

ПРОЕКТИРОВАНИЕ И СТРОИТЕЛЬСТВО ДОРОГ, МЕТРОПОЛИТЕНОВ, АЭРОДРОМОВ, МОСТОВ И ТРАНСПОРТНЫХ ТОННЕЛЕЙ

ENGINEERING AND CONSTRUCTION OF ROADS, SUBWAYS, AIRDROMES, AND TUNNELS

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2023. Т. 25. № 3. С. 185–196.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2023; 25 (3): 185–196.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.168:625.861

DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196

EDN: TQJNLC

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЙ СОСТОЯНИЯ И СВОЙСТВ ВОЛОКОН ДИСПЕРСНОЙ АРМАТУРЫ В ПРОЦЕССЕ СТРОИТЕЛЬСТВА И ЭКСПЛУАТАЦИИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЙ

Виктор Николаевич Лукашевич, Ольга Дмитриевна Лукашевич

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
г. Томск, Россия*

Аннотация. Растущий интерес к дисперсному армированию асфальтобетона порождает необходимость исследований в области анализа и оценки характеристик используемых химических волокон. Полимерные волокна, играющие роль арматуры, могут качественно изменяться под влиянием внешних факторов и влиять на качество дорожных покрытий.

Исследованы исходные волокна дисперсной арматуры из термопластического волокнообразующего полимера и из минеральных нитей, волокна, извлеченные из асфальтобетона, а также волокна, подвергшиеся светопогодному воздействию в везерометре марки ИП-1-3. В исследованиях использовался металлографический микроскоп МИМ-10 и двухлучевой ИК-спектрофотометр Спекорд М80. Физико-химические испытания волокон проведены в аттестованной лаборатории АК «Химволокно».

Цель работы – установление наличия или отсутствия деформаций, разрушений, деформации волокон дисперсной арматуры при изготовлении асфальтобетонных смесей, содержащих полимерные волокна.

Установлено, что волокна дисперсной арматуры из термопластичных волокнообразующих полимеров деформируются при уплотнении асфальтобетонной смеси в местах воз-

действия зерен минерального материала. В то же время минеральные волокна, используемые в качестве дисперсной арматуры, таких деформаций не претерпевают. Показано, что на свойства волокон практически не влияют природно-климатические факторы.

По результатам исследований сделаны выводы, что воздействие природно-климатических факторов не приводит к деструкции волокон дисперсной арматуры. Показатели свойств армирующих волокон изменяются слабо, что позволяет им осуществлять функцию армирования на протяжении установленных сроков службы асфальтобетонных покрытий. Вдавливание зерен минерального материала в волокна из термопластичных волокнообразующих полимеров приводит к заклиниванию волокон зернами, препятствуя их выдергиванию, повышая тем самым прочностные и реологические свойства асфальтобетона.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь, ИК-спектры, полиамидные волокна, дисперсная арматура из синтетических волокон, дисперсная арматура из минеральных волокон, фиброасфальт, адсорбционно-сольватная оболочка

Для цитирования: Лукашевич В.Н., Лукашевич О.Д. Исследование изменений состояния и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2023. Т. 25. № 3. С. 185–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196. EDN: TQJNLC

ORIGINAL ARTICLE

MODIFICATION OF CONDITIONS AND PROPERTIES OF DISPERSED REINFORCING FIBER DURING CONSTRUCTION AND OPERATION OF ASPHALT CONCRETE PAVEMENTS

Viktor N. Lukashevich, Olga D. Lukashevich

Tomsk State University of Architecture and Building, Tomsk, Russia

Abstract. Purpose: Identification of deformation presence or absence, fiber destruction in manufacturing asphalt concrete mixes containing polymer fiber.

Methodology: Initial dispersed reinforcing fiber made of thermoplastic fiber-forming polymer and mineral thread, fiber extracted from asphalt concrete, and fiber exposed to weather conditions are investigated using a weatherometer IP-1-3. An MIM-10 metallographic microscope is used for the metallographic analysis. The infrared spectrophotometer SPECORD M-80 is used for the material identification. Physicochemical tests of fiber are carried out in a certified laboratory "Khimvolokno".

