigue failures / F. N. Hveen // Highway Research Board Bulletin 114. – California, 1955. – P. 47–73.
  28. Mohismith C. L. Improved Asphalt Mix Design / C. L. Mohismith, J. A. Epps, F. N. Finn // Asphalt Pavement Technology. Volume 54, 1985. – p. 347 – 406.
  29. Summary Report On Fatigue Response of Asphalt Mixtures / S. C. S. Rao Tangel-la, J. Craus, J. A. Deacon, C. L. Mohismith. – Berkeley: Institute of Transportation Studies University of California, 1990. – 158 p.
  30. Pell P. S. The Effect of Testing and Mix Variables on the Fatigue Performance of Bituminous Materials / P. S. Pell, K. E. Cooper // Journal of the Association of Asphalt Paving Technologists, Volume 44, 1975. – p.1–37.
  31. Francisco Thiago S. A. Research on Fatigue of Asphalt Mixtures and Pavements in Nebraska / Francisco Thiago S. Aragão, Yong-Rak Kim, Junghun Lee. – Nebraska: Department of Civil Engineering College of Engineering, 2008 – 59 p.

32. Shaw P. S. Stress-Strain Relationships for Granular Materials under Repeated Loading. / P. S. Shaw. – PhD Thesis. Department of Civil Engineering. University of Nottingham, 1980. – p.120.
33. Николенко М. А. Учет особенностей нагружения полос движения автомагистралей при проектировании дорожных одежд: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.11 / М. А. Николенко. – Ростов-на-Дону, 2006. – 185 с.
34. Бонченко Г. А. Асфальтобетон: сдвигустойчивость и технология модификации полимером / Г. А. Бонченко. – М.: Машиностроение, 1994. – 176 с.
35. Ибрагим Э. А. Дорожные асфальтполимерсеробетоны для региональных условий республики Судан: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Э. А. Ибрагим. – Макеевка, 1998. – 138 с.
36. Малофеев А. Г. Исследование динамического воздействия автомобиля на нежесткие дорожные одежды в процессе эксплуатации дорог дис. ... д-ра тех. наук / А. Г. Малофеев. – Омск, 1978. – 251 с.
37. Стрижевский А. М. напряженно-деформированное состояние нежесткой дорожной одежды при воздействии кратковременных нагрузок. / А. М. Срижевский. // Повышение технико-эксплуатационных качеств автомобильных дорог. Труды ГипрдорНИИ. – М., 1982. – С. 71 – 78.
38. Радовский Б. С. Проблемы механики дорожно-строительных материалов и дорожных одежд / Б. С. Радовский. – К., 2003. – 240 с.
39. Супрун А. С. Расчет напряжения, перемещений и деформаций нежестких дорожных одежд при движении многоосных многоколесных транспортных средств: дис. ... канд. тех. наук / А. С. Супрун. – К., 1983. – 190 с.
40. Дудаков А. И. Особенности учета воздействия автотранспортных средств при проектировании нежестких дорожных одежд / А. И. Дудаков. // Труды ГипрдорНИИ. – М.: 1981. – № 33. – С. 99 – 105.
41. Салль А. О. К вопросу о конструировании дорожных одежд с асфальтобетонными основаниями / А. О. Салль // Труды СоюздорНИИ. – М.: 1979. – № 105. – С. 142–155.

42. Сибирякова Ю. М. Расчетные параметры асфальтобетонных покрытий для проектирования нежестких дорожных одежд: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.11 / Ю. М. Сибирякова. – М.: МАДИ, 2008. – 161 с.
43. Ремонт и содержание автомобильных дорог: Справочник инженера-дорожника / А. П. Васильев, В. И. Баловнев, М. Б. Корсунский и др. / под ред. А. П. Васильева. – М.: Транспорт, 1989. – 287 с.
44. Смирнов А. В. Теоретические и экспериментальные исследования работоспособности нежестких дорожных одежд: дис. ... д-ра тех. наук: 05.23.05 / А. В. Смирнов. – Омск, 1989. – 376 с.
45. Салль А. О. Механические свойства асфальтобетона при изгибе кратковременными нагрузками / А. О. Салль // Труды Союздорнии. – М., 1971. – № 47 – С. 16 – 19.
46. Горелышева Л. А. Оценка усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий / Л. А. Горелышева, А. А. Штромберг // Наука и техника в дорожной отрасли. – М., 2009. – № 1. – С. 25–26.
47. Guide for Mechanistic-Empirical Design of new and rehabilitated pavements structures: final report. – NCHRP, 2004. – 120 p.
48. Дорожный теплый асфальтобетон / И. В. Королев, Е. Н. Агеева, В. А. Головко, Г. Р. Фоменко. – К.: Вища школа, 1984. – 200 с.
49. Гончаренко В. И. Термическая и динамическая усталость дорожного асфальтового бетона: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / В. И. Гончаренко. – Макеевка: МИСИ, 1983. – 176 с.
50. Радовский Б. С. О влиянии характеристик структуры материалов на их усталостную и длительную прочность / Б. С. Радовский, А. В. Руденский // Труды СоюздорНИИ. – М., 1975. – № 79. – С. 43–48.
51. Черсков Р. М. Комплексно-модифицированный асфальтобетон с повышенной устойчивостью к транспортным и погодно-климатическим воздействиям: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Р. М. Черсков. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009. – 203 с.
52. Дровалева О. В. Усталостная долговечность асфальтобетона при воздействии

