

Строительные материалы и изделия

УДК 625.851

© А. А. Афанасенко, научн. сотрудник

© П. П. Яцевич, научн. сотрудник

© А. В. Корончик, мл. научн. сотрудник

(Белорусский национальный технический университет, филиал БНТУ «Научно-исследовательский политехнический институт», Центр научных исследований и испытаний дорожно-строительных и гидроизоляционных материалов, Минск, Республика Беларусь)
E-mail: alexxxela@mail.ru

DOI 10.23968/1999-5571-2024-21-3-59-70

© A. A. Afanasenko, research worker

© P. P. Yatsevich, research worker

© A. V. Koronchik, junior research worker

(Belarusian National Technical University, Branch of BNTU «Scientific and Research Polytechnic Institute», Center for Scientific Research and Testing of Road Construction and Waterproofing Materials, Minsk, Republic of Belarus)
E-mail: alexxxela@mail.ru

АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР МЕТОДОВ СТАБИЛИЗАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ С ПОВЫШЕННЫМ СОДЕРЖАНИЕМ ВЯЖУЩЕГО

ANALYTICAL REVIEW OF METHODS FOR STABILIZING ASPHALT CONCRETE MIXTURES WITH INCREASED BINDER CONTENT

Рассмотрена проблематика использования разнообразных видов волокон в асфальтобетонных смесях с повышенным содержанием вяжущего, с особым акцентом на анализе целлюлозных волокон и гранул, получаемых на их основе. Изучаются как преимущества, так и недостатки применения различных типов волокон, включая их влияние на технологические процессы и характеристики асфальтобетонных смесей. На основании проведенного анализа предлагается стратегия разработки собственной волокнистой добавки на основе местного сырья. Это первый шаг к улучшению технических параметров асфальтобетонных смесей и снижению их производственных затрат.

Ключевые слова: асфальтобетон, волокна, целлюлоза, гранулы.

This article considers the issue of utilizing various types of fibers in asphalt concrete mixtures with increased binder content, with a particular focus on the analysis of cellulose fibers and granules derived from them. Both the advantages and drawbacks of employing different fiber types are explored, including their impact on the technological processes and characteristics of asphalt concrete mixtures. Based on the analysis carried out within the study, a strategy for developing a proprietary fibrous additive based on local raw materials is proposed. This marks the initial step towards improving the technical parameters of asphalt concrete mixtures and reducing the production costs.

Keywords: asphalt concrete, fibers, cellulose, granules.

Введение

Одним из путей повышения надежности и долговечности асфальтобетонных дорожных покрытий является применение в качестве верхнего слоя асфальтобетонов повышенной плотности, при этом увеличение плотности асфальтобетона зачастую

связано с ростом содержания вяжущего вещества. С учетом общемирового опыта эксплуатации дорожных покрытий к наиболее долговечным следует отнести щебеночно-мастичный [1] и литой асфальтобетон [2], где содержится большее количество битума, чем в традиционных материалах, а с учетом

собственных исследований и разработок — еще и асфальтобетон, занимающий промежуточное положение между указанными, так называемый полулитой асфальтобетон [3]. Использование в качестве верхнего слоя покрытия таких асфальтобетонных смесей приводит к значительному увеличению срока службы всей дорожной конструкции.

С целью предотвращения расслаивания и обеспечения структурной устойчивости таких смесей в строительной практике широко используются специализированные стабилизирующие добавки. В настоящее время предлагается использовать большое разнообразие дорогостоящих импортных структурирующих добавок. Несмотря на их эффективность, стоимость этих добавок может стать существенным фактором, влияющим на общую экономическую целесообразность проекта. В этом контексте поиск альтернативных материалов, способных предотвратить сегрегацию смеси и поддерживать ее стабильность в процессе производства транспортировки и укладки, становится неотъемлемой частью стратегии обеспечения долговечности и эффективности асфальтобетонных покрытий.

Классификация добавок из волокон

На протяжении последних десятилетий значительное внимание уделяется исследованиям и применению волокон в асфальтобетонных смесях с целью улучшения физико-механических и технологических свойств асфальтобетона. Использование различных видов волокон предоставляет инженерам и строителям широкий спектр инструментов для достижения улучшенных характеристик данных смесей.

Рассматривая мировой опыт использования волокон в асфальтобетонных смесях, выделим следующие основные категории [4]:

- волокна растительного происхождения;
- минеральные волокна;
- синтетические полимерные волокна;
- волокна из отходов.

Целлюлозные волокна (рис. 1), представляющие собой волокна растительного происхождения, чаще всего извлекаются из древесины, могут быть получены при вторичной переработке макулатуры. Эти волокна отличаются ветвистой структурой и обладают высокой абсорбцией, что влияет на их способность удерживать значительное количество связующего в составе асфальтобетонных смесей. По информации литературных источников [5, 6] целлюлозные волокна на данный момент являются одним из наиболее применимых компонентов в составе щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей (Stone Mastic/Matrix Asphalt, SMA).

