

Научная статья
УДК 625.7/.8+625.123
doi:10.52170/1815-9265_2026_78_97

Влияние дисперсного армирования на стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию

Юрий Александрович Цибариус¹, Никита Дмитриевич Игнатов^{2✉},
Илья Константинович Ардышев³

^{1, 2, 3} Сибирский государственный университет путей сообщения, Новосибирск, Россия

¹ yustu@yandex.ru

² ndignatov@yandex.ru✉

³ ardyshev.ilya@yandex.ru

Аннотация. Одним из способов повышения стойкости асфальтобетонов к пластическому колееобразованию является дисперсное армирование – введение в их состав различных фиброволокон. Существующими методиками проектирования составов фиброасфальтобетонных смесей определен рекомендуемый диапазон варьирования дозировок данных волокон, при этом их оптимальное процентное содержание устанавливается экспериментально в лабораторных условиях путем проведения серий итерационных подборов и испытаний. Указанные мероприятия выполняются преимущественно последовательно, что приводит к значительным временным и финансовым затратам. Сокращение данных затрат может быть достигнуто путем совершенствования существующей методики проектирования фиброасфальтобетонных смесей – установления функциональных зависимостей, позволяющих определять оптимальное процентное содержание фиброволокон расчетным путем.

В работе поставлен и проведен лабораторный эксперимент по моделированию процессов пластического колееобразования на асфальтобетонных покрытиях с целью определения эмпирических зависимостей средней глубины колеи от процентного содержания полиакрилонитрильных волокон в составе асфальтобетонных смесей и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего, входящего в состав этих смесей. Эксперимент состоял из отдельных опытов, каждый из которых заключался в подготовке образцов асфальтобетонных смесей с использованием битумных вяжущих материалов, имеющих различные значения сдвиговой устойчивости, которые определены при максимальной расчетной температуре слоя покрытия для исследуемого региона, и варьированием содержания полиакрилонитрильных волокон. Подготовленные образцы подвергались циклическим нагрузочным воздействиям на специализированной установке моделирования прокатывания нагруженного колеса. В результате экспериментов определены значения параметра, характеризующего стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию, – средней глубины колеи.

В итоге установлена функциональная зависимость изменения средней глубины колеи от содержания полиакрилонитрильных волокон и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего. Полученные результаты исследования позволяют, при известном значении сдвиговой устойчивости битумного вяжущего, рассчитать оптимальное содержание полиакрилонитрильных волокон для достижения требуемого значения средней глубины колеи в асфальтобетоне.

Ключевые слова: асфальтобетон, вяжущие материалы, пластическая колея, фиброасфальтобетон, стойкость к колееобразованию, средняя глубина колеи, полиакрилонитрильные волокна

Для цитирования: Цибариус Ю. А., Игнатов Н. Д., Ардышев И. К. Влияние дисперсного армирования на стойкость асфальтобетонов к пластическому колееобразованию // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. 2026. № 1 (78). С. 97–102. DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_97.

Original article

The influence of dispersed reinforcement on the resistance of asphalt concrete to plastic rutting

Yury A. Tsibarius¹, Nikita D. Ignatov^{2✉}, Ilya K. Ardyshev³

^{1, 2, 3} Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia

¹ yustu@yandex.ru

² ndignatov@yandex.ru✉

³ ardyshev.ilya@yandex.ru

Abstract. One way to increase the resistance of asphalt concrete to plastic rutting is to reinforce it with various types of fiber. Existing methods for designing fiber-reinforced asphalt concrete mixtures specify the recommended range of fiber dosages, with the optimal percentage determined experimentally in laboratory conditions through a series of iterative selections and tests. These activities are mainly carried out sequentially, which leads to significant time and financial costs. These costs can be reduced by improving the existing method for designing fiber-reinforced asphalt concrete mixtures in terms of establishing functional relationships that allow the optimal percentage of fiber content to be determined by calculation.

