

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОТОННАЖНЫХ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ СОЗДАНИЯ БИТУМНЫХ КОМПОЗИТОВ С УЛУЧШЕННЫМИ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ДОЛГОВЕЧНОСТИ

**И.А. Фролов¹, У.Г. Зверева², Т.В. Дударева², И.А. Красоткина²,
В.Г. Никольский², Л.Р. Люсова¹, Ю.А. Наумова¹**

¹Московский технологический университет (Институт тонких химических технологий имени М.В. Ломоносова), Москва 119571, Россия

²Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук, Москва 119991, Россия

@Автор для переписки, e-mail: naumova_yulia@mail.ru

С целью поиска эффективных решений проблемы переработки техногенных отходов, предложены системы наполнителей для битумных вяжущих, применяемых в дорожном строительстве. Впервые, совместно с использованием отходов серы, получаемых в технологических процессах переработки нефти, природного газа и др., для улучшения качества битумных дорожных вяжущих, был опробован продукт вторичный переработки шинных резин – активный порошок дискретно девулканизованной резины. Исследованы реологические свойства и усталостная долговечность содержащих серу битумных вяжущих по методу линейной амплитудной развертки (LAS) на реометре динамического сдвига Smart Pave серии Physica MCR компании Anton Paar (Австрия). На основании результатов анализа микрофотографий, получаемых методом оптической микроскопии, была разработана методика пробоподготовки образцов серосодержащих вяжущих для исследования на стойкость к усталостному растрескиванию. Анализ влияния серы и эластичного наполнителя индивидуально и совместно на показатель усталостной долговечности показал, что увеличение числа циклов до разрушения образцов вяжущих в 3-5 раз при их деформации 5 и 2.5% определяется концентрацией резиновой крошки. Введение серы в тройных системах: битум/сера/эластичный наполнитель позволяет за счет возможности изготовления сероасфальтобетонных смесей при более низких температурах экономить энергоресурсы.

Ключевые слова: битум, битумные вяжущие, усталостная стойкость, модификатор, сера, резина, отходы, шины, высокотемпературное сдвиговое измельчение, активный порошок дискретно девулканизованной резины.

USING LARGE-TONNAGE INDUSTRIAL WASTE TO CREATE BITUMEN COMPOSITES WITH IMPROVED FATIGUE LIFE

**I.A. Frolov¹, U.G. Zvereva², T.V. Dudareva², I.A. Krasotkina², V.G. Nikol'skiy²,
L.R. Lyusova¹, Yu.A. Naumova¹**

¹Moscow Technological University, (M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies), Moscow 119571, Russia

²N.N.Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences, Moscow 119991, Russia

@Corresponding author e-mail: naumova_yulia@mail.ru

With the goal of searching effective methods of industrial wastes recycling, filler systems for bituminous binders in road building have been proposed. For the first time in the world, the product of recycled tire rubbers, which is an active powder of discretely devulcanized type of rubber in addition to waste of sulfur produced in technological processes of oil refining, natural gas, etc., have been tested in order to improve the quality of bitumen binders. The rheological properties and fatigue life of the sulfur-bitumen binder have been investigated according to the linear amplitude sweep test (LAS) by using a Smart Pave dynamic shear rheometer (Physica MCR series, Anton Paar, Austria). A technique for preparing samples of sulfur-containing binders has been developed based on the results of photomicrographs analysis obtained by optical microscopy. It has been done to study their fatigue cracking resistance. The analysis of the influence of sulfur and elastic filler on fatigue life has showed that the rise of the quantity of cycles up to fatigue damage of binder samples by the factor of 3–5 (strain of 5% and 2.5%) is due to crumb rubber concentration. The addition of sulfur to ternary systems bitumen/sulfur/elastic filler enables saving energy resources as a result of the possibility of manufacturing sulfur-extended asphalt at lower temperatures.

Keywords: bitumen, bitumen binders, fatigue life, modifier, sulfur, waste, tire, high-temperature shear-induced grinding, active powder of discretely devulcanized rubber.