Research findings: Dispersed reinforcing fiber made of thermoplastic fiber-forming polymers show deformation in compacting the asphalt-concrete mix at impact points of mineral material grains. At the same time, mineral fiber used as a dispersed reinforcement is not subjected to such deformation. The fiber properties are not affected by natural and climatic factors. It is found that natural and climatic factors do not cause the fiber destruction in dispersed reinforcement. The properties of reinforcing fiber slightly change, which allows them to perform a reinforcing function throughout the established service life of asphalt concrete pavements. Indentation of mineral material grains into fiber made of thermoplastic polymers leads to fiber jamming by grains, that prevents them from being pulled out, that, in turn, increases strength and rheological properties of asphalt concrete.

Value: The analysis of chemical fiber characteristics is required to satisfy the growing interest in dispersed reinforcement of asphalt concrete. The quality of polymer fiber used for reinforcement can be changed under the influence of external factors and affect the quality of road pavements.

Keywords: asphalt concrete mixture, polyamide fiber, synthetic fiber, mineral fiber, fiber-asphalt concretes, adsorption-solvation bitumen shells

For citation: Lukashevich V.N., Lukashevich O.D. Modification of conditions and properties of dispersed reinforcing fiber during construction and operation of asphalt concrete pavements. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2023; 25 (3): 185–196. DOI: 10.31675/1607-1859-2023-25-3-185-196. EDN: TQJNLC

Введение

Основным фактором, влияющим на комплекс свойств асфальтобетона, является его структура. Л.Б. Гезенцев и др. [1] установили, что повышение качественно важных характеристик дорожных асфальтобетонов достигается путем изменения их структуры. К таким воздействиям, улучшающим широкий спектр показателей асфальтобетона, относится дисперсное армирование [2, 3, 4]. Одним из вариантов дисперсного армирования асфальтобетона является внедрение в структуру отрезков полимерных волокон, улучшающих его реологические и физико-механические свойства. Как следствие, снижается риск появления деформаций асфальтобетонных покрытий. Зарубежными и российскими учеными показана высокая эффективность полимерно-дисперсного армирования (ПДА). Установлено, что ПДА образует пространственную армирующую решетку, которая при температуре 50 °С повышает сдвигоустойчивость асфальтобетона на 25–30 %, а при отрицательных температурах повышает прочность при растяжении на 40–80 %. Деформативность при отрицательных температурах достигает 90–200 %. Максимальное (200–500 %) положительное влияние происходит в отношении усталостной прочности [2, 3, 4, 5].

Представляет интерес расположение волокон дисперсной арматуры среди зерен минерального материала и процессы, происходящие в адсорбционно-сольватных слоях битума. Структура этих слоев содержит твердообразную структурированную и диффузную зоны, что установлено в работах [1, 6]. Диффузная зона рассматривается как переходная между адсорбционно-сольватным (ориентированным) слоем и объемным битумом [7].

Очень важным и в то же время слабо изученным является вопрос изменения состояния, пространственного расположения и свойств волокон дисперсной арматуры в процессе строительства и эксплуатации асфальтобетонных покрытий, поскольку в процессе уплотнения асфальтобетонной смеси волокна дисперсной арматуры подвергаются давлению со стороны более прочных минеральных зерен. При эксплуатации асфальтобетонного покрытия на волокна воздействует целый комплекс техногенных и природно-климатических факторов. Это подвижная нагрузка, вызывающая знакопеременные напряжения в покрытии, высокие положительные и отрицательные температуры, частое сезонное замораживание и оттаивание, чередующиеся процессы увлажнения и высыхания, а также ветровое воздействие, агрессивное влияние солейсодержащих растворов, используемых для устранения скользкости, и ультрафиолетовая составляющая солнечного излучения – один из самых мощных факторов, разрушающих полимеры.

На основании вышесказанного представляется актуальным проведение исследований в области анализа и оценки физических и химических характеристик компонентов ПДА на протяжении жизненного цикла.

Материалы и методы исследований

Методы контроля качества асфальтобетонных композиций, указанные в нормативных документах, не позволяют дать объективную оценку и прогноз ПДА в условиях реальной рабочей нагрузки. С этим обстоятельством связан авторский подход к выбору методов исследований: изучение теоретических данных [6–9], металлографическая микроскопия, климатическое моделирование, ИК-спектроскопия.

