

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

УДК 625.855.3:691.16

*ЛУКАШЕВИЧ ВИКТОР НИКОЛАЕВИЧ, докт. техн. наук, профессор,
vnluc@yandex.ru*

*ВЛАСОВ ВИКТОР АЛЕКСЕЕВИЧ, докт. физ.-мат. наук, профессор,
rector@tsuab.ru*

*ЛУКАШЕВИЧ ОЛЬГА ДМИТРИЕВНА, докт. техн. наук, профессор,
odluk@yandex.ru*

*ЕФАНОВ ИГОРЬ НИКОЛАЕВИЧ, аспирант,
ein7@yandex.ru*

*Томский государственный архитектурно-строительный университет,
634003, г. Томск, пл. Соляная, 2*

ИССЛЕДОВАНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СВОЙСТВ ВОЛОКОН ДИСПЕРСНОЙ АРМАТУРЫ В АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ ПОКРЫТИЯХ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПРИРОДНО-КЛИМАТИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ

Актуальность исследования предопределена необходимостью улучшения свойств асфальтобетонов, поскольку в условиях повышения грузоподъемности автомобилей и увеличения интенсивности их движения дорожные одежды, запроектированные и сооруженные в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, разрушаются, не выдерживая установленных сроков службы. Одним из путей решения этой проблемы может быть дисперсное армирование асфальтобетонных смесей химическими волокнами. Целью работы являлось исследование изменений показателей свойств волокон дисперсной арматуры в асфальтобетонном покрытии под влиянием природно-климатических факторов. Приведены результаты исследований подвергшихся старению полиамидных нитей, используемых в качестве дисперсной арматуры. Показано, что в результате воздействия природно-климатических факторов на волокна дисперсной арматуры происходят изменения показателей свойств волокон, позволяющие дисперсной арматуре выполнять армирующие функции в течение всего периода эксплуатации асфальтобетонного покрытия.

Ключевые слова: асфальтобетонная смесь; дисперсная арматура; полиамидные волокна; природно-климатические факторы; показатели физико-химических свойств волокон.

*VIKTOR N. LUKASHEVICH, DSc, Professor,
vnluc@yandex.ru*

*VIKTOR A. VLASOV, DSc, Professor,
rector@tsuab.ru*

*OLGA D. LUKASHEVICH, DSc, Professor,
odluk@yandex.ru*

*IGOR N. EFANOV, Research Assistant,
ein7@yandex.ru*

*Tomsk State University of Architecture and Building,
2, Solyanaya Sq., 634003, Tomsk, Russia*

FIBER REINFORCEMENT PROPERTIES OF ASPHALT PAVEMENTS UNDER NATURAL AND CLIMATIC CONDITIONS

Since the road pavements designed and built in accordance with the regulatory document requirements destroy and do not comply with the specified service life, this study seems to be relevant as it suggests ways of improving asphalt concrete properties. Among them the chemical fiber reinforcement of bitumen-concrete mixes takes one of the important places.

The aim of this work is the investigation of properties of fiber reinforcement of asphalt pavements under natural and climatic conditions. Research results are obtained nylon filament subjected to ageing and used as disperse reinforcement. It is shown that under natural and climatic conditions the properties of fiber reinforcement change, allowing it to perform reinforcing functions during the lifetime of road pavements.

Keywords: bitumen-concrete mix; disperse reinforcement; polyamide fiber; natural and climatic conditions; physicochemical properties.