Введение

В конце второго десятилетия XXI века по-прежнему актуальной является проблема утилизации и переработки техногенных отходов [1]. Продукты, в состав которых вводятся переработанные отходы, могут представлять значительный интерес в тех случаях, когда они либо имеют более низкую по сравнению с традиционными материалами стоимость, либо обладают привлекательным комплексом характеристик. Последнее диктует необходимость проведения теоретических и прикладных работ по улучшению качества материалов, получаемых в результате переработки отходов производства и потребления, обстоятельному исследованию свойств конечных продуктов, в состав которых вводятся эти материалы, а также отработке технологий их изготовления и применения при производстве конкурентоспособных изделий. Это в полной мере относится к решению проблем переработки многотонажных неразлагаемых отходов производства и потребления в шинной промышленности [2, 3], а также отходов серы [4], получаемых в технологических процессах переработки нефти, природного газа и ряда других.

Как показал анализ литературы [2–10], одним из перспективных направлений применения продуктов переработки отработанных шин и отходов серы является производство широкого спектра строительных материалов.

С начала 1970-х годов в различных странах мира в качестве одного из направлений переработки и применения отходов серы рассматривалась возможность ее использования в дорожной отрасли в качестве компонента вяжущего асфальтобетона с целью замены части битума и удешевления стоимости асфальтобетона. Таким образом получали так называемый серонаполненный битум (Sulfur-Extended Asphalt,

SEA). Дорожные SEA-покрытия, где соотношения серы и битума в вяжущем находятся в диапазоне от 20/80 до 50/50, еще 30–40 лет назад были уложены в 18 штатах США. Полученные результаты показали, что общие характеристики и чувствительность к разрушению SEA-асфальтобетонов были близки к характеристикам контрольных образцов традиционных асфальтобетонов [4].

Выполненные в то время исследования показали, что часть введенной в битум серы действительно является компонентом вяжущего – до 20%, в то время как излишки серы выступают в качестве наполнителя или стабилизатора асфальтобетонной смеси. Был сделан вывод о том, что свободная сера, при концентрации свыше 20%, затвердевает в кристаллическом состоянии [5], а допустимая концентрация серы в вяжущем зависит от свойств базового битума [6].

Интерес к использованию серы в дорожной отрасли сохраняется и настоящее время в связи со значительными объемами ее производства. Так, в 2011 году мировой объем производства серы составил 69 млн. т, в том числе в РФ 6.44 млн. т [7]. Учитывая то, что в существующих отвалах сера, как правило, загрязнена примесями, в том числе токсичными, с целью повышения безопасности ее использования и придания комплекса свойств, необходимых для обеспечения требуемых технологических и эксплуатационных свойств асфальтобетонам, в РФ в последние годы используются установки для дегазации и модификации серы [8].

Модифицированная сера экологически безопасна при соблюдении температурного режима приготовления асфальтобетонной смеси (при температуре до 160 °С эмиссия сероводорода и диоксида серы отсутствует), а получаемые с ее использованием асфальтобетоны характеризуются более высокими в сравнении с традиционными асфальтобетонами износостойкостью, теплоустойчивостью, трещино-

стойкостью, устойчивостью к колееобразованию и превосходной адгезией вяжущего к щебню [9].

Модификаторы для битумного вяжущего на основе шинной резиновой крошки более 50 лет применяются в разных странах мира для улучшения качества дорожных покрытий [2, 3, 10]. Введение модификаторов в битум или асфальтобетонную смесь на практике осуществляют в широком температурно-временном диапазоне от 140 до 210 °С, а продолжительность процесса может достигать нескольких часов [11]. Условия и эффективность модификации битумов измельченными вулканизатами в значительной степени определяются морфологией поверхности резиновых частиц, их размером и степенью де вулканизации, т.е. зависят от режимов переработки шинной резины.

Использование технологии высокотемпературного сдвигового измельчения в качестве финишной стадии переработки автопокрышек позволяет получать уникальный класс эластичных наполнителей, частицы которых обладают высокими удельной поверхностью и химической активностью в процессе вулканизации [3].

Продукт вторичной переработки резин – модификатор «Полиэпор-Р», основную долю которого составляют частицы активного порошка дискретно де вулканизированной резины (АПДДР) со средним размером 0.1–0.3 мм, можно вводить сухим способом непосредственно в асфальтобетонную смесь в момент ее приготовления. За временной промежуток, когда смесь перемешивается и выгружается для доставки к месту укладки покрытия, происходит последовательная деагломерация данного эластичного наполнителя, сопровождающаяся образованием частиц, размеры которых, как показано в работе [3], составляют 1-2 мкм и менее. При этом образуется резино-битумное вяжущее, одна из основных характеристик которого – это высокая стойкость к образованию трещин.