- интенсивных транспортных нагрузок: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / О. В. Дровалева. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2009. – 202 с.
53. Ионов В. Н. Динамика разрушения деформируемого тела / В. Н. Ионов, В. В. Селиванов. – М.: Машиностроение, 1987. – 272 с.
  54. Перепечко И. И. Введение в физику полимеров / И. И. Перепечко. – М.: Химия, 1978. – 284 с.
  55. Калашникова Т. Н. Исследование усталостных свойств дорожных асфальтовых бетонов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Т. Н. Калашникова. – М., 1975. – 211 с.
  56. Орлов Б. Н. Основы кинетического подхода к теории разрушения деталей технологических машин и оборудования / Б. Н. Орлов. // Материалы международной научно-практической конференции «Роль природообустройства в обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем». – М.: МГУП, 2006. – С. 331–336.
  57. Журков С. Н. Температурная и времененная зависимость прочности полимерных волокон / С. Н. Журков, С. А. Абрасов // Высокомолекулярные соединения. – Л.: 1961. – № 3. – С. 441 – 449.
  58. Броек Д. Основы механики разрушения / Д. Броек. – М.: Высшая школа, 1980. – 368 с.
  59. Фізико-хімічна механіка будівельних матеріалів / В. І. Братчун, В. О. Золотарьов, М. К. Пактер, В. Л. Беспалов. – Макіївка-Харків: ДонНАБА, 2011. – 366 с.
  60. Работнов Ю.Н. Разрушение неметаллов и композитных материалов. Ч.2 Органические материалы / под ред. Ю. Н. Работнова. – М.: Наука, 1979. – 232 с.
  61. Титарь В. С. Закономерности разрушения и долговременной прочности асфальто- и дегтебетонов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / В. С. Титарь. – Харьков, 1982. – 237 с.
  62. Гезенцвей Л. Б. Асфальтовый бетон / Л. Б. Гезенцвей. – М.: Транспорт, 1985. – 350 с.

63. Ребиндер П. А. Поверхностные явления в дисперсных системах / П. А. Ребиндер. – М.: Наука, 1979. – 384 с.
64. Богуславский А. М. Основы реологии асфальтобетона / А. М. Богуславский, А. А. Богуславский. – М.: Высшая шк., 1972. – 200 с.
65. Рыбалко И. Ф. Минеральный порошок из шлама нейтрализации травильных растворов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / И. Ф. Рыбалко. – Макеевка: ДонГАСА, 1999. – 137 с.
66. Гезенцвей Л. Б. Асфальтовый бетон из активированных минеральных материалов / Л. Б. Гезенцвей. – М.: Стройиздат, 1971. – 225 с.
67. Зимон А. Д. Адгезия жидкости и смачивание / А. Д. Зимон. – М.: Химия, 1974. – 416 с.
68. Горелышев Н. В. Взаимодействие битума и минерального порошка в асфальтовом бетоне / Н. В. Горелышев. // Труды МАДИ. – М., 1955. – вып.10. – С. 20–23.
69. Пахаренко Д. В. Пути повышения долговечности асфальтобетонных покрытий / Д. В. Пахаренко, Д. А. Колесник // Дорожная техника. Каталог-справочник. Технология строительства, реконструкции, ремонта и содержания автомобильных дорог. – М.: ООО «Славутич», 2012. – С. 10 – 14.
70. Гончаренко В. В. Исследование усталостной долговечности асфальтобетона в зависимости от структурных особенностей его минерального остова / Гончаренко В. В., Гончаренко В. И., Голляк Ю. А. // Вести Автомобильно-дорожного института. – Горловка: АДИ ДонНТУ, 2008. – № 6. – С. 190–193.
71. Колбановская А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – М: Транспорт, 1973. – 264 с.
72. Иванов Н. Н. К обоснованию показателей механических свойств асфальтовых смесей. / Н. Н. Иванов, М. Я. Телегин // Исследование органических материалов и физико-механических свойств асфальтовых смесей. – М.: Дориздат, 1949. – С. 106–133.
73. Батраков О. Т. Реологические особенности асфальтовых бетонов как дисперсных структурированных систем / О. Т. Батраков // Тезисы докладов и

сообщений научно-технической конференции «Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов». – Харьков: ХАДИ. – 1977. – С. 28.