Целлюлозные волокна могут поставляться в двух основных формах: в рассыпном виде или в виде гранул. С учетом особенностей приготовления асфальтобетона в заводских условиях Республики Беларусь практически во всех случаях применяются волокна в виде гранул.

Другие волокна растительного происхождения не нашли столь широкого распространения в дорожном строительстве, однако в исследовательских статьях и докладах [7–13] зачастую упоминается применение волокон из джута, хлопка, льна, из листьев (например, сизаля) или фруктовых волокон, таких как койра (рис. 2).

К преимуществам натуральных волокон относятся низкая стоимость и приемлемые прочностные и механические характеристики



Рис. 1. Целлюлозные волокна

ки, что делает их весьма заманчивым компонентом для асфальтобетона, более того, экологичность натуральных волокон добавляет им привлекательности. Тем не менее важно отметить и некоторые недостатки, сдерживающие их широкое применение в дорожной отрасли, такие как существенная склонность к поглощению влаги, а в случае хранения в условиях повышенной влажности зачастую происходит органическое разрушение материала. Дополнительным фактором является потенциальное разрушение натуральных волокон в условиях высоких температур, что характерно для приготовления асфальтобетонных смесей с повышенным содержанием вяжущего.

При анализе минеральных волокон можно выделить две основные категории: волокна природного происхождения, такие как асбест, и искусственные волокна (рис. 3), полученные в ходе технологических процессов.

Минеральные волокна искусственного происхождения, также известные как минеральная вата или каменная вата, формируются путем плавления минеральных материалов, а затем физического формирования волокон путем выдувания или экструзии [14]. Используемые для производства минераль-

ных волокон минералы включают шлак или смесь шлака с горными породами, базальт, брусит, железную руду и др. [15–17].

Асбестовые волокна были первым типом волокон, которые использовались в асфальтобетоне и получили широкое применение в горячих асфальтовых смесях в США с 1920-х по 1960-е годы, а затем были постепенно заменены из-за экологических и медицинских проблем, связанных с их использованием [18].

Стальные волокна были использованы в довольно экзотических целях — для производства электропроводящего асфальтобетона, который можно использовать для борьбы с гололедом или для «заживления» микротрещин [19, 20]. Несмотря на широкий спектр возможных применений стальных волокон, в основном они использовались в исследовательских целях, так как их эффективность ограничена коррозией при воздействии влаги, что делает металлические волокна менее предпочтительными в долгосрочной перспективе.

Стеклянные волокна представляют собой особую группу минеральных волокон, которые обладают выдающимися свойствами, пригодными для использования в дорожном



Рис. 2. Волокна растительного происхождения



Рис. 3. Минеральные волокна

строительстве. Эти волокна характеризуются высоким модулем на растяжение, достигающим примерно 60 ГПа, низким удлинением (3–4 %), высоким упругим восстановлением (100 %). Однако следует отметить, что стеклянные волокна обладают хрупкостью и требуют осторожного обращения при их использовании [21].

Синтетические полимерные волокна (рис. 4) в основном представлены полиэстером, полипропиленом, полипарафенилен-терефталамидом (арамид) и комбинациями полимеров. Они являются наиболее распространенными в асфальтобетонных смесях, кроме того, в эту категорию входят нейлон и другие менее распространенные матери-

лы. Синтетические полимерные волокна, такие как полиэстер, обладают высокой термостойкостью и химической стойкостью. Полипропилен обладает высокой прочностью и устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, что улучшает долговечность асфальтобетонного покрытия. Производство синтетических волокон обычно включает процесс протягивания расплава полимера через мелкие отверстия.

Арамидные волокна, согласно имеющимся данным [22], сжимаются при высоких температурах, что способствует предотвращению деформации дорожного покрытия в жарких климатических условиях. Также эти волокна известны своей

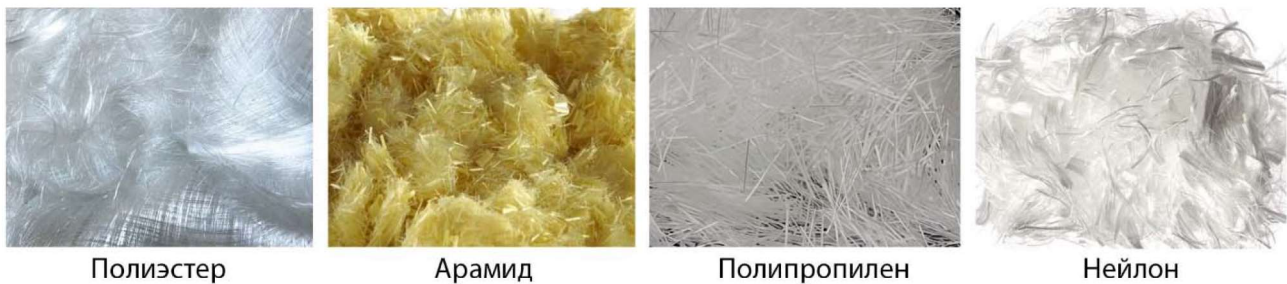


Рис. 4. Синтетические волокна

высокой прочностью и устойчивостью к ударным нагрузкам.