Рост грузоподъемности автомобилей, высокая интенсивность движения, суровые природно-климатические условия Западной Сибири приводят к тому, что асфальтобетонные покрытия, запроектированные и сооруженные в соответствии с требованиями действующих нормативных документов, разрушаются, не выдерживая установленных сроков службы. Являясь сложной многокомпонентной гетерогенной системой, асфальтобетон обладает комплексом специфических свойств (прочность при сжатии, упругость, пластичность, ползучесть, релаксация напряжений и т. д.), показатели которых предопределены характеристиками применяемых органических вяжущих. Применение нефтяных битумов в качестве органических вяжущих приводит к тому, что материал асфальтобетонного покрытия становится термопластичным. В летний период под воздействием высоких положительных температур повышается его пластичность, снижается сдвигоустойчивость, в результате чего происходит колеобразование, «гребенка» и другие деформации. Для борьбы с этими деформациями приходится повышать вязкость нефтяных битумов, корректируя зерновой состав, увеличивая содержание минерального порошка. Но это приводит к тому, что в зимний период при высоких отрицательных температурах адсорбционно-сольватные оболочки битума на поверхности минеральных частиц становятся менее эластичными, повышается их хрупкость, что приводит к повышенному трещинообразованию. В этой связи можно заключить, что асфальтобетон как материал для устройства покрытий ав-

томобильных дорог не выдерживает комплексного воздействия возросших нагрузок высокой интенсивности, природно-климатических факторов, и эффективность его использования в конструктивных слоях дорожных одежд без дополнительных мероприятий существенно снижается.

К дополнительным мероприятиям, повышающим сдвигоустойчивость асфальтобетонных покрытий в летний период и понижающим их трещинообразование в зимний период, можно отнести их дисперсное армирование химическими волокнами. В дисперсно-армированных асфальтобетонах связь между частицами минерального материала обеспечивается не только пленками адсорбционно-сольватных оболочек битума, но и волокнами дисперсной арматуры. Напряжения, возникающие в асфальтобетонном покрытии, воспринимаются и адсорбционно-сольватными оболочками битума, как в асфальтобетонах, приготовленных по традиционной технологии, и волокнами дисперсной арматуры. Вследствие того что волокна дисперсной арматуры имеют прочностные показатели, существенно превышающие показатели битумных пленок, улучшаются условия работы адсорбционно-сольватных оболочек битума, поэтому основные напряжения, возникающие в асфальтобетонном покрытии, будут восприниматься волокнами дисперсной арматуры. Это приводит к снижению вероятности возникновения трещин в зимний период, повышению сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий в летний период. Отечественными и зарубежными учеными установлено, что введение дисперсной арматуры в асфальтобетонную смесь повышает прочностные показатели асфальтобетона при сдвиге на 25–30 % при температуре 50 °С, а показатели прочности при растяжении при минусовых температурах увеличиваются на 40–80 %. Самое существенное воздействие дисперсное армирование оказало на деформативность материала – она улучшилась на 90–200 % при отрицательных температурах, а усталостная прочность – на 200–500 %. Повысилась также коррозионная устойчивость [1–4].

Таким образом, дисперсно-армированные асфальтобетоны являются еще более сложными системами, поскольку в их состав входят отрезки волокон дисперсной арматуры, и комплекс свойств асфальтобетонов будет зависеть не только от работы органического вяжущего, но и от работы дисперсной арматуры [5–8]. Отрезки волокон дисперсной арматуры в процессе стохастического распределения по объему материала создают в нем пространственную армирующую решетку, воспринимающую напряжения от подвижной нагрузки и от воздействия природно-климатических факторов.

А поскольку именно дисперсная арматура призвана улучшить показатели свойств асфальтобетона, очень важно знать, как изменяются свойства химических волокон, из которых приготовлены отрезки дисперсной арматуры, в процессе эксплуатации автомобильной дороги под влиянием природно-климатических факторов. К этим факторам относятся попеременное увлажнение и просушивание, нагревание и охлаждение, замораживание-оттаивание и один из главных факторов, влияющих на старение полимерных материалов, – воздействие ультрафиолетового излучения. Чтобы выяснить, как эти факторы влияют на свойства волокон дисперсной арматуры, были проведены исследования изменений показателей физико-химических свойств полиамид-

ных нитей, как наиболее распространенных в процессе старения асфальтобетонного покрытия.