Расположение отрезков полимерных волокон арматуры в адсорбционно-сольватных слоях битума рассматривалось теоретически, путем сравнения толщины этих слоев с диаметром волокон. Ранее толщина ориентированных слоев битума изучалась главным образом косвенными методами исследований. Реальная толщина битумной пленки для нефтяного битума марки БНД 60/90 экспериментально определена в работе [8] (табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерения битумной пленки на образцах минерала (известняка) по данным работы [8]

Table 1

Bituminous film thickness on limestone particles (adopted from [8])

Размер частиц известняка, мм	< 0,14 (асфальтовое вяжущее)	0,14–3,0 (асфальтовый раствор)	3–10 (песок и щебень)
Толщина битумной пленки, мкм	< 6	62–64	46–80

На толщину волокон, используемых в качестве дисперсной арматуры, влияет состав вещества, из которого они изготовлены, и способ формования. В табл. 2 приведены результаты измерений диаметра различных видов волокон по данным авторов работ [9, 10].

Таблица 2

Сравнительная оценка толщины волокон, пригодных для дисперсного армирования (по данным [9, 10])

Table 2

Fiber thickness for dispersed reinforcement (adopted from [9, 10])

Вид волокна и способ формования	Диаметр волокна, мкм
Полимерные волокна, полученные способами формования	
Из раствора	40–100
Из расплава	250–1000

Окончание табл. 2

End of table 2

Вид волокна и способ формования	Диаметр волокна, мкм
Виды минеральных волокон	
Микроволокно	0,5
Ультратонкое	0,5–1
Супертонкое	1–3
Тонкое	3–11
Утолщенное	11–20
Грубое	20
Отходы минеральных волокон	20–150

Воздействие уплотняющей нагрузки на состояние и форму волокон дисперсной арматуры в асфальтобетоне исследовалось на металлографическом микроскопе МИМ-10. Для этого из сформованных образцов асфальтобетона с помощью органического растворителя (солянки) извлекалась дисперсная арматура, приготовленная из термопластичного волокнообразующего полимера (полиамидные нити-жгуты с линейной плотностью 250 текс) и дисперсная арматура в виде минеральных фибр (стекловолокно с номинальным диаметром элементарной нити в пределах 10–120 мкм). С помощью микроскопа МИМ-10 получены оптические изображения этих волокон с увеличением в 100 и 250 раз. Также получены изображения исходных волокон, не использовавшихся в составе образцов асфальтобетона.

Исследование влияния природно-климатических факторов на полимерные волокна (атмосферостойкость) проводилось с использованием везерометра – камеры искусственной светопогоды марки ИП-1-3. Камера имитирует воздействие температур, влажности, УФ-диапазона солнечного излучения, соответствующих разным типам климата. Моделирование процесса разрушительного воздействия на исследуемый материал под действием воды, перепадов температур и ультрафиолетовой энергии света проводили по стандартной методике с применением условий испытаний, приближенных к региональным (Западная Сибирь).

Образцы для испытания дисперсной арматуры подготовлены следующим образом. Из катушки полиамидной жгутовой нити с линейной плотностью 250 текс (выбиралась случайным образом) брали 3 группы образцов. Длина образца составляла 50 м в каждой группе. Образцы 1-й группы считались контрольными (эталонными) и не подвергались обработке. Образцы 2-й группы помещали в битум марки БНД 90/130, широко применяемый в дорожном строительстве Западно-Сибирского региона. После определенного времени их извлекали и очищали в растворителе (гексан). Гексан для очистки волокон выбран как доступный и наиболее чистый реагент, подходящий для идентифика-

ции полос поглощения при исследованиях методом ИК-спектроскопии. Образцы 3-й группы нитей обрабатывались вышеупомянутым битумом, после чего подвергались старению в везерометре. Рабочий режим имитировал северные светоклиматические условия. Число циклов выбрано так, чтобы воздействие соответствовало 18-летнему сроку службы дорожного асфальтобетона. После светопогодного воздействия образцы отмывались от битума в гексане. Все подготовленные полиамидные образцы исследовались в химической лаборатории АК «Химволокно», Кемерово.

Исследование химического поведения дисперсной арматуры из полиамидных волокон под воздействием внешних факторов проводили методом ИК-спектроскопии на спектрофотометре Спекорд М80.