В соответствии с данными лабораторных исследований синтетические полимерные волокна [23–26] придают асфальтовым смесям улучшенные механические свойства, в том числе устойчивость к усталости, увеличивают сопротивление к деформациям, что способствует повышению стойкости дорожного покрытия к нагрузкам и воздействию окружающей среды. Однако из-за отличий в точках плавления различных полимеров требуется учитывать эту особенность при их введении в горячую асфальтовую смесь.

Возрастающее внимание к экологической устойчивости в дорожном строительстве способствовало растущему интересу к повторному использованию материалов, которые ранее подвергались утилизации, включая волокна, полученные из различных источников отходов. Одним из наиболее изучаемых в этом направлении материалов являются волокна, полученные из отработанных шин автомобильных покрышек. Исследования, проведенные в данной области, подтверждают, что повторное использование кордовых волокон приводит к улучшению прочностных характеристик, устойчивости к деформациям, а также влагостойкости асфальтобетонных смесей. К примеру, в работе [27] проведено исследование применения волокон, полученных из переработанных автомобильных шин, и показано, что эти волокна демонстрируют хорошие характеристики и могут применяться в асфальтобетонных смесях SMA как альтернатива целлюлозным волокнам.

Таким образом, в течение последних 40 лет проведено обширное количество исследований, посвященных вопросам использования волокон в асфальтобетоне. Большинство этих исследований направлено на изучение поведения асфальтовых вяжущих и асфальтобетонных смесей, модифицированных волокнами как в лабораторных, так

и в полевых условиях. При этом результаты оказались неоднозначными, особенно в вопросе применения волокон в плотных асфальтобетонных смесях.

Наблюдения показывают, что в некоторых случаях волокна проявляют положительные эффекты, такие как увеличение устойчивости к колееобразованию и повышенной трещиностойкости, но в других случаях значительных улучшений не фиксировалось. Полученные результаты свидетельствуют о том, что влияние волокон в значительной степени зависит от состава и свойств конкретной асфальтобетонной смеси. В ситуациях, где волокна не обеспечивают существенных улучшений, их эффективность может подвергаться сомнению с экономической точки зрения.

В смесях типа SMA волокна согласно практике приводят к равномерному распределению вяжущего и предотвращают сегрегацию смеси, поэтому находят широкое применение. Наиболее известные европейские специально выпускаемые для дорожного строительства добавки имеют коммерческие названия ARBOCEL, VIATOP, TECHNOCEL, TOPCEL, ANTROCEL, ITERFIBRA и др. ARBOCEL® фирмы J. Rettenmaier & Sohne GmbH (JRS, Германия), представляет собой целлюлозные волокна в чистом виде, полученные из технической целлюлозы. Наиболее предпочтительной для стабилизации асфальтобетонных смесей является ARBOCEL® марки ZZ 8/1. В данном составе содержится от 75 до 85 % целлюлозных волокон. Гранулированные стабилизирующие добавки на основе данных волокон имеют коммерческое название VIATOP®. Широкий ассортимент VIATOP® включает в себя несколько различных видов: premium, 66, plus C 25, plus CT 40, plus CT 80-AC, plus AD 10, plus FEP и plus RC (рис. 5).

За последние годы линейка выпускаемой продукции на битуме существенно снизилась, а на лидирующие позиции в качестве связующего выходит воск Фишера — Тропша (Fischer—Tropsch Wachs). Применение



Рис. 5. Стабилизирующие добавки VIATOP*

воска обусловлено результатами последних исследований [28–30], которые показали положительное влияние воска на реологические свойства битума. Так, компания CFF GmbH & Co. KG (CFF, Германия), производит TOPCEL* add FT60 (рис. 6), который представляет собой составную добавку, содержащую 59 % технического целлюлозного волокна и 41 % воска.

Результаты

Стоимость существующих европейских стабилизирующих добавок может достигать 2 евро за килограмм, что приводит к увеличению стоимости асфальтобетонной смеси, поэтому возникает необходимость производства подобных веществ с использованием местных материалов, а с целью снижения себестоимости конечного продукта следует учесть возможность использования в составе добавки существующих местных отходов промышленности.

На территории Республики Беларусь производятся гранулированные стабилизирующие добавки, выпускаемые в соответствии с СТБ 1769–2013, состоящие из целлюлозных

волокон (переработанная макулатура) и связующего вещества (смесь поверхностно-активного вещества, битума и индустриального масла), предназначенные для введения в щебеночно-мастичную асфальтобетонную смесь с целью дисперсного армирования вяжущего и исключения расслаивания смеси во время предварительного хранения в накопительных бункерах и при транспортировании.

В БНТУ также ведутся работы по стабилизации асфальтобетонных смесей. Одной из задач являлось получение добавки, которая обеспечит не только устойчивость смеси к сегрегации, но и приведет к повышению долговременной прочности, устойчивости к старению, а также к снижению стоимости асфальтобетона, который в своем составе содержит структурирующие добавки.