Работы проводились в следующей очередности. Из выбранной случайным образом катушки полиамидной жгутовой нити линейной плотностью 250 текс были отобраны три группы образцов с длиной образца в каждой группе 50 м. Образцы первой группы являлись эталонными и обработке не подвергались. Образцы второй группы были помещены в битум, затем извлечены и очищены в гексане. Для обработки был использован нефтяной битум марки БНД 90/130, наиболее часто используемый дорожно-строительными организациями Западной Сибири. Для очистки нитей от нефтяного битума был выбран гексан, как наиболее чистый продукт, имеющий четко идентифицированные характеристические полосы поглощения при исследованиях методами ИК-спектроскопии и мало влияющий на общую картину изменений в исследуемых образцах. Образцы третьей группы полиамидных жгутовых нитей были также обработаны нефтяным битумом марки БНД 90/130, а затем подвергнуты старению в аппарате искусственной погоды марки ИП-1-3 (везерометре), который приближенно имитирует воздействие атмосферных факторов умеренно континентального, субтропического и северного климата. Аппарат выполнен в виде изолированной камеры, внутри которой установлен цилиндр (барабан для крепления и перемещения образцов), вращающийся со скоростью 1 об/мин. В центре барабана помещены две дуговые лампы и две ртутно-кварцевые лампы ПРК-2 для ультрафиолетового освещения, чем обеспечивается излучение, близкое по спектральному составу к солнечному свету. В аппарате создается интегральная поверхностная плотность потока излучения (730 ± 130) Вт/м² при поверхностной плотности потока ультрафиолетового излучения (30 ± 5) Вт/м². В аппарате имеются две системы орошения: одна – для создания влажности в камере, другая – для орошения самих образцов. Аппарат имеет щит управления, электродвигатель для привода барабана, редуктор, сопротивления для дуговых ламп, вентилятор, манометрические термометры (самопишущие и показывающие), форсунки для орошения образцов, автоматический клапан, программное реле для настройки режимов орошения.

Испытания нитей в аппарате искусственной погоды проводились в режиме, имитирующем северные климатические условия. Количество циклов воздействия климатических факторов соответствовало работе покрытия в течение 18 лет. После обработки в климатической камере образцы нитей были отмыты от битума гексаном.

Приготовленные образцы полиамидной жгутовой нити были доставлены в г. Кемерово, где в лаборатории ОТК Кемеровской акционерной компании «Химволокно» проведены их химические и физико-механические испытания. Кроме химических и физико-механических испытаний были сняты ИК-спектры образцов нитей на спектрофотометре марки «Спекорд М-80».

Результаты химических и физико-химических испытаний полиамидных жгутовых нитей приведены в табл. 1.

Анализируя данные таблицы, можно отметить, что большинство параметров претерпело незначительные изменения. После обработки нефтяным битумом относительная вязкость полиамидных нитей увеличилась на 0,04.

Таблица 1

Результаты физико-химических испытаний полиамидных жгутовых нитей

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

По истечении смоделированных в климатической камере 18 лет службы дорожного покрытия эта величина увеличилась только на 0,01. То есть основным фактором, повлиявшим на изменение величины относительной вязкости, оказалось взаимодействие волокон с нефтяным битумом. Процесс старения увеличил эту величину только на четверть. Обработка нитей нефтяным битумом привела к снижению массовой доли экстрагируемых веществ на 0,6 %, а процессы старения – на 0,5 %, что составило относительно эталонного образца 1,1 %. Обработка нитей битумом не повлияла на показатель термостабильности, который остался на прежнем уровне. Очень значительное влияние на термостабильность полиамидных нитей оказали процессы старения – этот показатель увеличился на 350 %. На температуру плавления нитей не повлияли ни взаимодействие с битумом, ни процессы старения. Величина разрывной удельной нагрузки после обработки нити битумом увеличилась на 19 %, но по истечении смоделированных 18 лет службы дорожного покрытия эта величина уменьшилась почти на 50 % относительно эталонного образца. Процессы старения привели также к снижению удлинения нити при разрыве на 41 %.