Результаты исследований и их обсуждение

На основе данных, представленных в табл. 1 и 2, выполнена оценка толщины битумной пленки на зернах различного размера с диаметрами волокон дисперсной арматуры. На основании анализа этих величин сделаны выводы об особенностях фиксации волокон арматуры разного химического состава в адсорбционных слоях битума.

На толщину волокна дисперсной арматуры влияют химический состав и свойства полимерного материала, а также способ получения. Согласно данным из табл. 1 и 2, диаметры волокон разных видов дисперсной арматуры больше, чем толщина ориентированного слоя битума на поверхности минерального материала.

Существует возможность реализации различных вариантов размещения волокон дисперсной арматуры относительно минеральных частиц. При армировании горячего асфальтобетона микро-, ультра- и супертонкими волокнами толщина создаваемой битумной пленки превышает диаметр волокон, причем как в асфальтовом растворе, так и в асфальтовом вяжущем. Как следствие, волокна располагаются в адсорбционных слоях битума.

Более толстые волокна выходят за пределы адсорбционных слоев минерального порошка. Минеральные волокна не размягчаются при нагревании до температур, необходимых для приготовления и укладки асфальтобетонных смесей. Это позволяет им не деформироваться и раздвигать минеральные частицы, находящиеся в приготавливаемой асфальтобетонной смеси. Если диаметр применяемых минеральных волокон больше 24 мкм, то они раздвигают минеральные зерна, находящиеся в асфальтовом растворе. При диаметре волокон 80 мкм и более будут раздвигаться как минеральные, так и щебневые зерна. В результате наблюдается процесс взаимодействия частиц минерального материала не через ориентированный, а через объемный слой битума. Это снижает прочностные характеристики битумо-минеральных смесей при воздействии отрицательных температур. Следует отметить позитивную сторону такого эффекта: при создании небольшого избытка против требуемого регламентом количества объемного битума замедляется старение полученного асфальтобетонного покрытия.

При использовании волокон с диаметром меньше 80 мкм они располагаются без деформации на частицах щебня в ориентированном слое битума.

В случае термопластичных синтетических полимеров картина иная. В асфальтовом вяжущем и асфальтовом растворе может произойти деформирование и раздавливание подобных волокон. Причиной этого является проявление пластических качеств полимерными материалами при высокотемпературном воздействии. Термопласты легче мнутся и деформируются при технологических операциях в процессе дорожного строительства. При уплотнении армированной асфальтобетонной смеси катками мягкие полимерные волокна зажимаются между минеральными частицами. Такое армирование улучшает физико-механические показатели качества дорожного асфальтобетона.

Методом оптической микроскопии проведено сравнение геометрической формы волокон дисперсной арматуры до помещения ее в асфальтобетонную смесь и после уплотнения асфальтобетонной смеси, содержащей волокна дисперсной арматуры. В процессе уплотнения асфальтобетонной смеси волокна деформируются по длине и диаметру (толщине). В настоящей работе исследовались деформации волокон только по диаметру.

На рис. 1 представлены оптические изображения исходных волокон дисперсной арматуры из термопластических и минеральных нитей.

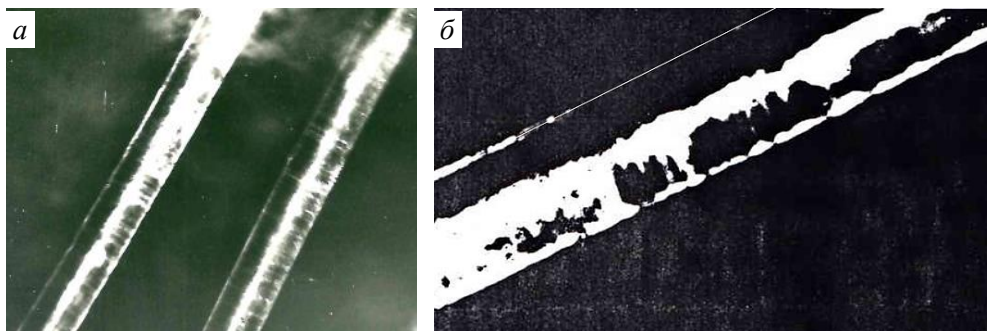


Рис. 1. Микрофотографии исходных волокон дисперсной арматуры. Увеличение $\times 250$:
 а – минеральное (стекловолокно); б – термопластическое (полиамидное) волокно
 Fig. 1. Optical images of initial fiber of dispersed reinforcement. Magnification: 250 $\times$:
 a – mineral fiber (fiberglass); b – thermoplastic (polyamide) fiber

Из рис. 1 видно, что образцы стекловолоконных и полиамидных нитей имеют строго цилиндрическую форму без каких-либо деформаций.