The paper presents a laboratory experiment on modeling the processes of plastic rutting on asphalt concrete pavements in order to determine the empirical dependencies of the average rut depth on the percentage of polyacrylonitrile fibers in the composition of asphalt concrete mixtures and the shear stability of the bitumen binder included in these mixtures. The experiment consisted of separate tests, each of which involved preparing samples of asphalt concrete mixtures using bituminous binders with different shear stability values determined at the maximum design temperature of the pavement layer for the region under study, and varying the content of polyacrylonitrile fibers. The prepared samples were subjected to cyclic loading on a specialized rolling wheel simulation machine. As a result of the experiments, the values of the parameter characterizing the resistance of asphalt concrete to plastic rutting – the average rut depth – were determined.

The results of the experiment established a functional relationship between the change in average rut depth and the polyacrylonitrile fiber content and shear stability of the bituminous binder. The results of the study allow, given the known shear stability of the bituminous binder, to calculate the optimal content of polyacrylonitrile fibers to achieve the required average rut depth in asphalt concrete.

Keywords: asphalt concrete; binders; plastic rutting; fiber-reinforced asphalt concrete; rutting resistance; average rut depth; polyacrylonitrile fibers

For citation: Tsibarius Yu. A., Ignatov N. D., Ardyshev I. K. The influence of dispersed reinforcement on the resistance of asphalt concrete to plastic rutting. *The Siberian Transport University Bulletin*. 2026;(78):97–102. (In Russ.). DOI 10.52170/1815-9265_2026_78_97.

Введение

Предельно допустимая глубина колеи на автомобильных дорогах закреплена в нормативных актах, устанавливающих требования к эксплуатационному состоянию покрытий по условиям обеспечения безопасности дорожного движения. Появление колеи на асфальтобетонных покрытиях – многофакторный процесс, в котором участвуют как пластические деформации покрытия и/или основания, так и процессы механического износа материала покрытия [1–3]. Снижение величины пластического колееобразования достигается путем обеспечения сдвигоустойчивости асфальтобетонных смесей, требуемой по условиям эксплуатации конкретного участка автомобильной дороги.

Согласно действующим нормативным документам устойчивость асфальтобетонов к формированию колеи данного типа определяют посредством измерения показателя «средняя глубина колеи» в ходе лабораторных испытаний [4, 5]. Как отмечено в работах ряда авторов [4, 6–9], ключевым фактором, определяющим свойства асфальтобетона в части его стойкости к пластическому колееобразованию, является сдвиговая устойчивость применяемого битумного вяжущего при максимальной расчетной температуре слоя покрытия. Данный фактор необходимо учитывать при исследованиях процесса изменения сдвигоустойчивости асфальтобетонных смесей.

Одним из вариантов повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий является их дисперсное армирование, достигаемое, в частности, введением в состав асфальтобетонных смесей различных фиброволокон [10]. Данный способ позволяет повысить характеристики сдвигоустойчивости асфальтобетонной смеси без корректировки ее состава – используемого каменного материала и битумного вяжущего. Однако существующая методика проектирования составов армированных асфальтобетонных смесей имеет существенный недостаток, который заключается в отсутствии расчетной методики определения оптимального содержания фиброволокон, необходимого для достижения требуемой сдвигоустойчивости асфальтобетонной смеси. Целью данной работы является получение функциональной зависимости изменения средней глубины колеи от содержания полиакрилонитрильных волокон (ПА-волокон) и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего при максимальной расчетной температуре слоя покрытия для исследуемого региона 64 °C (далее – сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала).

Методика исследования

Для оценки степени и характера влияния процентного содержания ПА-волокон на устойчивость асфальтобетонов к образованию пластических деформаций исследовалась горячая асфальтобетонная смесь А16Вт, широко

применяемая в природно-климатических условиях Западной Сибири для дорог с тяжелыми условиями движения. Состав исследуемой смеси представлен в табл. 1.