Экспериментальная часть

В данной работе при изготовлении опытных образцов битумных вяжущих были приготовлены модифицированные вяжущие на основе битума нефтяного дорожного марки БНД 60/90 (ГОСТ 22245) с использованием в качестве наполнителей и модификаторов: минерального порошка марки МП-1 (ГОСТ Р 52129-2003), модифицированной серы марки «Сульфотекс-АБ» (СТО 5718-001-37854292-2012) и модификатора «Полиэпор-Р» (ГОСТ Р 55419-2013, СТО 11101543-006-2015) – активного порошка дискретно де вулканизированной шинной резины (размер частиц менее 0.6 мм, причем содержание частиц с размером менее 0.3 мм – более 50%; удельная поверхность частиц, определяемая по методу БЭТ –

0.45 м²/г), получаемого из несортированных шинных отходов. Сера и АПДДР вводились индивидуально и совместно. Перечень исследованных вяжущих с указанием их состава и режимов их приготовления приведен в табл. 1. Вяжущие были изготовлены в лабораторных условиях путем смешения в верхнеприводной мешалке HB10 DIGITAL (IKA-Werke GmbH & Co. KG, Германия) с винтовыми лопастями со скоростью вращения 600 об/мин в течение 3 мин при температурах 140 и 160 °С.

Анализ образцов вяжущих, содержащих серу, проводили методом оптической микроскопии с помощью тринокулярного микроскопа Micros 5000 (Micros, Австрия), снабженного фотокамерой Nikon e8400.

Испытания усталостной долговечности проводили по методу линейной амплитудной развертки (LAS) в соответствии с ПНСТ 81-2016 «Дороги автомобильные общего пользования. Материалы вяжущие нефтяные битумные. Метод определения усталостных характеристик» на реометре динамического сдвига Smart Pave серии Physica MCR (Anton Paar, Австрия). В качестве измерительной системы была выбрана система пластина-пластина. Диаметр окружности рабочих поверхностей пластин 25 или 8 мм. Устанавливаемый рабочий зазор между пластинами 2 мм. Величина зазора была выбрана исходя из условия, указанного в инструкции к прибору – значение величины зазора между пластинами должно быть, по меньшей мере, в 4 раза больше максимального размера частиц.

Сущность LAS-метода заключается в оценке сопротивления битумного вяжущего разрушению при циклическом нагружении при дискретном увеличении амплитуды деформации сдвига при средней климатической температуре региона эксплуатации асфальтобетонного покрытия согласно методикам ПНСТ 81-2016, АFSHO TP101. Деформация, при которой проводят испытание, увеличивается с каждым шагом на 1% в диапазоне от 1 до 30%. При каждом значении деформации выполняются 100 циклов нагружения при постоянной частоте 10 Гц. По полученным результатам строится график зависимости напряжения от деформации и рассчитывается количество циклов до разрушения при деформациях, которым подвергается асфальтобетонное покрытие: 2.5% («толстые» покрытия) и 5% («тонкие» покрытия).

Результаты и их обсуждение

Для измерения усталостной долговечности образцов, содержащих серу, была разработана методика предварительной подготовки образцов. Это было связано с тем фактом, что сера имеет тенденцию к выкристаллизации из вяжущего [5]. В то же время, при проведении испытаний на реометре динамического сдвига максимальный размер включений в образце не

Таблица 1. Состав модифицированных битумных вяжущих на основе БНД 60/90

№ образца	Шифр вяжущего	Состав, % масс.				Температура смешения, °С (время смешения 3 мин)
		БНД	МП	S	АПДДР	
1	БНД 60/90	100				140
2	МП10, 140	90	10			140
3	АПДДР12.5, 140	87.5			12.5	140
4	АПДДР12.5, 160	87.5			12.5	160
5	АПДДР12.5, 180	87.5			12.5	180
6	S10, 140	90		10		140
7	S20, 140	80		20		140
8	S30, 140	70		30		140
9	S10, 160	90		10		160
10	S20, 160	80		20		160
11	S30, 160	70		30		160
12	АПДДР12.5+S10, 140	77.5		10	12.5 (13.9*)	140
13	АПДДР12.5+S20, 140	67.5		20	12.5 (15.6*)	140
14	АПДДР12.5+S30, 140	57.5		30	12.5 (17.9*)	140

Обозначения: БНД – битум нефтяной дорожный марки БНД 60/90; МП – минеральный порошок марки МП-1; S – сера марки «Сульфотекс-АБ»; АПДДР – активный порошок дискретно девулканизированной шинной резины.