74. Dickinson E. J. Bituminous pavement research and development in Australia / E. J. Dickinson. // Australia road research. – 1979. – v.9. – №3. – P.54-57.
75. Королев И. В. Асфальтобетонные покрытия / И. В. Королев, В. А. Золотарев, В. А. Ступивцев. – Донецк: Донбасс, 1970. – 162 с.
76. Вдовиченко С. Л. Прочность и долговечность асфальтобетона / С. Л. Вдовиченко. – Минск: Наука и техника, 1984. – 238 с.
77. Єфремов С. В. Взаємозв'язок довготривкої міцності асфальтобетонів з поверхневими властивостями агресивних рідин / С. В. Єфремов, В. О. Золотарьов // Автомобільні дороги і дорожнє будівництво. – К.: Будівельник, 1994. – С. 98–102.
78. Бессчетнов Б. В. Длительная трещиностойкость асфальтобетона дорожных покрытий в климатических условиях юга России дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Б. В. Бессчетнов. – Ростов-на-Дону: РГСУ, 2010. – 190 с.
79. Ефремов С. В. Долговечность асфальтобетона под действием нагрузок и агрессивных сред дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / С. В. Ефремов. – Харьков: ХНАДУ, 2010. – 217 с.
80. Бахрах Г. С. Старение асфальтобетонных покрытий и пути его замедления / Г. С. Бахрах. // Труды ГипрдорНИИ. – М., 1974. – № 9. – С. 84–96.
81. Бируля А. К. Конструирование и расчет нежестких дорожных одежд автомобильных дорог / А. К. Бируля. – М.: Транспорт, 1964. – 172 с.
82. Корсунский М. Б. Основы теории расчета нежестких дорожных одежд по предельным относительным удлинениям / М. Б. Корсунский // Обоснование расчетных параметров для нежестких дорожных покрытий: сб. науч. тр. – М.: Дориздат, 1952. – С. 100–105.
83. Инструкция по проектированию дорожных одежд нежесткого типа: ВСН 46-83. – М.: Министерство транспортного строительства СССР, 1985.
84. Проектирование нежестких дорожных одежд: ОДН 218.046-01 (взамен ВСН

- 46-83). – [Действительный от 2001-01-01]. – М.: Государственная служба дорожного хозяйства министерства транспорта Российской Федерации, 2001. – (Отраслевые дорожные нормы).
85. Споруди транспорту. Дорожній одяг нежорсткого типу: ВБН В.2.3-218-186-2004. – [Чинний від 2005-01-01]. – К.: Укравтодор, 2004. – 176 с. – (Відомчі будівельні норми України).
  86. Салль А. О. Механические свойства асфальтобетона при изгибе кратковременными нагрузками / А. О. Салль // Труды СоюздорНИИ. – М.: 1969. – № 34.
  87. Hyongkey H. Fatigue characteristics / H.Hyongkey // Journal of the Highway Division. – 1967. – № 1.
  88. Руденский А. В. Определение расчетных значений модуля упругости асфальтобетона по результатам экспериментального определения фактических значений модуля упругости / А. В. Руденский // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ, 2010. – № 23. – С. 222-227.
  89. Калгин Ю. И. Усталостная долговечность холодного асфальтобетона на основе модифицированных жидких битумов / Ю. И. Калгин, В. Т. Ерофеев // Строительство, архитектура, дизайн. – М., 2008 – № 2 (4). – С. 98–103.
  90. Печенный Б. Г. Долговечность битумных и битумоминеральных покрытий / Б. Г. Печенный. – М.: Стройиздат, 1981. – 124 с.
  91. Evaluation of fatigue resistance for modified asphalt concrete mixtures based on dissipated energy concept / Farag Khodary Moalla Hamed. – Darmstadt: Department of Civil Engineering and Geodesy Technische Universität, 2010. – 156 p.
  92. Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Material Characterization Tests / Kamil E. Kaloush, Waleed A. Zeiada, Krishna P. Biligiri, Maria C. Rodezno, Jordan Reed // Graduate Research Associates Arizona State University Department of Civil and Environmental Engineering. – Tempe, 2005. – 18 p.
  93. Руденский А. В. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных покрытий

- / А. В. Руденский, А. С. Рыльков // Дороги и мосты. – М.: РосдорНИИ, 2008. – № 18. – С. 214 – 222.
94. Федорашко И. Я. Геосинтетические материалы в дорожном и гидротехническом строительстве / И. Я. Федорашко. – К: Евроизол, 2002. – 42 с.
95. Road Note 36. Specification for manufacture and use of rubberized bituminous road material and binders. – London: her Majesty Stationery Office, 1968. – 24 p.
96. Михайлов В. В. Влияние каучука на свойства дорожного битума / В. В. Михайлов, А. Н. Долгов, В. П. Лаврухин. // Автомобильные дороги. – М: 1971. – № 10. – С. 21 – 23.
97. Коренков В. Л. Каучук в дорожном строительстве / В. Л. Коренков, И. Л. Сафонова, Л. А. Якубенко // Автомобильные дороги. – М: 1967. – № 2. – С. 28 – 29.
98. Пешехонова Т. А. Комплексные органические вяжущие для дорожного строительства / Т. А. Пешехонова, Л. В. Сидорова, А. В. Руденский. // Новые материалы на основе органических вяжущих для дорожного строительства: Эспресс-информация. – ЦБНТИ Минавтодора РСФСР, 1973. – № 7. – С. 55.
99. Руденская И. М. Реологические свойства битумоминеральных смесей / И. М. Руденская, А. В. Руденский. – М.: Высшая школа, 1971. – 131 с.
100. Иванськи М. Повышение свойств асфальтобетона добавкой серы в условиях Польши: автореферат канд. тех. наук: 05.23.05 / М. Иванськи. – М.: МАДИ, 1990. – 21 с.
101. Методические рекомендации по применению и приготовлению комплексных органических вяжущих на основе тяжелых продуктов переработки нефти и угля, ПАВ, полимеров и других высокодисперсных наполнителей / Л. М. Гохман, Д. С. Шемонаева, Е. М. Гураиль, В. И. Братчун. – М.: Минтрансстрой СССР, СоюздорНИИ, 1986. – 50 с.
102. Road binders and energy savings. Chapter III. Altering the characteristics of the bitumen. Report prepared by an OESD scientific expert group. Organization for Economic cooperation and Development, RTR, 1987. – 249 p.
103. Гохман Л. М. Подбор состава полимерно-битумного вяжущего /