Таблица 1
Состав асфальтобетонной смеси А16Вт

Материал	Содержание в смеси, %
Минеральная часть смеси по фракциям (песок дробленый, щебень из диабазы), мм:	
0–4	43,1
4–8	23,3
8–16	29,6
Битумный вяжущий материал PG 64-40	4,0 (в 100 %)
ПА-волокна	От 0 до 0,5 (сверх 100 % минеральной части)

Эксперимент состоял из отдельных опытов, каждый из которых заключался в подготовке образцов из асфальтобетонных смесей (рис. 1) с использованием битумных вяжущих материалов различных партий, отличающихся значениями сдвиговой устойчивости (фактор Y), и варьированием содержания ПА-волокон (фактор X). Матрица планирования эксперимента представлена в табл. 2.



Рис. 1. Изготовленный контрольный образец-плита

Испытания выполнялись для двух контрольных образцов каждого исследуемого состава асфальтобетонной смеси. Подготовленные образцы подвергались предварительному термостатированию на воздухе внутри испытатель-

ной установки прокатывания нагруженного колеса (рис. 2) при температуре $65 \pm 1^\circ\text{C}$, выбранной в соответствии с нормативными требованиями для максимальной расчетной температуры слоя покрытия для исследуемого региона (64°C). Далее посредством возвратно-поступательного циклического воздействия нагруженного колеса с шиной на исследуемый образец асфальтобетона создавались условия для возникновения колеи на его поверхности. Испытания продолжались в течение 10 000 циклов нагрузки (20 000 прокатываний колеса) или до образования колеи на одном из испытываемых образцов глубиной более 15 мм. Глубина колеи регистрировалась испытательной установкой в режиме реального времени и вносилась в базу данных проводимого испытания. Итоговая средняя глубина колеи определялась после окончания испытания как среднеарифметическое значение глубины колеи двух испытываемых образцов, полученных из одной асфальтобетонной смеси.

Таблица 2
Матрица планирования эксперимента

Значение фактора X , %	Номер опыта при значении фактора Y , кПа				
	1,91	2,02	2,15	2,25	2,39
0,30	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
0,35	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5
0,40	3.1	3.2	3.3	3.4	3.5
0,45	4.1	4.2	4.3	4.4	4.5
0,50	5.1	5.2	5.3	5.4	5.5



Рис. 2. Вид установки для испытания прокатыванием нагруженного колеса

Результаты исследования

Результаты определения средней глубины колеи PRD , мм, полученные в ходе проведения лабораторных экспериментов, приведены в табл. 3.

На основании статистической обработки полученных экспериментальных данных установлена зависимость средней глубины колеи от содержания ПА-волокон и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала, представленная на рис. 3 в виде поверхности влияния.

В результате статистической обработки данных определена функциональная эмпирическая зависимость изменения средней глубины колеи от сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала и содержания ПА-волокон:

$$PRD = 15,4823 + 3,5484y - 9,796y - 5,6571x^2 - 0,6356xy + 2,0632y^2,$$

где PRD – значение средней глубины колеи, мм; y – сдвиговая устойчивость битумного вяжущего материала, кПа; x – содержание ПА-волокон, %.

Заключение

В результате проведенных исследований отмечено снижение величины средней глубины колеи при увеличении дозировки полиакрилонитрильных волокон в асфальтобетонной смеси. При этом для достижения нормативного значения средней глубины колеи для исследуемого асфальтобетона А16Вт требуется добавление: 0,3 % полиакрилонитрильных волокон – при сдвиговой устойчивости битумного вяжущего

Таблица 3

Результаты определения значений показателя «средняя глубина колеи»