На рис. 2 приведены оптические изображения волокон дисперсной арматуры из термопластического волокнообразующего полимера (полиамида), извлеченных из образца дисперсно-армированного асфальтобетона, уплотненного стандартной нагрузкой. Микрофотографии армирующих волокон из минеральных нитей (стекловолокна), извлеченных из образца асфальтобетонной смеси, уплотненной стандартной нагрузкой, в работе не представлены, поскольку они не претерпели деформаций и имели форму, идентичную исходным образцам волокон.

Из анализа рис. 2 можно сделать заключение, что армирующие волокна из термопластического волокнообразующего полимера при уплотнении асфальтобетонной смеси получили значительные деформации и имеют различ-

ную форму и поперечные размеры по длине волокон. Эти изменения толщины волокон по длине свидетельствуют о том, что волокна дисперсной арматуры надежно защемлены минеральными зернами в асфальтобетоне. Такие волокна более эффективно воспринимают растягивающие напряжения, возникающие при деформации асфальтобетона под воздействием подвижной нагрузки и природно-климатических факторов, что обеспечивает улучшение прочностных и реологических свойств асфальтобетона и увеличивает срок службы покрытия.

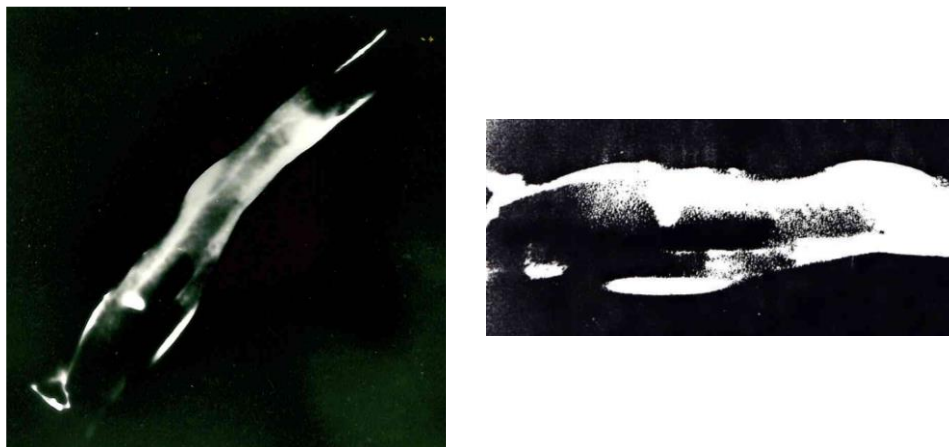


Рис. 2. Микрофотографии волокон дисперсной арматуры из полиамида, извлеченных из образца асфальтобетонной смеси, уплотненной стандартной нагрузкой. Увеличение $\times 250$

Fig. 2. Optical images of polyamide fiber of dispersed reinforcement extracted from asphalt concrete mix compacted by standard load. Magnification: $250\times$

Проведено исследование физико-химических показателей полиамидных волокон, которые проявляются в модельном эксперименте при взаимодействии с битумом. Роль волокон выполняли полиамидные жгутовые нити.

Характеристические показатели полимерных нитей в основном не изменились в ходе эксперимента, имитирующего реальные процессы, происходящие при подготовке, строительстве и эксплуатации дисперсно-армированной дорожной одежды (табл. 3). В результате контакта с нефтяным битумом относительная вязкость полиамидных нитей повысилась на 0,04 ед. После обработки в условиях, симулирующих в светопогодной камере 18-летний срок службы дорожного покрытия, эта величина незначительно увеличилась. Сделан вывод, что показатель относительной вязкости главным образом зависит от микровзаимодействия волокон с нефтяным битумом.