- Л. М. Гохман // Автомобильные дороги. – М. 1995. – С. 22 – 24.
104. Золотарев В. А. Битумы, модифицированные полимерами типа СБС: особенности состава, структуры и свойств / В. А. Золотарев // Доклад на Международной научно-технической конференции «Проблемы повышения качества и ресурсосбережения в дорожной отрасли». – Харьков: ХНАДУ, 2003. – 17 с.
105. Самойлова Е. Э. Дорожные асфальтобетоны с комплексно-модифицированной микроструктурой с использованием реакционно-способного термопласта Элвалой АМ: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Е. Э. Самойлова. – Макеевка: ДонНАСА, 2007. – 171 с.
106. Веренько В. А. Новые материалы в дорожном строительстве: Учеб. пособие / В. А. Веренько. – Минск: УП «Технопринт», 2004. – 170 с.
107. Липатов Ю. С. Физическая химия наполненных полимеров / Ю. С. Липатов . – М.: Химия, 1977. – 304 с.
108. Леонович И. И. Учет свойств асфальтобетона при диагностике автомобильных дорог / И. И. Леонович, Я. В. Колоскова // Строительство и эксплуатация автомобильных дорог, тр. БелдорНИИ. – Минск, 2002. – № 14. – С. 111 – 121.
109. Сибирякова Ю. М. Экспериментальное исследование некоторых асфальтобетонов под многократной нагрузкой / Ю. М. Сибирякова // Наука и практика транспортного строительства. – 2007. – № 4. – С. 22 – 24.
110. Dinnen A. Bitumen-thermoplastic rubber blends in road applications / A. Dinnen // Third Eurobitumen Symposium 1985 «Bitumen flexible and durable», Vol. 1, Summaries and papers. The Hague, 1985. – P. 645–651.
111. Counturier Y. Amelioration des propriétés des bétons bitumineux pour couches de roulement par l'emploi d'un bitumen polymère à hautes performances. / Counturier Y., Lopez E., Prudhomme J.B. / Third Eurobitumen Symposium 1985 “Bitumen flexible and durable”, Vol. 1, Summaries and papers. The Hague, 1985. – P. 645 – 651.
112. Peffekovem W. Experience with «Carbit» in asphalt mixes / W. Peffekovem //

- Third Eurobitumen Symposium 1985 «Bitumen flexible and durable», Vol. 1, Summaries and papers. The Hague, 1985. – P. 538–541.
113. Лаврухин В. П. Свойства асфальтобетонов на модифицированных битумах / В. П. Лаврухин, Ю. И. Калгин // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2002. – № 1. – С. 14–17.
114. Калгин Ю. И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов / Ю. И. Калгин. – Воронеж.: Из-во Воронежского госуд. ун-та, 2006. – 272 с.
115. Золотарев В. А. Реологические свойства асфальтополимербетонов при динамическом режиме деформирования / В. А. Золотарев, В. В. Маляр, А. С. Лапченко. // Наука и техника в дорожной отрасли. –2008. – № 1. – С. 10–13.
116. Verga C. Asphalt cement improvement: the influence of carboksylated SBR elastomer investigated by means of viscoelastic parameters / Verga C., Buttiato G., La Bella C. // Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologies. Technical Sessions, Phoenix, Arisona, 1975. – P. 366–386.
117. Centalani G. I conglomerati bituminosi additvati com gomma sintetica. / G. Centalani // Resultati ed esperanza dopo quattro anni di applicazioni in Italia. Riv Strada. Nr 387. – 1973. – № 42. – P. 1105–1109.
118. Транспортне будівництво з використанням полімерних латексів Butonal. – К.: Міжнародна хімічна продукція, 2006. – 4 с.
119. Скрыльник А. П. Полимерные добавки в литом асфальтобетоне / А. П. Скрыльник, И. Н. Питецкий // Автомобильные дороги. – 1977. – № 9 – С.25 – 27.
120. Органические вяжущие для дорожного строительства / С. К. Илиополов, И. В. Мардирисова, Е. В. Углова, О. К. Безродный. – Ростов-на-Дону, 2003. – 428 с.
121. Ковальчек М. Применение термопластичных эластомеров в дорожном строительстве / М. Ковальчек, А. В. Масолитин // Опыт и проблемы современного развития дорожного комплекса Украины на этапе вхождения в