*концентрация АПДДР по отношению к битуму.

должен превышать $\frac{1}{4}$ зазора между пластинами реометра, таким образом, при зазоре 2 мм размер включений не должен быть более 500 мкм. Наличие включений с большими размерами приводит к высокому разбросу определяемых показателей относительного их среднего значения.

При проведении исследований опытных образцов модифицированных вяжущих, содержащих серу, было отмечено появление на поверхности образцов кристаллов серы через 72 ч после их изготовления и хранения при нормальных условиях. Как показали данные оптической микроскопии (рис. 1), самые

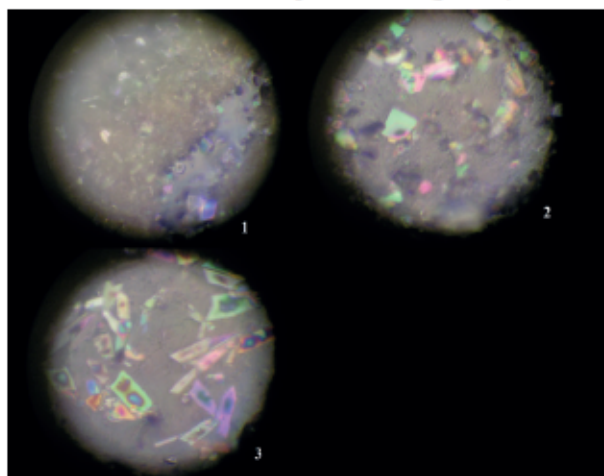


Рис. 1. Микрофотографии поверхности серо-битумных вяжущих:

1 – содержание серы 10%; 2 – содержание серы 20%;
3 – содержание серы 30% мас.
(увеличение $\times 400$, съемка произведена через 7 суток после приготовления образцов).

большие кристаллы на поверхности образца образуются при содержании серы в вяжущем в количестве 30% мас.: размер кристаллов в образце № 8 в 1.5 раза больше, чем в образце № 7, и в 13.5 раз больше, чем в образце № 6. Таким образом, видно, что размеры кристаллов серы, образующихся на поверхности битумного вяжущего (рис. 1), определяются количеством серы, вводимой в битум. Концентрация серы в битумном вяжущем, при которой на их поверхности были обнаружены кристаллы, составила 8-10% масс.

Для оценки наличия кристаллической серы в объеме образца вяжущие, содержащие 30% серы (образцы № 8 и 14, табл. 1), спустя месяц после их изготовления были подвержены замораживанию в жидком азоте с целью анализа поверхности сколов образцов. На местах сколов кристаллы не были обнаружены. Дальнейшие наблюдения показали, что на поверхности сколов серо-битумных вяжущих кристаллы серы появляются аналогичным образом, приблизительно через 72 ч после формирования новой поверхности образца.

При отработке методики предварительной подготовки образцов для оценки скорости расплавления кристаллов и времени начала последующей кристаллизации, образец модифицированного вяжущего, содержащий 30% мас. серы (см. рис. 2, изображение 1), был подвергнут нагреванию при 120 °С в течение 4 мин (рис. 2, изображения 2 и 3) с последующим охлаждением в воздушной среде до температуры 16 °С (средняя климатическая температура региона эксплуатации асфальтобетонного покрытия согласно методикам ПНСТ 81-2016, AFSHO TP101). Черные

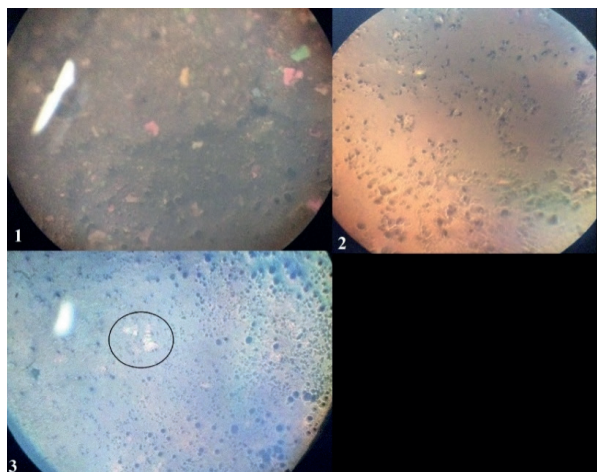


Рис. 2. Микрофотографии поверхности образца вяжущего с серой (№ 8):

1 – до отжига; 2 – через 15 мин после отжига;
3 – 76 мин после отжига (увеличение $\times 400$).