В связи с тем что кондиционные полиамидные нити имеют довольно высокую стоимость, для дисперсного армирования асфальтобетонных смесей целесообразно использовать отходы производства (брак, некондицию), что существенно снижает стоимость процесса. Бракованные и некондиционные нити также были подвергнуты аналогичным исследованиям. Результаты исследований представлены в табл. 2.

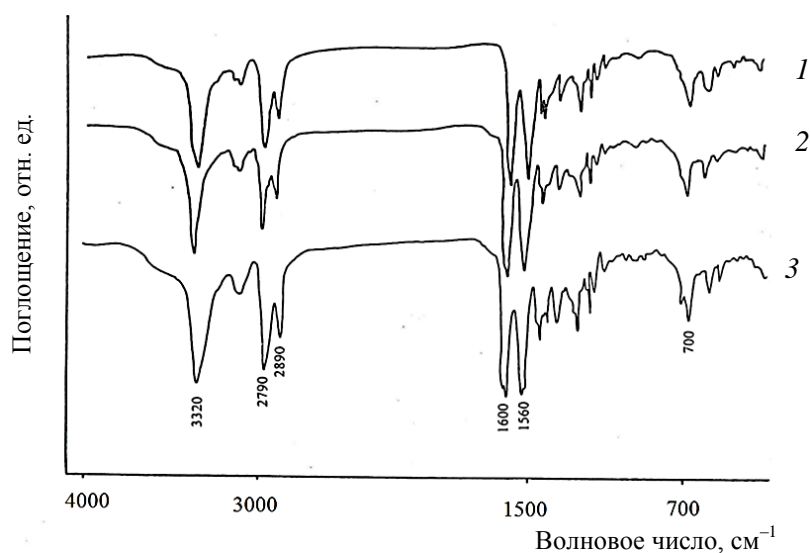
Таблица 2

Результаты физико-химических испытаний бракованных и некондиционных полиамидных жгутовых нитей

Наименование показателей	Единица измерения	Образец № 1	Образец № 2	Образец № 3
1. Относительная вязкость	–	2,6	2,6	2,5
2. Содержание экстрагируемых веществ	%	2,6	2,1	1,6
3. Термостабильность	%	0,2	0,2	0,7
4. Температура плавления	°С	215	215	217
5. Удельная разрывная нагрузка	гс/текс	14,3	18,6	8,0
6. Удлинение при разрыве	%	48,1	47,0	27,1

Анализируя результаты испытаний, представленные в табл. 2, можно отметить, что изменения показателей свойств бракованных и некондиционных полиамидных жгутовых нитей, подвергшихся старению, аналогичны изменениям показателей свойств кондиционных нитей. Следует иметь в виду, что эталонные образцы нитей изначально имели более низкие показатели удельной разрывной нагрузки и большее удлинение при разрыве, что закономерно, поскольку в некондиционных нитях при подготовке образцов могли образоваться локальные порывы.

Кроме приведенных выше исследований дисперсная арматура из качественных и бракованных полиамидных волокон была изучена с применением методов ИК-спектроскопии. Полученные ИК-спектрограммы оказались фактически одинаковыми, что свидетельствует об идентичности волокнообразующего полимера и в качественных, и в бракованных нитях. Результаты исследований представлены на рисунке. Идентификация спектров осуществлялась с использованием источников [9–11].



ИК-спектры исходных и подвергшихся старению полиамидных волокон:

1 – полиамидная жгутовая нить без обработки; 2 – полиамидная жгутовая нить, обработанная битумом и очищенная в гексане; 3 – полиамидная жгутовая нить, обработанная битумом, подвергнутая старению и очищенная в гексане

Из рисунка видно, что ИК-спектры исходного полиамидного волокна характеризуются полосами поглощения в области $1640\text{--}1690\text{ см}^{-1}$ (пик с полосой поглощения 1660 см^{-1} – «I-амидная полоса» карбонильной группы C=O). Свободная группа N-H обуславливает в дополнение к полосе C=O такие же полосы валентных колебаний, как N-H при $3050\text{--}3550\text{ см}^{-1}$ (пик обязан трансформе с полосой поглощения 3320 см^{-1}). Поглощение с полосой 1300 см^{-1} связано в основном с колебаниями C-N . На это колебание накладываются колебания NH «III-амидная полоса». Возможность образования межмолекулярных и водородных связей соответствует сдвигу в низкочастотную область на