В лабораторных условиях была создана и апробирована стабилизирующая добавка для асфальтобетонной смеси, которая в своем составе содержит целлюлозное волокно, битум, синтетические полимерное волокно и термостабилизатор. При этом для предотвращения расслаивания асфальтобе-



Рис. 6. Стабилизирующая добавка TOPCEL* add

тонной смеси требуется введение данной добавки в состав асфальтобетона в количестве 0,3–0,5 % от минеральной части (рис. 7).

Наличие целлюлозного волокна в составе добавки позволяет обеспечить хорошее смазывание битума, тем самым стабилизируя смесь и увеличивая ее устойчивость. В качестве целлюлозного волокна может использоваться измельченная бумага, для снижения стоимости конечного продукта рекомендуется применять измельченную макулатуру (за исключением картона).

Синтетическое полимерное волокно, входящее в состав данной добавки, относится к невозвратным отходам от производства искусственного меха, нетканого полотна и ватина (отход фабрики по производству мягких игрушек). Органические и синтетические волокна позволяют создать пространственный длинноволоконистый каркас, обеспечив тем самым повышение долговременной прочности асфальтобетона.

Термостабилизатор позволяет повысить устойчивость добавки к слипанию, а также уменьшить термоокислительные процессы в пленке битума, что обеспечивает термостабильность асфальтобетонной смеси. В качестве термостабилизатора могут использоваться любые антиоксиданты или антиозонанты. Наибольший эффект достигается при использовании веществ с торговыми названиями Antigene 3С,

Antioxidant С, Antioxidant 4010, Eastozone, Flexzone 3С, Nocrac 810 NA, Nonox, Ozonone, Permanax 115, Santoflex IP, Santoflex 36, Topanol G и др.

Добавка изготавливалась следующим образом. В установленных пропорциях производили смешивание синтетического полимерного волокна с целлюлозным до получения однородной массы, после чего добавляли битум. Битум предварительно разогревали до рабочей температуры, при этом в его состав вводили термостабилизатор, и полученное вяжущее перемешивали в течение 20–40 секунд. Образовавшуюся композицию перемешивали до получения однородной консистенции и гранулировали.

Для экспериментальной проверки полученной добавки и определения оптимального компонентного состава были произведены лабораторные исследования, при этом изготавливались различные серии состава, результаты действия добавки оценивались на основании определения свойств контрольного состава щебеночно-мастичной асфальтобетонной смеси (рис. 8).

При приготовлении смеси использовался битум БНД 90/130 в количестве 6,6 % от минеральной части. Из полученной смеси по СТБ 1115–2013 были изготовлены образцы цилиндры диаметром 71,4 мм, которые испытывались в соответствии с методикой СТБ 1115–2013 для горячего асфальтобето-