- Европейское сообщество. Материалы международной научной конференции – Харьков: ХНАДУ, 2002. – С. 59 – 61.
122. B. Brule. Les bitumes polymers pour enrobes speciaux: elastomeres ou plastmeres speciaux: elastomeres ou plastmeres / B. Brule, M. Maze // RGRA. – 1995. – №726. – Р. 42 – 48.
123. Бусел А. В. Добавки этилен-винил-ацетата для модификации дорожных битумов / А. В. Бусел // Наука и техника в дорожной отрасли. –1999. – № 2. – С. 12 – 14.
124. Характеристики, рекомендации, отзывы о термопласте Элвалой АМ. – К.: LAKET, 2002. – 78 с.
125. Полимерно-битумные вяжущие и асфальтобетоны на основе битумов, модифицированных Элвалоем / В. А. Золотарев, С. В. Ефремов, Я. И. Пыриг, С. А. Чугуенко // Вестник Харьковского автомобильно-дорожного университета. – Харьков: ХНАДУ, 2002. – № 19. – С. 88 – 93.
126. Кулезнев В. Н. Основы физики и химии полимеров / В. Н. Кулезнев. – М.: Высшая шк., 1977. – 247 с.
127. Бобарыкин А. К. Исследование свойств дорожного полимербетона в различных условиях нагружения / А. К. Бобарыкин // Труды ГипроДорНИИ: Полимерные материалы в строительстве покрытий автомобильных дорог. – М., 1981. – С. 86 – 91.
128. Гончаренко В. В. Покращення властивостей дорожніх бітумів шляхом їх модифікації вторинним поліетиленом високого тиску / В. В. Гончаренко, Є. О. Ромасюк // Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка: ДонНАБА, 2011. – № 1 (87). – С. 11–16.
129. Теоретико-экспериментальные принципы получения дорожных бетонов на органических вяжущих повышенной долговечности с комплексно-модифицированной структурой / В. И. Братчун, В. Л. Беспалов, М. К. Пактер, Е. Э. Самойлова и др. // Вісник ДонНАБА. Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка: ДонНАБА, 2012. – № 1(93). – С.25 – 40.
130. Ахмед Талиб Мутташар Мутташар. О целесообразности модификации

макроструктуры и микроструктуры асфальтобетона с целью повышения его долговечности / Ахмед Талиб Мутташар Мутташар. // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури: зб. наук праць / М-во освіти і науки України, ДонНАБА. – Макіївка, 2012. – №1(93). – С. 104-109.

131. Эль-Хаг Адиль Ибрагим. Дорожные асфальтополимерсеробетоны для региональных условий республики Судан: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Эль-Хаг Адиль Ибрагим. – Макеевка: ДонГАСА, 1998. – 138 с.
132. Братчун В. И. Литые асфальтобетоны повышенной долговечности / В. И. Братчун, Н. А. Столярова, В. Л. Беспалов, И. Ф. Рыбалко // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту: науково-виробничий збірник / АДІ ДВНЗ «ДонНТУ». – Горлівка, 2007. – № 1(4). – С. 143 – 146.
133. Энциклопедия полимеров / В. А. Каргин, М. С. Акутин, С. В. Воюцкий и др. – М.: Советская энциклопедия, 1972. – Т. 1. – С. 340.
134. Гураири Е. М. Влияние серы на структурообразование в битумах. / Е. М. Гураири. // Труды СоюзДорНИИ. – М.: 1971. – Вып . 44. – С .137–145.
135. Химические процессы и формирование сетчатой структуры в битуме, модифицированном Элвалоем АМ в присутствии полифосфорной кислоты / В. И. Братчун, Е. Э. Самойлова, В. Л. Беспалов и др. // Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури: зб. наук праць. – Одеса: ОДАБА, 2006. – Вип. 2006, том 23: Сучасні будівельні матеріали і конструкції. – С. 4 – 10.
136. Ахмед Талиб Мутташар Мутташар. Модифицированные асфальтобетонные смеси для устройства покрытий нежестких дорожных одежд в климатических условиях республики Ирак: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Ахмед Талиб Мутташар Мутташар. – Макеевка: ДонГАСА, 2013. – 168 с.
137. Испытания дорожно-строительных материалов: лабораторный практикум; учебное пособие / В. А. Золотарев, В. И. Братчун, А. В. Космин и др.; под ред. В. А. Золотарева, А. В. Космина. – Харьков: ХНАДУ, 2012. – 368 с.
138. Столярова Н. А. Литые органоминеральные смеси для ремонта дорожных

- покрытий нежесткого типа: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / Н.А. Столярова. – Макеевка: ДонНАСА, 2009. – 167 с.
139. Сергута А. М. Технология получения и применения минеральных порошков, активированных лесохимическими реагентами, для строительства лесовозных автодорог: диссертация ... канд. тех. наук: 05.21.01. / А. М. Сергута. – Санкт-Петербург, 2007. – 163 с.
140. Золотарев В. А. Влияние структурных особенностей битума на температурные переходы в асфальтобетоне / В. А. Золотарев, В. С. Титарь // Автомобильные дороги и дорожное строительство. – К., 1979. – вып. 25. – С. 59 – 62.
141. Рыбалко И. Ф. Минеральный порошок из шлама нейтрализации травильных растворов: дис. ... канд. тех. наук: 05.23.05 / И. Ф. Рыбалко. – Макеевка: ДонГАСА, 1998. – 137 с.
142. Оценка влияния активированных минеральных порошков и полимерных модификаторов на температуру хрупкости асфальтовяжущего вещества / Е. А. Ромасюк, В. И. Братчун, В. В. Гончаренко, Ахмед Талиб Мутташар Мутташар. // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали. – Макіївка: ДонНАБА, 2013. – № 1 (99). – С. 84 – 91.
143. Золотарев В. А. Оценка продолжительности жизни асфальтобетона под действием статического нагружения / В. А. Золотарев. // Автомобільні дороги. Науково-виробничий журнал. – К., 2013. – № 1. – С. 25 – 33.
144. Струганов Е. В. Влияние антигололедных реагентов на коррозионную устойчивость асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Е. В. Струганов, Г. С. Меренцова // Ползуновский вестник. – Барнаул, 2011. – № 1. – С. 273 – 276.
145. Ромасюк Е. А. Физические свойства и деформационно-прочностные характеристики комплексно-модифицированных асфальтовяжущих веществ / Е. А. Ромасюк // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури. Сучасні будівельні матеріали. Макіївка: ДонНАБА, 2014 – № 1

(105). – С. 17 – 23.