включения на рис. 2 (изображения 2 и 3) – это следы расплавившихся кристаллов.

Было установлено, что кристаллы серы на поверхности образца при температуре 120 °С полностью расплавились в течение 4 мин, и, как демонстрируют данные оптической микроскопии, через 15 мин после начала охлаждения на поверхности вяжущего кристаллов выявлено не было. Образование первых кристаллов серы было отмечено через 76 мин.

Согласно приведенным выше данным, была предложена следующая *методика предварительной подготовки образцов серосодержащих образцов*

модифицированных вяжущих для испытаний на усталостную долговечность. Испытуемый образец помещали между пластинами реометра, предварительно нагретыми до $T = 66$ °С, и в течение 3 мин нагревали до $T = 120$ °С, выдерживали при этой температуре 4 мин, затем в течение 6 мин охлаждали до $T = 16$ °С (температура определения усталостной долговечности). При этой температуре образец термостатировали в течение 20 мин и затем начинали измерения.

В настоящей работе в качестве базовых образцов, с которыми проводили сравнение модифицированных битумных вяжущих, были выбраны: битум БНД 60/90 и вяжущее, содержащее минеральный наполнитель МП10 (соответственно, образцы № 1 и 2, табл. 1).

При проведении усталостных испытаний по ПНСТ 81-2016 на реометре динамического сдвига были получены графические зависимости напряжения сдвига (τ) от деформации сдвига (γ). Был выполнен анализ полученных данных и по формуле $G = \frac{\tau}{\gamma}$

рассчитан модуль сдвига G при разных деформациях сдвига (табл. 2).

Из данных табл. 2 видно, что для базовых и модифицированных образцов вяжущих модуль сдвига битума имеет максимальные значения в области деформаций сдвига 10-15% мас. Введение в битум минерального наполнителя приводит к незначительному снижению модуля сдвига по сравнению с БНД 60/90 при сохранении тенденции к повышению данного показателя с ростом величины деформации.

Таблица 2. Влияние состава модификаторов на модуль сдвига серо-содержащих вяжущих в зависимости от деформации сдвига

№ образца	Шифр вяжущего	Модуль сдвига (Па) при деформации сдвига		
		3%	5%	10%
1	БНД 60/90	154 000	167 000	247 000
2	МП10, 140	129 000	141 000	211 000
3	АПДДР12.5, 140	138 000	153 000	242 000
6	S10, 140	3 500 000	3 600 000	-
7	S20, 140	4 300 000	4 351 000	-
8	S30, 140	6 433 333	6 520 000	-
12	АПДДР12.5+S10, 140	3 260 000	3 310 000	-
13	АПДДР12.5+S20, 140	4 033 333	4 100 000	-
14	АПДДР12.5+S30, 140	5 433 333	5 450 000	-

Модуль сдвига резино-битумного вяжущего ниже модуля битума при деформации сдвига до 10% и мало изменяется в области деформации сдвига 10–20%. Данный показатель для серо-битумного и серо-резино-битумного вяжущего уже при деформации сдвига 3% достигает максимума, незначительно изменяясь в области деформации

сдвига 3–5%, он существенно превосходит G базовых образцов (№ 1-3), достигая значений от $3.5 \cdot 10^6$ до $6.4 \cdot 10^6$ Па.