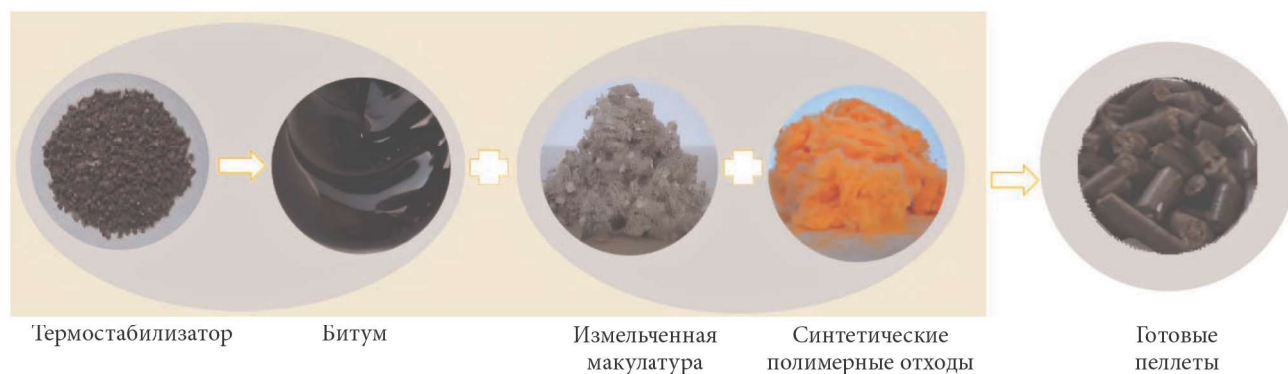


Рис. 7. Стабилизирующая добавка, разработанная в БНТУ

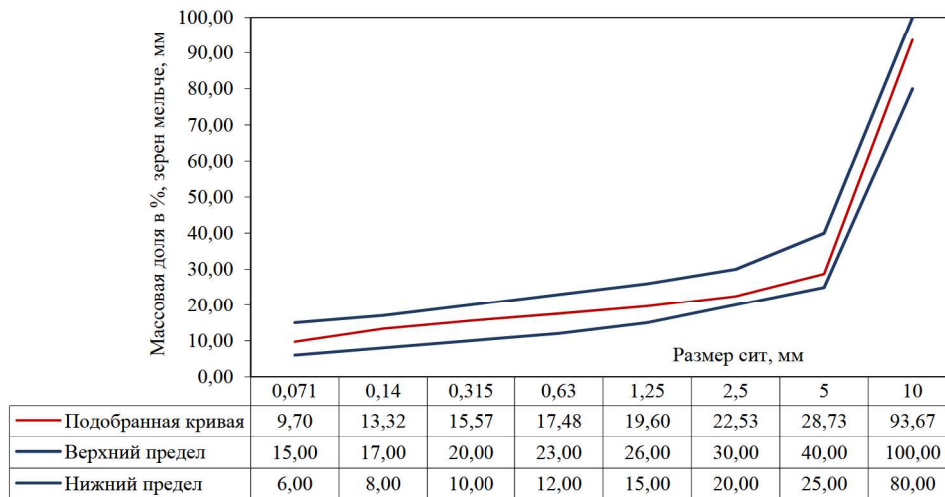


Рис. 8. Гранулометрический состав щебеночно-мастичной смеси

на, кроме этого, был определен показатель изменения свойств асфальтобетона после прогрева (старение) как отношение предела прочности при растяжении при 0 °С до прогрева к пределу прочности при растя-

жении после прогрева. Прогрев осуществлялся в сушильном шкафу при температуре 163 °С и времени прогрева восемь часов. Результаты исследований представлены в табл. 1.

Таблица 1

Физико-механические показатели щебеночно-мастичной смеси

№ п/п	Содержание компонента в добавке, %				Содержание добавки в смеси, % от минеральной части	Показатели			
	Синтетический полимерный отход	Измельченная макулатура	Термостабилизатор (Диافلэн ФП)	Битум (БНД 60/90)		Стекание вяжущего, %	Предел прочности при растяжении, при 0 °С, МПа	Предел прочности при сжатии, при 50 °С, МПа	Коэффициент старения
1	59	20	9	12	0,1	0,32	2,14	0,92	0,89
2	37	37	12	14	0,1	0,29	2,01	0,88	0,90
3	31	60	3	6	0,2	0,23	1,98	0,88	0,87
4	46	40	6	8	0,2	0,26	2,08	0,90	0,88
5	66	10	12	12	0,3	0,34	2,23	0,99	0,92
6	20	63	3	14	0,3	0,13	2,12	0,93	0,87
7	40	48	6	6	0,4	0,14	2,21	0,99	0,90
8	44	39	9	8	0,4	0,15	2,20	0,97	0,91
9	18	61	9	12	0,5	0,11	2,18	0,94	0,93
10	38	36	12	14	0,5	0,16	2,23	0,98	0,94
11	69	22	3	6	0,6	0,19	2,43	1,12	0,92
12	48	38	6	8	0,6	0,11	2,36	1,02	0,93
13	52	33	3	12	0,7	0,16	2,41	1,06	0,91
14	40	40	6	14	0,7	0,10	2,39	1,04	0,92
15	42	41	9	8	0,8	0,08	2,39	1,08	0,92
16	24	58	12	6	0,8	0,07	2,26	1,01	0,93

По результатам контрольных замеров аналитически установлен следующий состав стабилизирующей добавки: целлюлозное волокно (измельченная макулатура) 39–48 %, битум 8–12 %, волокно синтетическое (отход промышленности) 38–47 %, термостабилизатор 6–9 %.

После определения оптимальных пределов состава добавки произвели контрольное сравнение полученного стабилизатора с аналогом европейского производства (VIATOR[®] premium). Ниже приведены сравнительные характеристики свойств щебеночно-мастичных смесей, при этом использовался тот же состав (см. рис. 8). Долговременная прочность асфальтобетона определялась на образцах-балочках размером 4×4×16 см при температуре 20 °С и напряжении 0,5 МПа. Результаты лабораторных испытаний сведены в табл. 2.

Обсуждение

Результаты экспериментальных исследований показали, что структурирующая добавка, разработанная в БНТУ, не уступает по своим физико-механическим показателям существующему зарубежному аналогу и превосходит его по показателю долговременной прочности, устойчивости к старению, а также с учетом использования материалов вторичной природы снижает стоимость асфальтобетонной смеси с повышенным содержанием вяжущего (в данном примере — щебеночно-мастичный асфальтобетон). Пря-

мой экономический эффект от применения добавки в зависимости от количественного содержания ее в смеси за счет снижения стоимости асфальтобетона составит от 2 до 6 %. Ожидаемый экономический эффект от применения добавки (за счет продления сроков службы дорожного покрытия), связанный с увеличением долговременной прочности, составит порядка 14–19 %. Следовательно, применение разработанной структурирующей и стабилизирующей добавки оправдано технически и экономически.

В контексте дальнейших исследований и разработок в области асфальтобетонных технологий нами рассматривается возможность в качестве составных компонентов добавки использовать вторичную резиновую крошку и отходы бумажной промышленности. Эти материалы имеют потенциал, способный привести к улучшению технических характеристик асфальтобетона, а также послужат как средства для снижения негативного воздействия на окружающую среду за счет их переработки и повторного использования. Планируется проведение дальнейших исследований, направленных на определение оптимальных пропорций и условий включения этих компонентов с целью максимизации их технических и экологических преимуществ.