146. Седов А. В. Влияние агрессивных сред противогололедных материалов на разрушение асфальтобетонных покрытий от знакопеременных температур и циклических нагрузок / А. В. Седов // Вестник ХНАДУ. – Харьков: ХНАДУ, 2006. – С. 48 – 51. – № 34 – 35.
147. Подольский В. П. Коррозионная устойчивость асфальтобетонов с использованием минерального порошка из углеродсодержащих материалов / В. П. Подольский, А. В. Ерохин // Научный Вестник ВГАСУ. Строительство и архитектура. – Воронеж, 2008. – № 1. – С. 249 – 252.
148. Пактер М. К. Прогнозирование долговечности асфальтобетона по изменению группового состава битума в процессе термоокислительного старения / М. К. Пактер, В. И. Братчун, А. А. Стукалов // Вісник Донбаської національної академії будівництва і архітектури : зб. наук. праць. – Макіївка, ДонНАБА, 2014. – № 1(93). – С. 25 – 40.
149. Kandhal P. S. Effect of asphalt film thickness on short and long term aging of asphalt paving mixtures / P. S. Kandhal, S. Chakaraborty // NCAT Report 96-01. – 1996. – 16 p.
150. Причины старения битумоминеральных смесей / С. В. Суторцев, П. Б. Рапопорт, Н. А. Хухрянская, Е. Гизаева // Наука и техника в дорожной отрасли. – СПб: 2010. – № 3. – С. 31 – 32.
151. Siddiqui M. N. Studies on the aging behavior of the Arabian asphalts Siddiqui / M. N. Siddiqui, M. F. Ali // Fuel. – 1999. – 78 (9). – P. 1005 – 1015.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А



**Министерство образования и науки  
Донецкой Народной Республики  
Донбасская национальная академия  
строительства и архитектуры**

86123, г. Макеевка, ул. Державина, 2, тел.: (062) 340-15-80,  
(0623) 22-24-67, факс (0623) 22-77-19, email: mailbox@donnasa.ru

от 28.08.2015 № 245/04  
на № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Диссертационный совет Д 01.006.02 при  
Донбасской национальной академии  
строительства и архитектуры

**СПРАВКА**

о внедрении в учебный процесс в Донбасской национальной академии  
строительства и архитектуры результатов теоретических и экспериментальных  
исследований диссертационной работы Ромасюка Евгения Александровича на тему  
«Дорожные асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированной структурой  
повышенной усталостной долговечности», представленную на соискание ученой  
степени кандидата технических наук по специальности  
05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Комиссия в составе: проректора по учебной работе, д.т.н., профессора  
Зайченко Н. М., директора строительного института, д.э.н., профессора Севки Г. В.,  
начальника учебного отдела, к.э.н., доцента Сухины А. А. свидетельствует, что при  
подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 «Строительство» по профилю  
«Автомобильные дороги» в курсах «Строительное материаловедение. Спецкурс» и  
«Физико-химическая механика строительных материалов» в разделах  
«Модифицированные асфальтобетоны повышенной долговечности» и  
«Асфальтополимербетоны с модифицированной микро-, мезо- и макроструктурой»  
используются теоретические и экспериментальные данные кандидатской  
диссертационной работы Ромасюка Евгения Александровича «Дорожные  
асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированной структурой повышенной  
усталостной долговечности».

Члены комиссии:

Проректор по учебной работе,  
д.т.н., профессор

Директор строительного института,  
д.э.н., профессор

Начальник учебного отдела,  
к.э.н., доцент



Н. М. Зайченко

Г. В. Севка

А. А. Сухина

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ДОНЕЦКАЯ НАРОДНАЯ РЕСПУБЛИКА**

**ПУБЛИЧНОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
ОБЛДОРРЕМСТРОЙ**

---

*ДНР, 83001, г. Донецк, ул. Университетская, 13, код ОКПО 05505963*

Диссертационный совет Д 01.006.02 при  
Донбасской национальной академии  
строительства и архитектуры

### **СПРАВКА**

о внедрении результатов исследований диссертационной работы  
Ромасюка Евгения Александровича на тему «Дорожные  
асфальтополимербетоны с комплексно-модифицированной структурой  
повышенной усталостной долговечности», представленную на соискание  
ученой степени кандидата технических наук по специальности  
05.23.05 – Строительные материалы и изделия

В ПАО «Облдорремстрой» внедрены «Рекомендации по производству и применению модифицированных асфальтобетонов повышенной усталостной долговечности». Предполагаемая экономическая эффективность от внедрения 1 т асфальтополимербетонов повышенной усталостной долговечности составила 691,70 руб.