Данные по усталостной долговечности вяжущих (число циклов до разрушения при деформациях 2.5 и 5%), полученные при испытаниях по ПНСТ 81-2016, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Влияние состава модификаторов на усталостную долговечность образцов вяжущих

№ образца	Шифр вяжущего	Число циклов до разрушения N_f при деформации	
		2.5%	5%
1	БНД 60/90	213 455	12 951
2	МП10, 140	301 705	16 516
3	АПДДР12.5, 140	1 037 140	40 419
4	АПДДР12.5, 160	1 108 588	31 915
5	АПДДР12.5, 180	1 155 195	38 346
6	S10, 140	140 880	10 861
7	S20, 140	179 918	11 834
8	S30, 140	335 161	12 317
9	S10, 160	147 481	9 145
10	S20, 160	194 685	13 141
11	S30, 160	369 006	19 338
12	АПДДР12.5+S10, 140	1 107 641	39 808
13	АПДДР12.5+S20, 140	1 265 644	43 863
14	АПДДР12.5+S30, 140	3 301 351	100 580
15	АПДДР18, 160	3 217 322	82 586

Из приведенных в табл. 3 данных видно, что введение минерального порошка лишь незначительно улучшает усталостную долговечность базового битума, в то время как введение в битум эластичного наполнителя – АПДДР приводит к приблизительно трехкратному увеличению числа циклов до разрушения для покрытий, подвергающихся деформации 5%, и пятикратному увеличению для покрытий, подвергающихся деформации 2.5%. При этом температура приготовления резино-битумного вяжущего в диапазоне 140–180 °С практически не влияет на его усталостную долговечность.

Усталостная долговечность серо-битумных вяжущих, приготовленных при 140 и 160 °С, несколько уменьшается по сравнению с базовым битумом при содержании серы 10 и 20% мас. При дальнейшем увеличении содержания серы в вяжущем до 30% мас. усталостная долговечность вяжущего возрастает: для образца серо-битумного вяжущего, приготовленного при 160 °С, – приблизительно в 1.6 раза (для покрытий, подвергающихся деформациям 2.5 и 5%) и для образца, приготовленного при 140 °С, – в 1.6 раза (для покрытия, подвергающегося деформации 2.5%). В то же время для образца, приготовленного при 140 °С, не наблюдалось изменения усталостной долговечности по сравнению с базовым битумом для покрытия, подвергающегося деформации 5%.

При изготовлении тройной смеси модифицированного вяжущего, при постоянной концентрации АПДДР – 12.5% мас., введение 10% мас. серы обеспечивает сопоставимый уровень усталостной долговечности в сравнении с резино-битумным вяжущим,

включающим 12.5% мас. резиновой крошки. При увеличении содержания серы в вяжущем до 20% мас. наблюдается тенденция к повышению числа циклов до разрушения при деформациях 2.5 и 5% по сравнению с резино-битумным вяжущим. В тройной системе битум/сера/эластичный наполнитель при концентрации серы 30% мас. усталостная долговечность вяжущего существенно возрастает: в 3.2 раза по сравнению с резино-битумным вяжущим и в 16.5 раз по сравнению с исходным битумом.

Можно предположить, что наблюдаемое увеличение усталостной долговечности обусловлено увеличением концентрации АПДДР по отношению к битуму (для этих трех образцов концентрация АПДДР в битуме составляет 13.8, 15.6 и 17.9% мас., соответственно), а не связано с эффектом взаимодействия серы с компонентами в исследованной тройной системе. В пользу этого свидетельствуют дополнительно проведенные испытания контрольных образцов резинобитума, содержащего 18% АПДДР (см. табл. 3, шифр образца № 15 АПДДР18, 160).

На динамические свойства битумных вяжущих оказывают влияние как концентрация эластичных наполнителей, так и степень их диспергирования в битуме [3]. Улучшение динамических свойств битумных вяжущих при введении измельченных вулканизаторов, получаемых методом высокотемпературного сдвигового измельчения, как следствие, может быть связано с затруднением роста трещин в условиях циклических деформаций, что было отмечено в работе [12] при испытаниях полимерных композиционных материалов с гетерогенной структурой.

Выводы

Исследована усталостная долговечность при температуре 16 °С образцов битума БНД 60/90 и вяжущих на основе того же битума, содержащих добавки минерального порошка, серы и активного порошка дискретно девулканизированной резины. Испытания выполнены на реометре динамического сдвига в соответствии с ПНСТ 81-2016. Разработана и опробована методика предварительной подготовки образцов при исследовании серо-содержащих вяжущих.

Показано, что введение неактивного наполнителя – минерального порошка лишь незначительно улучшает усталостную долговечность базового битума, в то время как введение в битум эластичного наполнителя – АПДДР приводит к приблизительно трехкратному увеличению числа циклов до разрушения при деформации 5% и пятикратному увеличению – при деформации 2.5%. При этом температура

приготовления резино-битумного вяжущего в диапазоне 140–180 °С практически не влияет на его усталостную долговечность.