Опыт	PRD	Опыт	PRD	Опыт	PRD	Опыт	PRD	Опыт	PRD
1.1	4,54	2.1	4,44	3.1	4,37	4.1	4,19	5.1	3,98
1.2	4,23	2.2	4,15	3.2	4,07	4.2	3,97	5.2	3,82
1.3	4,11	2.3	4,04	3.3	3,94	4.3	3,81	5.3	3,68
1.4	4,01	2.4	3,94	3.4	3,84	4.4	3,72	5.4	3,54
1.5	3,97	2.5	3,87	3.5	3,75	4.5	3,64	5.5	3,41

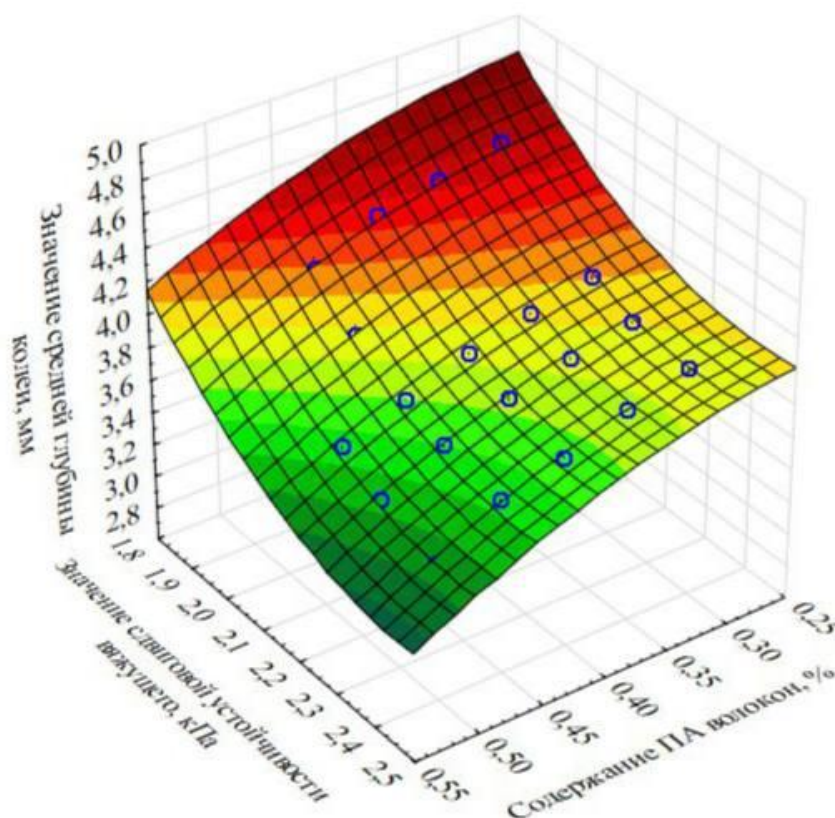


Рис. 3. Зависимость средней глубины колеи от содержания ПА-волокон и сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала

материала 2,39 кПа; 0,5 % полиакрилонитрильных волокон – при сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала 1,91 кПа. Таким образом, оптимальное содержание полиакрилонитрильных волокон является переменным параметром и зависит от сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала, входящего в состав асфальтобетонной смеси.

По результатам эксперимента установлена функциональная зависимость изменения средней глубины колеи асфальтобетонной смеси от содержания полиакрилонитрильных воло-

кон и значения сдвиговой устойчивости битумного вяжущего материала. Полученные результаты исследования могут быть использованы для расчетного определения оптимального содержания полиакрилонитрильных волокон в асфальтобетонной смеси А16Вт как на этапе подбора ее состава, так и для внесения оперативных корректировок состава на этапе ее выпуска в зависимости от изменения значений сдвиговой устойчивости вяжущих материалов различных партий, поступающих на производство.