После обработки полиамидных волокон нефтебитумом массовая доля экстрагируемых веществ снизилась на 0,6 %, термостабильность не изменилась. На термостабильность полиамидных волокон оказали сильное воздействие процессы, происходящие при старении: регистрируется рост в 3,5 раза. Температура плавления полиамидного полимера оставалась постоянной не только после его контакта с битумом, но и после искусственного старения.

Количественное значение разрывной удельной нагрузки повысилось почти на 20 % после обработки волокон битумом. После смоделированного старения (18 лет службы в составе материала дорожного покрытия) эта величина уменьшилась почти наполовину по сравнению с контрольным образцом. Процессы старения снизили (более чем на 40 %) величину удлинения полиамидного волокна при разрыве.

Таблица 3

**Физико-химические показатели полиамидных армирующих волокон
и их изменение в процессе искусственного старения
дисперсно-армированного асфальтобетона**

Table 3

**Physicochemical properties of polyamide fiber and its change during
artificial aging of dispersion-reinforced asphalt concrete**

Наименование показателей	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
Относительная вязкость, отн. ед.	2,46	2,5	2,51
Содержание экстрагируемых веществ, %	2,6	2,0	1,5
Термостабильность, усл. ед.	0,2	0,2	0,7
Температура плавления, °С	215	215	216
Удельная разрывная нагрузка, гс/текс	15,9	19,3	8,1
Удлинение при разрыве, %	45,6	47,7	26,9

Интерес представляют изменения, происходящие в дисперсной арматуре из полиамидных волокон, выявленные ИК-спектроскопией. Результаты исследований представлены на рис. 3.

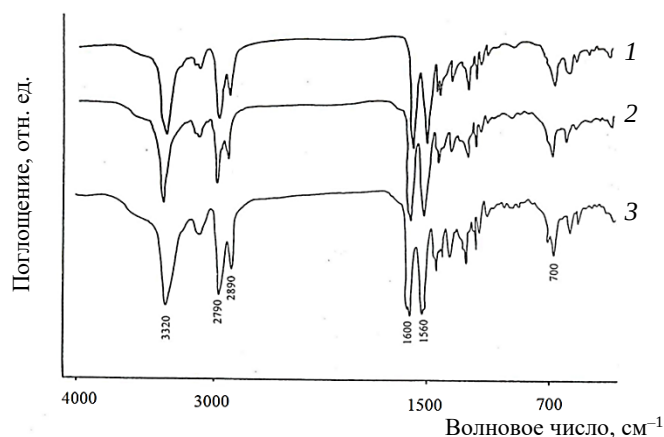


Рис. 3. ИК-спектры полиамидных волокон:

1 – исходное состояние; 2 – после обработки битумом и очистки гексаном;
3 – после обработки битумом, искусственного светопогодного старения и очистки гексаном

Fig. 3. IR spectra of polyamide fiber:

1 – initial state; 2 – after bitumen treatment and cleaning with hexane; 3 – after bitumen treatment, artificial weather aging and cleaning with hexane

Расшифровка полученных спектров на основании сведений из работ [11–14] показала следующее. ИК-спектры всех образцов волокон имеют характеристические полосы поглощения (ПП) в области $1640\text{--}1690\text{ см}^{-1}$. Пик с ПП 1660 см^{-1} принято относить к так называемой полосе амид-I, обусловленной колебаниями карбонильной группы ($\text{C}=\text{O}$). Считается, что свободная N-H группа обуславливает (в дополнение к ПП $\text{C}=\text{O}$) следующие полосы валентных колебаний:

1) N-H при $3050\text{--}3550\text{ см}^{-1}$ (пик соответствует транс-форме, его ПП 3320 см^{-1});

2) деформационные колебания -N-H при $1530\text{--}1570\text{ см}^{-1}$ (пик с ПП 1560 см^{-1} , полоса амид-II).

ПП в области 1300 см^{-1} связана с колебаниями связи C-N и накладывающимися колебаниями N-H , это так называемая полоса амид-III. О возникновении межмолекулярных и водородных связей говорит сдвиг полосы N-H в низкочастотную область. Зафиксированы информативные ПП в средней области спектра ($957, 974\text{ см}^{-1}$). Вероятнее всего, они связаны с сигналами метиленовых звеньев CH_2 .