Показано, что применение серы в составе вяжущего, не оказывая существенного влияния на усталостную стойкость вяжущего, позволяет в тройной системе битум/сера/эластичный наполнитель, во-первых, экономить достаточно дорогой битум, а, во-вторых, за счет снижения общей вязкости асфальтобетонной смеси достигать высоких усталостных характеристик, которые обеспечиваются за счет высокого наполнения битума продуктом вторичной переработки резин – АПДДР.

Научно-исследовательская работа выполнена за счет субсидии, выделенной ИХФ РАН на выполнение государственного задания, тема 0082-2014-0008 «Физико-химия наноструктур, наноматериалов и субмолекулярных соединений. Получение новых наноматериалов», АААА-А17-117040310008-5.

Список литературы:

1. Сагдеева Г.С., Патракова Г.Р. Переработка отходов производства и потребления с использованием их ресурсного потенциала // Вестник Казанского технологического университета. 2014. Т. 17. № 6. С. 194–198.
2. Li B., Wang J., Cao G., Wang C., Yang X. Influence mechanism of crumb rubber characteristics on high-temperature performance for rubber modified asphalt binder // J. Basic Sci. and Eng. 2017. V. 25. № 2. P. 347–355.
3. Nikolskii V.G., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Zvereva U.G., Bekeshev V.G., Rochev V.Y., Kaplan A.M., Chekunaev N.I., Vnukova L.V., Styrikovich N.M., Gordeeva I.V. Development and properties of new nanomodifiers for road pavement // Russ. J. Phys. Chem. B. 2014. V. 8. № 4. P. 577–583.
4. An alternative asphalt binder, sulfur-extended asphalt (SEA). // US Department of Transportation Federal Highway Administration. FHWA-HIF-12-037. 13 p.
5. Kennepohl G., Logan A., Bean D.C. Conventional paving mixes with sulphur asphalt binders. // J. Proceed. Ass. Asphalt Paving Technologists. 1975. V. 44. P. 485–518.
6. Burgess R.A., Deme I. Sulfur in asphalt paving mixes // J. Am. Chem. Soc. 1974. V. 140. P. 85–101.
7. Бродский С.А., Кондаков А.В. Перспективы федеральной минерально-сырьевой базы новой подотрасли промышленности – серных строительных композитов // Современные производительные силы. 2013. № 3. С. 82–96
8. Васильев Ю.Э., Мотин Н.В., Шубин А.Н. Инновационные экологически чистые серосодержащие композиционные материалы для транспортного

References:

1. Sagdeyeva G.S., Patrakova G.R. Recycling of production and consumption wastes using their resource potential // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta (Bulletin of Kazan Technological University). 2014. V. 17. № 6. P. 194–198 (in Russ.).
2. Li B., Wang J., Cao G., Wang C., Yang X. Influence mechanism of crumb rubber characteristics on high-temperature performance for rubber modified asphalt binder // J. Basic Sci. and Eng. 2017. V. 25. № 2. P. 347–355.
3. Nikolskii V.G., Dudareva T.V., Krasotkina I.A., Zvereva U.G., Bekeshev V.G., Rochev V.Y., Kaplan A.M., Chekunaev N.I., Vnukova L.V., Styrikovich N.M., Gordeeva I.V. Development and properties of new nanomodifiers for road pavement // Russ. J. Phys. Chem. B. 2014. V. 8. № 4. P. 577–583.
4. An alternative asphalt binder, sulfur-extended asphalt (SEA). // US Department of Transportation Federal Highway Administration. FHWA-HIF-12-037. 13 p.
5. Kennepohl G., Logan A., Bean D.C. Conventional paving mixes with sulphur asphalt binders. // J. Proceed. Ass. Asphalt Paving Technologists. 1975. V. 44. P. 485–518.
6. Burgess R.A., Deme I. Sulfur in asphalt paving mixes // J. Am. Chem. Soc. 1974. V. 140. P. 85–101.
7. Brodskiy S.A., Kondakov A.V. Prospects for the formation of the mineral resource base of the new sub-branch – sulfur construction composites // Sovremennyye proizvoditelnyye sily (Contemporary Productive Forces). 2013. № 3. P. 82–96 (in Russ.).
8. Vasil'ev Y.E., Motin N.V., Shubin A.N. Innovative environmentally friendly sulfur-containing composite materials for transport construction. //

строительства // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 12. С. 8–13.