100 см⁻¹ и менее свободной и ассоциированной полосы N-H, обусловленному водородными связями с изменением диэлектрической постоянной и взаимодействием между соседними молекулами в твердом и жидком состоянии в концентрированных растворах. В этой же области могут проявлять себя метиленовые звенья-CH₂.

Деформационные колебания N-H дают довольно интенсивную широкую полосу в области 650–900 см⁻¹ (пик 700 см⁻¹). Слабые полосы в области 1030–1230 см⁻¹ соответствуют валентным колебаниям CN.

Их положение мало отличается от валентных колебаний C-C. Полосы в области 2970 и 2890 см⁻¹ (дуплет) можно отнести к валентным колебаниям C-H. Косвенным подтверждением возможности такого отнесения является увеличение интенсивности этих полос у образца полиамидного волокна, обработанного битумом, подвергнутого старению и отмытого в гексане.

Сравнивая ИК-спектры исходной полиамидной жгутовой нити и ИК-спектры нитей, подвергнутых обработке, можно отметить, что существенного влияния на полиамидные волокна их обработка битумом и воздействия климатических факторов не имели.

Таким образом, вышеприведенные исследования, в том числе с привлечением методов ИК-спектроскопии, показали, что при обработке полиамидных волокон нефтяным битумом химический состав и физико-химические свойства претерпевают изменения, которые даже после смоделированных восемнадцати лет эксплуатации дорожного покрытия позволяют им выполнять функции дисперсной арматуры. Незначительное влияние на показатели свойств волокон дисперсной арматуры природно-климатических факторов является следствием нахождения нитей только в слое нефтяного битума. Следует ожидать, что при нахождении нитей в составе асфальтобетона, гораздо более надежно защищающего нити от прямого воздействия влаги, температуры и солнечной радиации, являющихся основными разрушителями полимерных материалов, влияние этих факторов на свойства химических нитей будет существенно ниже.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Армирование асфальтобетонных покрытий при строительстве и реконструкции дорожных одежд.* – М., 1990. – 44 с. (ОИ/ЦБНТИ Минавтодора РСФСР. Вып. 5. Автомобильные дороги).
2. *Smith, R.D.* Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report / R.D. Smith // *Transp. Res. Rec.* – 1983. – № 916. – P. 6–18.
3. *Tessoneau, H.* Revement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisiene Voie Macon nord / H. Tessoneau // *Revue generale des Routes et des Aerodromes.* – 1988. – V. 62. – № 650. – P. 77–78.
4. *Le Rugoflex.* Une experience de dix ans / Y. Pinaud, J. Hintzi, J. Poirier, M. Chanseaulme // *Revue generale des Routes et des Aerodromes.* – 1988. – № 649. – P. 61–64.
5. *Лукашевич, В.Н.* Применение теории перколяции для исследования процессов структурообразования дисперсно-армированных асфальтобетонов / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // *Автомобильные дороги и мосты.* – 2014. – № 1 (13). – С. 47–53.
6. *Исследования структурно-механических свойств дисперсно-армированных органоминеральных материалов / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов, Г.И. Прокофьева, И.В. Вакс // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета.* – 2015. – № 6. – С. 177–185.