Выводы

Одним из путей повышения надежности и долговечности асфальтобетонных покры-

Таблица 2

Сравнительные характеристики

№ п/п	Вид применяемой добавки	Количество добавки в смеси, % от минеральной части	Показатели		
			Стекание вяжущего, %	Коэффициент старения	Долговременная прочность, мин
1	VIATOR [®] premium	0,1	0,17	0,87	340
2	VIATOR [®] premium	0,3	0,14	0,88	370
3	VIATOR [®] premium	0,7	0,07	0,87	350
4	Разработанная	0,1	0,28	0,91	420
5	Разработанная	0,3	0,15	0,94	480
6	Разработанная	0,7	0,09	0,95	490

тий является применение асфальтобетонов с повышенным содержанием вяжущего. Специфика структуры таких асфальтобетонных смесей предусматривает присутствие в качестве основных структурных составляющих стабилизирующей (обычно волокнистой) добавки для дисперсного армирования вяжущего и предотвращения сегрегации асфальтобетонной смеси в процессе приготовления, транспортировки и укладки. Анализ наиболее распространенных существующих стабилизирующих добавок показал, что наибольшее их количество приходится на вещества, в состав которых входят целлюлозные волокна как наиболее эффективные и способные удерживать повышенное содержание битума на поверхности минерального материала.

Учитывая, что рассмотренные импортные стабилизирующие добавки имеют значительную стоимость, определены основные пути использования местного сырья, в частности отходов производства, для импортозамещения. На основании экспериментальных и теоретических исследований разработана собственная структурирующая и стабилизирующая добавка и намечены основные пути по оптимизации как технических, так и экономических аспектов ее производства.

Библиографический список

1. Занкович В. В. Щебеночно-мастичные асфальтобетоны для дорожных покрытий городских улиц: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2005. 168 с.
2. Веренько В. А. Новые материалы в дорожном строительстве. Минск: УП «Технопринт», 2004. 170 с.
3. Веренько В. А., Афанасенко А. А. Высокомодульные асфальтобетоны с повышенным содержанием вяжущего для дорожных покрытий // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета: сб. науч. тр. Харьков: ХНАДУ, 2006. Вып. 34–35. С. 82–96.
4. McDaniel R. S. Fiber Additives in Asphalt Mixtures / National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Transportation Research Board; National Cooperative Highway Research Program. Washington, DC: The National Academies Press. 2015. 50 p.
5. Кирюхин Г. Н., Смирнов Е. А. Строительство дорожных и аэродромных покрытий из щебеночно-мастичных асфальтобетонных смесей. Обзорная информация. М.: Б. и., 2003. 96 с.
6. Kolb K. H., Erhard H., Hoggenmuller F., Kast O. Splittmastixasphalt. Deutscher Asphaltverband (DAV), 1996. 27 p.
7. Oda S., Fernandes Jr. J. L., Ildefonso J. S. Analysis of Use of Natural Fibers and Asphalt Rubber Binder in Discontinuous Asphalt Mixtures // Construction and Building Materials. 2012. Vol. 26 (1). Pp. 13–20.
8. Hadiwardoyo S. P., Sumabrata J., Jayanti P. Contribution of Short Coconut Fiber to Pavement Skid Resistance // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 789. Pp. 248–254.
9. Das B. R., Banerjee P. K. Interface Bond and Compatibility of Jute with Asphalt // Composites Part B: Engineering. 2013. Vol. 53. Pp. 69–75.
10. Qiang X., Lei L., Yi-Jun C. Study on the Action Effect of Pavement Straw Composite Fiber Material in Asphalt Mixture // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 43. Pp. 293–299.
11. Xia C., Wu C., Liu K., Jiang K. Study on the Durability of Bamboo Fiber Asphalt Mixture // Materials. 2021. Vol. 14 (7). 1667.
12. Abiola O. S., Kupolati W. K., Sadiku E. R., Ndambuki J. M. Utilisation of Natural Fibre as Modifier in Bituminous Mixes: A Review // Construction and Building Materials. 2014. Vol. 54. Pp. 305–312.
13. Do Vale A., Casagrande M. D. T., Soares J. B. Behavior of Natural Fiber in Stone Matrix Asphalt Mixtures Using Two Design Methods // Journal of Materials in Civil Engineering. 2014. Vol. 26 (3). Pp. 457–465.
14. Chevik A., Nish A. Advanced Fiber-Reinforced Alkali-Activated Composites. Design, Mechanical Properties, and Durability. 1st ed. Elsevier, 2023. 522 p.
15. Morova N. Investigation of Usability of Basalt Fibers in Hot Mix Asphalt Concrete // Construction and Building Materials. 2013. Vol. 47. Pp. 175–180.
16. Guan B., Xiong R., He R., Chen S., Donghai D. Investigation of Usability of Brucite Fiber in Asphalt Mixture // International Journal of Pavement Research and Technology. 2014. Vol. 7 (3). Pp. 193–202.
17. Geckil T., Ahmedzade P. Effects of Carbon Fibre on Performance Properties of Asphalt Mixtures // The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering. 2020. Vol. 15, no. 2. Pp. 49–65.
18. Busching H. W., Elliott E. H., Reyneveld N. G. A State-of-the-Art Survey of Reinforced Asphalt Paving // Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists. 1970. Vol. 39. Pp. 766–798.
19. García Á., Schlangen E., van de Ven M., van Vliet D. Induction heating of mastic containing conductive fibers

and fillers // *Materials and Structures*. 2011. Vol. 44 (2). Pp. 499–508.