Председатель правления  
ПАО «Облдорремстрой»



С. В. Григалашвили

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

**УТВЕРЖДАЮ:**

Председатель правления  
ПАО «Облдорремстрой»



Григалашвили С. В.

« 9 » 06 2015 г.

### РАСЧЕТ

предполагаемой экономической эффективности внедрения асфальтополимербетонов по составам, технологии и рекомендациям, разработанным на кафедре автомобильных дорог и аэродромов Донбасской национальной академии строительства и архитектуры аспирантом Ромасюком Е. А. под руководством д.т.н., профессора Братчуна В. И.

#### B.1. Краткая техническая характеристика сравниваемых вариантов

##### B.1.1. Базового варианта

Асфальтобетонный завод (АБЗ) ПАО «Облдорремстрой», в основном, производит горячие асфальтобетонные смеси, соответствующие требованиям ДСТУ Б.В.2.7-119-2011, приготавливаемые на нефтяных дорожных битумах марок БНД 60/90 (ДСТУ 4044-2001), которые характеризуются низкими значениями когезии (0,020 – 0,0250 МПа), адгезии (18 – 50 % по ДСТУ Б.В.2.7-81-98), температуры размягчения  $T_p = 37 - 45^{\circ}\text{C}$ , отсутствием эластичности. Это приводит к низким значениям сдвигостойчивости, водо- и морозостойкости, а следовательно, и низкой усталостной долговечности асфальтобетонных покрытий.

##### B.1.2. Новой техники.

В качестве нового варианта принята асфальтополимербетонная смесь, приготовленная на битуполимерном вяжущем (исходный битум БНД с  $\Pi_{25} = 71$  град.), которое содержит в своем составе комплексную добавку этиленглицидилакрилат марки Elvaloy-AM (2 % от массы битума + полифосфорная кислота ПФК-105 0,2 % от массы битума)), минеральные материалы поверхность-активированы 0,7 % мас. этиленглицидилакрилата.

##### B.1.3. Преимущества новой техники по сравнению с базовой.

Применение разработанной асфальтополимербетонной смеси для строительства верхних слоев дорожных одежд позволит обеспечить нормативный

срок службы автомобильной дороги (18 – 20 лет).

## Б.2. Методика расчета годового экономического эффекта.

Б.2.1. Наименование инструкции, её номер, год ввода в действие, в соответствии с которой производится расчёт экономического эффекта.

Для определения экономической эффективности применения модифицированных асфальтополимербетонных смесей произведен технико-экономический расчёт в соответствии с Инструкцией по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений, М.: Госстрой СССР, 1979. – 65 с (СН 509-78), а также СНиП IV-2-82, т. 4.

### Б.2.2. Основная формула расчёта

В связи с тем, что сравниваются варианты верхних слоев дорожных одежд автомобильных дорог, а именно асфальтобетонного (традиционный горячий асфальтобетон – базовый вариант) и асфальтополимербетонного (содержит битум, который модифицирован реакционноспособным полимером Elvaloy-AM в комбинации с полифосфорной кислотой ПФК-105 и минеральные компоненты поверхностно-активированные этиленглицидилакрилатом) – новый вариант, срок службы которых меньше срока службы всего конструктива автомобильной дороги, то расчет годового экономического эффекта  $\mathcal{E}_e$  от создания и использования строительной конструкции (модифицированного асфальтобетонного верхнего слоя дорожной одежды) производили по формуле Б.1 (3 из СН 509-78)

$$\mathcal{E}_e = ((Z_1 - Z_{C1}) \cdot \varphi + \mathcal{E}_s - (Z_2 - Z_{C2})) A_e, \quad (\text{Б.1})$$

где  $Z_1$  и  $Z_2$  – приведенные затраты на заводское производство асфальтополимербетонных смесей соответственно с учетом стоимости транспортирования до строящейся автомобильной дороги по сравниваемым вариантам базовой и новой техники в гривнах на единицу измерения;

$Z_{C1}$  и  $Z_{C2}$  – приведенные затраты на устройство покрытий из этих материалов (без учета стоимости их заводского производства) по сравниваемым вариантам базовой и новой техники в гривнах на единицу измерения;

$\varphi$  – коэффициент изменения срока службы новой конструкции повышенной долговечности по сравнению со сроком службы базового варианта;

Данный коэффициент рассчитывается по формуле (Б.2):

$$\varphi = \frac{P_1 + E_h}{P_2 + E_h}, \quad (\text{Б.2})$$

где  $P_1$  и  $P_2$  – для смежной стоимости строительных конструкций в расчете на один год их службы по сравниваемым вариантам;

$E_h$  – нормативный коэффициент эффективности капитальных вложений.

В соответствии с данными приложения 2 СН 509-78 коэффициент  $\varphi$  составил:

$$\varphi = \frac{0,3138}{0,1720} = 1,82.$$

Срок службы покрытия автомобильной дороги из асфальтополимербетонных смеси будет выше более чем в 2 раза, чем традиционного асфальтобетонного (это показано экспериментальными исследованиями – раздел 5 настоящей работы).

$\mathcal{E}_e$  – экономия в сфере эксплуатации сравниваемых конструкций (верхние слои дорожной одежды) за срок их службы;

$A_e$  – годовой объем производства модифицированных асфальтополимербетонных смесей в натуральных условиях.