9. Андронов С.Ю., Васильев Ю.Э., Тимохин Д.К., Репин А.М., Репина О.В., Талалай В.В. Производство и применение сероасфальтобетонных композиционных покрытий на автомобильных дорогах и мостах // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 3. <http://naukovedenie.ru / PDF / 104TVN316.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

10. Morrison G.R., Hesp S.A.M. A new look at rubber-modified asphalt binders // J. Mater. Sci. 1995. V. 30. № 10. P. 2584–2590.

11. Way G.B., Kaloush K.E., Biligiri K.P. Asphalt-rubber standard practice guide. Rubber Pavements Association, 2012. 107 p.

12. Кулезнев В.Н. Смеси полимеров. М.: Химия, 1980. 304 с.

Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo (Industrial and Civil Engineering). 2015. № 12. P. 8-13 (in Russ.).

9. Andronov S.Yu., Vasil'ev Yu.EH., Timohin D.K., Repin A.M., Repina O.V., Talalaj V.V. Production and application the seroasfaltobetonykh of composite coverings on highways and bridges // Internet-zhurnal «Naukovedenie» (Scientific open access journal «Naukovedenie»). 2016. V 8. № 3. <http://naukovedenie.ru / PDF / 104TVN316.pdf> (in Russ.).

10. Morrison G.R., Hesp S.A.M. A new look at rubber-modified asphalt binders // J. Mater. Sci. 1995. V. 30. № 10. P. 2584–2590.

11. Way G.B., Kaloush K.E., Biligiri K.P. Asphalt-rubber standard practice guide. Rubber Pavements Association, 2012. 107 p.

12. Kuleznev V.N. Polymer blends. Moscow: Khimiya Publ., 1980. 304 p. (in Russ.)

Об авторах:

Фролов Иван Алексеевич, аспирант кафедры химии и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Дударева Татьяна Владимировна, старший научный сотрудник, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Косыгина, 4). ResearcherID E-6535-2014

Красоткина Ирина Александровна, старший научный сотрудник, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Косыгина, 4).

Никольский Вадим Геннадиевич, кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией физико-химии высокодисперсных материалов, Институт химической физики им. Н.Н. Семенова Российской академии наук (119991, Москва, ул. Косыгина, 4).

Люсова Людмила Ромуальдовна, доктор химических наук, профессор, заведующий кафедрой химии и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86).

Наумова Юлия Анатольевна, доктор химических наук, профессор кафедры химии и технологии переработки эластомеров им. Ф.Ф. Кошелева, Институт тонких химических технологий им. М.В. Ломоносова ФГБОУ ВО «Московский технологический университет» (119571, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 86). ResearcherID C-1077-2018.

About the authors:

Ivan A. Frolov, Postgraduate Student of the F.F. Koshelev Chair of Chemistry and Processing Technology of Elastomers, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Uliana G. Zvereva, Junior Researcher, N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina St., Moscow, 119991, Russia). ResearcherID E-6535-2014.

Tatyana V. Dudareva, Senior Researcher, N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina St., Moscow, 119991, Russia).

Irina A. Krasotkina, Senior Researcher, N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina St., Moscow, 119991, Russia). ResearcherID 6505759985.

Vadim G. Nikolskiy, Ph.D. (Phys.-Math.), Head of Laboratory of Physical Chemistry of Highly Dispersed Materials, N.N. Semenov Institute of Chemical Physics, Russian Academy of Sciences (4, Kosygina St., Moscow, 119991, Russia).

Ludmila R. Lyusova, Dr.Sc. (Chemistry), Professor, Head of the F.F. Koshelev Chair of Chemistry and Processing Technology of Elastomers, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia).

Yulia A. Naumova, Dr.Sc. (Chemistry), Professor of the F.F. Koshelev Chair of Chemistry and Processing Technology of Elastomers, M.V. Lomonosov Institute of Fine Chemical Technologies, Moscow Technological University (86, Vernadskogo Pr., Moscow 119571, Russia). ResearcherID C-1077-2018.