20. Dai Q., Wang Z., Hasan M. R. M. Investigation of Induction Healing Effects on Electrically Conductive Asphalt Mastic and Asphalt Concrete Beams Through Fracture-Healing Tests // *Construction and Building Materials*. 2013. Vol. 49 (2). Pp. 729–737.

21. Abtahi S. M., Esfandiarpour S., Kunt M., Hejazi S. M., Ebrahimi M. G. Hybrid Reinforcement of Asphalt-Concrete Mixtures Using Glass and Polypropylene Fibers // *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*. 2013. Vol. 8 (2). Pp. 25–35.

22. Mitchell M. R., Link R. E., Kaloush K. E., Biligiri K. P., Zeiada W. A., Rodezno M. C., Reed J. X. Evaluation of Fiber-Reinforced Asphalt Mixtures Using Advanced Materials Characterization Tests // *Journal of Testing and Evaluation*. 2010. Vol. 38, no. 4. Pp. 1–12.

23. Putnam B. J., Amirghanian S. N. Utilisation of Waste Fibers in Stone Matrix Asphalt Mixtures // *Resources Conservation and Recycling*. 2004. Vol. 42 (3). Pp. 265–274.

24. Bhasin A., Button J. W., Chowdhury A. Evaluation of Simple Performance Tests on HMA Mixtures from the South-Central United States // *Research Report FHWA/TX-03/558-1*. The Texas Transportation Institute. Texas A&M University System. College Station, Texas. 2003. 152 p.

25. Button J. W., Hunter T. G. Synthetic Fibers in Asphalt Paving Mixtures // *Research Report FHWA/TX-85/73+319-1F*. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. College Station, Texas. 1984. 160 p.

26. Freeman R. D., Burati J. L., Amirghanian S. N., Bridges W. C. Polyester Fibers in Asphalt Paving Mixtures // *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*. 1989. Vol. 58. Pp. 387–409.

27. Chowdhury A., Button J. W., Bhasin A. Fibers from Recycled Tire as Reinforcement in Hot Mix Asphalt // *Research Report SWUTC/06/167453-1*. Texas Transportation Institute. Texas A&M University System. College Station, Texas. 2006. 58 p.

28. Iwański M., Mazurek G. Influence of F-T Synthetic Wax on Asphalt Concrete Permanent Deformation // *Archives of Civil Engineering*. 2013. Vol. LIX, no. 3. Pp. 295–312.

29. Button J. W., Estakhri C., Wimsatt A. A Synthesis of Warm-Mix Asphalt // *Research Report FHWA/TX-07/0-5597-1*. Texas Transportation Institute. The Texas A&M University System. College Station, Texas. 2007. 94 p.

30. Butz T., Rahimian I., Hildebrand G. Modifications of Road Bitumens with the Fischer-Tropsch Paraffin Sasobit® // *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*. 2001. October. Pp. 70–86.

References

1. Zankovich V. V. *Shchebenochno-mastichnye asfal'tobetonny dlya dorozhnykh pokrytiy gorodskikh ulits.*

Diss. kand. tekhn. nauk [Rubble-mastic asphalt concretes for city road pavements. PhD in Sci. Tech. diss.]. Minsk, 2005, 168 p.

2. Veren'ko V. A. *Novye materialy v dorozhnom stroitel'stve* [New materials in road construction]. Minsk, Tekhnoprint Publ., 2004, 170 p.

3. Veren'ko V. A., Afanasenko A. A. *Vysokomodul'nye asfal'tobetonny s povyshennym sodержaniem vyazhushchego dlya dorozhnykh pokrytiy* [High-modulus asphalt concrete with increased binder content for road pavement]. *Vestnik Khar'kovskogo natsional'nogo avtomobil'no-dorozhnogo universiteta – Bulletin of Kharkov National Automobile and Road University*, 2006, iss. 34–35, pp. 82–96.

4. McDaniel R. S. Fiber additives in asphalt mixtures. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine; Transportation Research Board; National Cooperative Highway Research Program*. Washington, DC. The National Academies Press, 2015, 50 p.

5. Kiryukhin G. N., Smirnov E. A. *Stroitel'stvo dorozhnykh i aerodromnykh pokrytiy iz shchebenochno-mastichnykh asfal'tobetonnykh smesey. Obzornaya informatsiya* [Construction of road and airfield pavements from crushed stone-mastic asphalt-concrete mixtures. Review information]. Moscow, 2003, 96 p.

6. Kolb K. H., Erhard H., Hoggemuller F., Kast O. *Splitmastixasphalt*. Deutscher Asphaltverband (DAV), 1996, 27 p.

7. Oda S., Fernandes Jr. J. L., Ildefonso J. S. Analysis of use of natural fibers and asphalt rubber binder in discontinuous asphalt mixtures. *Construction and Building Materials*, 2012, vol. 26 (1), pp. 13–20.