7. Мерзликин, А.Е. Испытания конструкций дорожных одежд для оценки эффективности применения дисперсно-армированного асфальтобетона / А.Е. Мерзликин, И.П. Гамеляк // Конструирование, расчет и испытание дорожных одежд : тр. Союздорнии, 1990. – С. 17–25,
8. Лукашевич, В.Н. Исследование влияния технологии приготовления асфальтобетонных смесей на процессы старения асфальтового вяжущего при использовании волокнистых сорбентов в качестве дисперсной арматуры / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2. – С. 191–196.
9. Белами, Л. Новые данные по ИК-спектрам сложных молекул : пер. с англ. / Л. Белами. – М. : Мир, 1971. – 319 с.
10. Использование спектральных методов для идентификации и выявления строения полуфункциональных ароматических углеводородов / ЦНИИЭТИ. Нефтегаз. – М., 1963. – 12 с.
11. Наканиси, К. Инфракрасные спектры и строение органических соединений : пер. с англ. / К. Наканиси. – М. : Мир, 1965. – 216 с.

REFERENCES

1. Armirovaniye asfal'tobetonnykh pokrytiy pri stroitel'stve i rekonstruktsii dorozhnykh odezhd [Reinforcement of asphalt pavement during construction and reconstruction]. Moscow, 1990. 44 p. (rus)
2. Smith R.D. Laboratory testing of fabric interlayer for asphalt concrete paving: interim report. *Transp. Res. Rec.* 1983. No. 916. Pp. 6–18.
3. Tessoneau H. Revement Tris mince Mediflex en couche de Voulement sur Absur troisieme Voie Macon nord. *Revue generale des Routes et des Aerodromes.* 1988. V. 62. No. 650. Pp. 77–78.
4. Pinaud Y., Hintzi J., Poirier J., Chanseaulme M. Le Rugoflex. Une experience de dix ans. *Revue generale des Routes et des Aerodromes.* 1988. No. 649. Pp. 61–64.
5. Lukashovich V.N., Efanov I.N. Primeneniye teorii perkolyatsii dlya issledovaniya protsessov strukturoobrazovaniya dispersno armirovannykh asfal'tobetonov [Application of the percolation theory in studying structure formation in fiber reinforced asphalt concretes]. *Avtomobil'nye dorogi i mosty.* 2014. No. 1 (13). Pp. 47–53. (rus)
6. Lukashovich V.N., Efanov I.N., Prokof'yeva G.I., Vaks I.V. Issledovaniya strukturno-mekhanicheskikh svoystv dispersno armirovannykh organomineral'nykh materialov [Investigations of structural-mechanical properties of fiber reinforced organo-mineral materials]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2015. No. 6. Pp. 177–185. (rus)
7. Merzlikin A.E., Gamelyak I.P. Ispytaniya konstruktsiy dorozhnykh odezhd dlya otsenki effektivnosti primeneniya dispersno armirovannogo asfal'tobetona [Pavement structure testing for efficiency assessment of fiber reinforced asphalt concrete]. *Konstruirovaniye, raschet i ispytaniye dorozhnykh odezhd.* Moscow: Soyuzdornii Publ., 1990. Pp. 17–25. (rus)
8. Lukashovich V.N., Efanov I.N. Issledovaniye vliyaniya tekhnologii prigotovleniya asfal'tobetonnykh smesey na protsessy stareniya asfal'tovogo vyazhushchego pri ispol'zovanii voloknistykh sorbentov v kachestve dispersnoy armatury [Bitumen-concrete mix technology for aging asphalt binder when using fibrous sorbents as disperse reinforcement]. *Vestnik of Tomsk State University of Architecture and Building.* 2012. No. 2. Pp. 191–196. (rus)
9. Bellamy L. Novye dannye po IK-spektram slozhnykh molekul [The infrared spectra of complex molecules]. Moscow: Mir, 1971. 319 p. (transl. from Engl.)
10. Ispol'zovanie spektral'nykh metodov dlya identifikatsii i vyyavleniya stroeniya polufunktsional'nykh aromaticheskikh uglevodorodov [Spectral methods for structural identification of semi-functional aromatic hydrocarbons]. Moscow, 1963. 12 p. (rus)
11. Nakanishi K. Infrazrasnye spektry i stroeniye organicheskikh soedinenii [Infrared spectra and structure of organic compounds]. Moscow: Mir Publ., 1965. 216 p. (transl. from Engl.)