Так как приведенные затраты на устройство покрытий по-новому и старому вариантах ( $Z_{C1}$  и  $Z_{C2}$ ) имеют одинаковое значения, и экономия в сфере эксплуатации сравниваемых вариантов принимается равной нулю, то указанные величины при расчете формулы «методом на разность» сокращаются и данная формула принимает вид (Б.3):

$$\mathcal{E}_e = (Z_{C1} \cdot \varphi - Z_{C2}) \cdot A_e = (C_1 \cdot \varphi - C_2) \cdot A_e, \quad (\text{Б.3})$$

где  $C_1$  и  $C_2$  – соответственно себестоимость 1 т горячей асфальтобетонной смеси и 1 т модифицированной асфальтополимербетонной смеси (табл. Б.1).

Подставляя в выражение (Б.3) численные значения, определяем величину экономического эффекта от внедрения 1 т асфальтополимербетонных смесей

$$\mathcal{E}_e = (4108,18 \cdot 1,82 - 6785,19) \cdot 1 = 691,70 \text{ руб.}$$

Таблица Б.1.

Калькуляция стоимости 1 т асфальтобетонной смеси (базовый вариант) и 1 т асфальтополимербетонной смеси (новый вариант), приготовленных на асфальтобетонном заводе ПАО «Облдорремстрой»

№ п/ п	Наименование за- трат	Ед. изм.	Базовый вариант			Новый вариант			Обоснование
			Рас- ход на 100 т	Цена за 1 т, руб- лей	Сумма, рублей	Расход на 100 т	Цена за 1 т, рублей	Сумма, рублей	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Раздел 1. Затраты труда</b>									
1.	Затраты труда на производстве	чел-ч	22,58	–	–	24,31	–	–	ФЭР-2001 Сборник 27. (редакция 2014 г.).

Продолжение таблицы Б.1.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Раздел 2. Основные материалы</b>									
1.	Щебень гранитный фракционный 5-20 мм	т	35	1150	40250	35	1150	40250	Данные ПАО «Облдор-ремстрой»
2.	Гранитный отсев 0,14-5 мм	т	58	880	51040	58	880	51040	То же
3.	Известняковый минеральный порошок	т	7	1500	10500	7	1500	10500	То же
4.	Битум БНД 60/90	т	5,0	9000	45000	—	—	—	То же
5.	Битумополимерное вяжущее (2 % Elvaloy-AM)		—	—	—	5,2	14600	75920	То же
6.	Полифосфорная кислота ПФК-105	т	—	—	—	0,002	370000	740	То же
7.	Раствор полимера Elvaloy-AM для активации поверхности мин. материалов	т	—	—	—	0,707	280000	196190	То же
	<b>Итого</b>	—	—	—	<b>146790</b>	—	—	<b>374640</b>	—
	Итого с транспортно-заготовительными расходами – 2 %		—	—	<b>149726</b>	—	—	<b>382133</b>	—
<b>Раздел 3. Дополнительные материалы</b>									
1.	Электроэнергия	кВт·ч	680	268,08	182294	800	268,08	214464	Данные РП «Региональная поставляющая компания» (ДНР)
2.	Газ	м <sup>3</sup>	2905	27	78435	3020	27	81540	То же
3.	Вода	м <sup>3</sup>	1	8,6	8,6	1	8,6	8,6	То же
	<b>Итого</b>		—	—	<b>260738</b>	—	—	<b>296013</b>	—
<b>Раздел 4. Оплата труда</b>									
1.	Заработка плата на производстве	руб.	—	—	201,34	—	—	215,14	ФЭР-2001 Сборник 27. (редакция 2014 г.).
	<b>Итого</b>		—	—	<b>201,34</b>	—	—	<b>215,14</b>	—
<b>Раздел 5. Отчисления на социальные мероприятия</b>									
1.	Отчисления в пенсионный фонд – 32 %	руб.	—	—	64,43	—	—	68,52	—
2.	Социальное страхование на случай безработицы – 2,5 %	руб.	—	—	5,03	—	—	5,38	—
3.	Страхование по временной потере трудоспособности – 2,5 %	руб.	—	—	5,03	—	—	5,38	—

Продолжение таблицы Б.1.

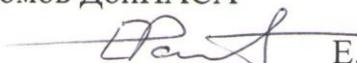
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
4.	Социальное стра-хование от несчастных слу-чаев на производстве – 1 %	руб.	–	–	2,01	–	–	2,15	–
	<b>Итого</b>		–	–	<b>76,50</b>	–	–	<b>81,43</b>	–
<b>Раздел 6. Амортизация</b>									
1.	Амортизация производства	руб.	–	–	76	–	–	76	Данные ПАО «Облдор-ремстрой»
	<b>Итого</b>		–	–	<b>76</b>	–	–	<b>76</b>	–
	<b>Всего</b>	руб	–	–	<b>410818</b>	–	–	<b>678519</b>	–
	Себестоимость производства 1 т смеси	руб	–	–	<b>4108,18</b>	–	–	<b>6785,19</b>	–

**Представители Донбасской национальной академии строительства и архитектуры**

Руководитель работы

д.т.н., профессор  В. И. Братчун

Аспирант кафедры автомобильных дорог и аэродромов ДонНАСА

 Е. А. Ромасюк

**Главный бухгалтер  
ПАО «Облдорремстрой»**

 Ю. Ю. Судьин