8. Hadiwardoyo S. P., Sumabrata J., Jayanti P. Contribution of short coconut fiber to pavement skid resistance. *Advanced Materials Research*, 2013, vol. 789, pp. 248–254.

9. Das B. R., Banerjee P. K. Interface bond and compatibility of jute with asphalt. *Composites Part B: Engineering*, 2013, vol. 53, pp. 69–75.

10. Qiang X., Lei L., Yi-Jun C. Study on the action effect of pavement straw composite fiber material in asphalt mixture. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 43, pp. 293–299.

11. Xia C., Wu C., Liu K., Jiang K. Study on the durability of bamboo fiber asphalt mixture. *Materials*, 2021, vol. 14 (7), 1667.

12. Abiola O. S., Kupolati W. K., Sadiku E. R., Ndambuki J. M. Utilization of natural fibre as modifier in bituminous mixes. Review. *Construction and Building Materials*, 2014, vol. 54, pp. 305–312.

13. Do Vale A., Casagrande M. D. T., Soares J. B. Behavior of natural fiber in stone matrix asphalt mixtures using two design methods. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2014, vol. 26 (3), pp. 457–465.

14. Chevik A., Nish A. *Advanced fiber-reinforced alkali-activated composites. Design, mechanical properties, and durability*. 1sted. Elsevier, 2023, 522 p.
15. Morova N. Investigation of usability of basalt fibers in hot mix asphalt concrete. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 47, pp. 175–180.
16. Guan B., Xiong R., He R., Chen S., Donghai D. Investigation of usability of brucite fiber in asphalt mixture. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2014, vol. 7 (3), pp. 193–202.
17. Geckil T., Ahmedzade P. Effects of carbon fibre on performance properties of asphalt mixtures. *The Baltic Journal of Road and Bridge Engineering*, 2020, vol. 15, no. 2, pp. 49–65.
18. Busching H. W., Elliott E. H., Reyneveld N. G. A state-of-the-art survey of reinforced asphalt paving. *Proceedings of the Annual Meeting of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1970, vol. 39, pp. 766–798.
19. García Á., Schlangen E., van de Ven M., van Vliet D. Induction heating of mastic containing conductive fibers and fillers. *Materials and Structures*, 2011, vol. 44 (2), pp. 499–508.
20. Dai Q., Wang Z., Hasan M. R. M. Investigation of induction healing effects on electrically conductive asphalt mastic and asphalt concrete beams through fracture-healing tests. *Construction and Building Materials*, 2013, vol. 49 (2), pp. 729–737.
21. Abtahi S. M., Esfandiarpour S., Kunt M., Hejazi S. M., Ebrahimi M. G. Hybrid reinforcement of asphalt-concrete mixtures using glass and polypropylene fibers. *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2013, vol. 8 (2), pp. 25–35.
22. Mitchell M. R., et al. Evaluation of fiber-reinforced asphalt mixtures using advanced materials characterization tests. *Journal of Testing and Evaluation*, 2010, vol. 38, no. 4, pp. 1–12.
23. Putnam B. J., Amirkhanian S. N. Utilisation of waste fibers in stone matrix asphalt mixtures. *Resources Conservation and Recycling*, 2004, vol. 42 (3), pp. 265–274.
24. Bhasin A., Button J. W., Chowdhury A. Evaluation of simple performance tests on hma mixtures from the south-central united states. *Research Report*, FHWA/TX-03/558-1. Texas Transportation Institute. Texas A&M University System. College Station, Texas. 2003, 152 p.
25. Button J. W., Hunter T. G. Synthetic fibers in asphalt paving mixtures. *Research Report*, FHWA/TX-85/73+319-1F. Texas Transportation Institute. Texas A&M University System, College Station, Texas, 1984, 160 p.
26. Freeman R. D., Burati J. L., Amirkhanian S. N., Bridges W. C. Polyester fibers in asphalt paving mixtures. *Proceedings of the Association of Asphalt Paving Technologists*, 1989, vol. 58, pp. 387–409.
27. Chowdhury A., Button J. W., Bhasin A. Fibers from recycled tire as reinforcement in hot mix asphalt. *Research Report*, SWUTC/06/167453-1. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, 2006, 58 p.
28. Iwański M., Mazurek G. Influence of f-t synthetic wax on asphalt concrete permanent deformation. *Archives of Civil Engineering*, 2013, vol. LIX, no. 3, pp. 295–312.
29. Button J. W., Estakhri C., Wimsatt A. Synthesis of Warm-Mix Asphalt. *Research Report*, FHWA/TX-07/0-5597-1. Texas Transportation Institute, Texas A&M University System, College Station, Texas, 2007, 94 p.
30. Butz T., Rahimian I., Hildebrand G. Modifications of road bitumens with the fischer-tropsch paraffin sasobit®. *Journal of Applied Asphalt Binder Technology*, 2001, October, pp. 70–86.