Деформационные колебания N-H проявляют себя интенсивной широкой полосой ($650\text{--}900\text{ см}^{-1}$) с пиком ПП 700 см^{-1} . Слабые ПП в области $1030\text{--}1230\text{ см}^{-1}$ характеризуют валентные колебания C-N , хотя трудно отличить их от валентных колебаний C-C . Дуплет 2970 и 2890 см^{-1} может соответствовать валентным колебаниям C-H . В пользу такого отнесения полос поглощения свидетельствует рост их интенсивности у образца 3, прошедшего процедуру старения.

Сравнение полученных спектральных данных для полиамидных волокон (чистых, обработанных битумом и состаренных) показало отсутствие существенного влияния со стороны указанных воздействий на свойства волокон. Сделанный вывод хорошо согласуется с результатами работы [15], где показана возможность агрессивного воздействия окружающей среды на полипропиленовое волокно в составе асфальтобетонных смесей. С помощью физико-химических методов анализа образцов, армированных полипропиленовым волокном, установлено, что в условиях низкотемпературного воздействия даже в присутствии антигололедных солей образцы дисперсно-армированного асфальтобетона сохраняли высокую прочность, долговечность, ударную вязкость и другие важные потребительские качества.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что волокна, используемые для армирования асфальтобетонной смеси, могут распределяться либо в адсорбционно-сольватных оболочках битума, либо за их пределами. Минеральные волокна диаметром более 24 мкм могут создавать эффект расклинивания (раздвижки) контактирующих с ними частиц минерального материала, что требует корректировки зернового состава асфальтобетонной смеси при её проектировании.

При использовании дисперсной арматуры из термопластичных полимерных волокон происходит их деформация в результате уплотнения асфальтобетонной смеси. Это обеспечивает надежное защемление волокон дисперсной арматуры зёрнами минерального материала, затрудняющее выдергивание воло-

кон в условиях приложения нагрузок. В результате в слое асфальтобетонного покрытия образуется пространственная армирующая решетка, элементы которой прочно защемлены зернами минерального материала, что и является причиной повышения прочности и сдвигоустойчивости этого конструктивного слоя. Физико-химический анализ полиамидных армирующих волокон свидетельствуют о незначительном изменении свойств волокон дисперсной арматуры под воздействием ультрафиолета и природно-климатических нагрузок, что позволяет им в полной мере выполнять армирующие функции.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Гезенцев Л.Б., Горельшев Н.В., Богуславский А.М., Королев И.В. Дорожный асфальтобетон / под ред. Л.Б. Гезенцева. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Транспорт, 1985. 350 с.
2. Sevil K., Perviz A., Baurzhan K. Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics // *Construction and Building Materials*. 2014. V. 73. P. 592–602.
3. Süreyya T., Halit Ö., Atakan A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers // *Construction and Building Materials*. 2007. V. 21. P. 328–337.
4. Лукашевич В.Н., Ефанов И.Н. Применение теории перколяции для исследования процессов структурообразования дисперсно-армированных асфальтобетонов // *Техника и технология дорожного хозяйства*. 2014. № 2 (28). С. 29–39.
5. Чернов С.А., Каклюгин А.В., Никитина А.Н., Голюбин К.Д. Влияние полимерно-дисперсно-армирующей добавки на эксплуатационные свойства асфальтобетона // *Вестник МГСУ*. 2017. Вып. 12. № 6 (105). С. 654–660. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.654-660
6. Королев И.В. Модель строения битумной пленки на минеральных зернах в асфальтобетоне // *Известия вузов. Строительство и архитектура*. 1981. № 8. С. 63–67.
7. Королев И.В., Агеева Е.Н., Головкин В.А., Фоменко Г.Р. Дорожный теплый асфальтобетон. 2-е изд., испр. и доп. Киев : Вища шк., Головное изд-во, 1984. 200 с.
8. Королев И.В. О толщине битумной пленки в асфальтобетоне // *Исследование свойств битумов, применяемых в дорожном строительстве : труды Союздорнии*. 1970. Вып. 46. С. 20–26.
9. Зазулина З.А., Дружинина Т.В., Конкин А.А. Основы технологии химических волокон. 2-е изд., перераб. и доп. Москва : Химия, 1985. 304 с.
10. Роговин З.А. Основы химии и технологии химических волокон. Санкт-Петербург : СПГУТД, 2001. 148 с.
11. Белами Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул : пер. с англ. Москва : Мир, 1971. 319 с.
12. Наканиси К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений : пер. с англ. Москва : Мир, 1965. 216 с.
13. Лебедев А.Т. Масс-спектрометрия в органической химии. Москва : БИНОМ. Лаборатория знаний, 2003. 493 с.
14. Иванова Л.В., Сафиева Р.З., Кошелев В.Н. ИК-спектрометрия в анализе нефти и нефтепродуктов // *Вестник башкирского университета*. 2008. Т. 13. № 4. С. 869–874.
15. Niyazi U.K., Sevil K. Aggressive environmental effect on polypropylene fibre-reinforced hot mix asphalt // *Procedia Engineering* 2016. V. 16. P. 963–969. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.834

REFERENCES

1. Gezentsvei L.B. (Ed.), Gorelyshev N.V., Boguslavskii A.M., Korolev I.V. Asphalt concrete. 2nd ed., Moscow: Transport, 1985. 350 p. (In Russian)
2. Sevil K., Perviz A., Baurzhan K. Performance evaluation of bitumen modified by various types of waste plastics. *Construction and Building Materials*. 2014; (73): 592–602.
3. Süreyya T., Halit Ö., Atakan A. Investigation of rutting performance of asphalt mixtures containing polymer modifiers. *Construction and Building Materials*. 2007; (21): 328–337.

4. Lukashevich V.N., Efanov I.N. Application of percolation theory in studying structure formation of dispersion-reinforced asphalt concrete. *Tekhnika i tekhnologiya dorozhnogo khozyaistva*. 2014; 2 (28): 29–39. (In Russian)
5. Chernov S.A., Kaklyugin A.V., Nikitina A.N., Golyubin K.D. Influence of polymer dispersion-reinforcing additive on asphalt concrete performance. *Vestnik MGSU*. 2017; 6 (105): 654–660. DOI: 10.22227/1997-0935.2017.6.654-660 (In Russian)
6. Korolev I.V. Model of bitumen film structure on mineral grains in asphalt concrete. *Izvestiya vuzov. Stroitel'stvo i arkhitektura*. 1981; 8: 63–67. (In Russian)
7. Korolev I.V., Ageeva E.N., Golovko V.A., Fomenko G.R. Warm asphalt concrete, 2nd ed. Kiev: Vishcha shk, 1984. 200 p. (In Russian)
8. Korolev I.V. Bituminous film thickness in asphalt concrete. *Soyuzdornii*. 1970; 46: 20–26. (In Russian)
9. Zazulina Z.A., Druzhinina T.V., Konkin A.A. Fundamentals of chemical fiber technology, 2nd ed., Moscow: Khimiya, 1985. 304 p. (In Russian)
10. Rogovin Z.A. Fundamentals of chemistry and chemical fiber technology. Saint-Petersburg, 2001. 148 p. (In Russian)
11. Bellamy L.J. The infra-red spectra of complex molecules. Moscow: Mir, 1971. 319 p. (Russian translation)
12. Nakanisi K. Infrared spectra and structure of organic compounds. Moscow: Mir, 1965. 216 p. (Russian translation)
13. Lebedev A.T. Mass spectrometry in organic chemistry. Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2003. 493 p. (In Russian)
14. Ivanova L.V., Safieva R.Z., Koshelev V.N. IR spectrometry in the analysis of oil and petroleum products. *Vestnik bashkirskogo un-ta*. 2008; 13 (4): 869–874. (In Russian)
15. Niyazi U.K., Sevil K. Aggressive environmental effect on polypropylene fibre reinforced hot mix asphalt. *Procedia Engineering*. 2016; 161: 963–969. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.08.834

Сведения об авторах

Лукашевич Виктор Николаевич, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, vnluc@yandex.ru

Лукашевич Ольга Дмитриевна, докт. техн. наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет, 634003, г. Томск, пл. Соляная, 2, odluk@yandex.ru

Authors Details

Viktor N. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, vnluc@yandex.ru

Olga D. Lukashevich, DSc, Professor, Tomsk State University of Architecture and Building, 2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia, odluk@yandex.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 25.04.2023
Одобрена после рецензирования 28.04.2023
Принята к публикации 16.05.2023

Submitted for publication 25.04.2023
Approved after review 28.04.2023
Accepted for publication 16.05.2023