Список источников

1. Конорева О. В., Муравьев Ю. А. Анализ современных методов повышения устойчивости асфальтобетонных покрытий к колееобразованию // Инженерный вестник Дона. 2016. № 4 (43). С. 136. EDN VYBWGI.
2. Mijoski G. Rut appearance on pavement surface and measurements on motorway A-4 in Macedonia // International Scientific Conference People, Buildings and Environment. Kromeriz, Czech Republic, 2014. P. 296–305.
3. Костельнов М. П., Перевалов В. П., Пахаренко Д. В. Практика борьбы с колеейностью асфальтобетонных покрытий может быть успешной // Дорожная техника. 2011. № 2. С. 54–70.
4. Стойкость асфальтобетонов к образованию пластической колеи в зависимости от сдвиговой устойчивости вяжущих материалов / Ю. А. Цибариус, А. Л. Ланис, А. Н. Бердюгин, М. А. Разуваев // Мир транспорта. 2024. Т. 22, № 2 (111). С. 34–39. DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-2-4. EDN BUILED.
5. Evaluation of the Rutting Performance of the Field Specimen Using the Hamburg Wheel-Tracking Test and Dynamic Modulus Test / D. Xiongwei, J. Yanshun, W. Shaoquan, G. Ying // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 1. P. 1–15.
6. Ziari H., Shirini B., Imaninasab R. Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures // Engineering Solid Mechanics. 2015. Vol. 3. P. 253–262.
7. О модификации битумов и асфальтобетонных смесей для повышения сдвигоустойчивости асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / Т. И. Левкович, А. И. Беляков, А. Е. Билько, А. С. Тищенко // Приволжский научный вестник. 2016. № 1 (53). С. 48–53. EDN VJLTHR.
8. Кирюхин Г. Н. Сдвигоустойчивость щебеночно-мастичного асфальтобетона // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. 2008. № 40. С. 76–79. EDN NUZDXF.
9. Чернов С. А., Чирва Д. В., Леконцев Е. В. Влияние полимерно-битумного вяжущего на процессы колееобразования в верхних слоях покрытий автомобильных дорог // Науковедение. 2012. № 4 (13). С. 226. EDN PVXHPX.
10. Игнатов Н. Д. О целесообразности и направлении исследований использования фиброволокон при проектировании составов асфальтобетонных смесей // Политранспортные системы : материалы XIII Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Новосибирск, 24–25 октября 2024 г. Новосибирск : Сибирский государственный университет путей сообщения, 2024. С. 36–39. EDN LRIJX.

References

1. Konoreva O. V., Muravyov Yu. A. Analysis of modern methods for improving the resistance of asphalt concrete pavements to rutting. *Don Engineering Bulletin*. 2016;(43):136. (In Russ.). EDN VYBWGI.
2. Mijoski G. Rut appearance on pavement surface and measurements on motorway A-4 in Macedonia. *International Scientific Conference People, Buildings and Environment*. Kromeriz, Czech Republic; 2014. P. 296–305.
3. Kostelnov M. P., Perevalov V. P., Pakharensko D. V. Practical measures to combat rutting in asphalt concrete pavements can be successful. *Road Technology*. 2011;(2):54–70. (In Russ.).
4. Tsibarius Yu. A., Lanis A. L., Berdyugin A. N., Razuvaev M. A. Resistance of asphalt concrete to plastic rutting depending on the shear stability of binding materials. *World of Transport*. 2024;22(111):34–39. (In Russ.). DOI 10.30932/1992-3252-2024-22-2-4. EDN BUILED.
5. Xiongwei D., Yanshun J., Shaoquan W., Ying G. Evaluation of the Rutting Performance of the Field Specimen Using the Hamburg Wheel-Tracking Test and Dynamic Modulus Test. *Advances in Civil Engineering*. 2020;(1):1–15.

6. Ziari H., Shirini B., Imaninasab R. Rutting evaluation of rubberized and SBS modified porous asphalt mixtures. *Engineering Solid Mechanics*. 2015;(3):253–262.
7. Levkovich T. I., Belyakov A. I., Bilko A. E., Tishchenko A. S. On the modification of bitumens and asphalt concrete mixtures to increase the shear resistance of asphalt concrete pavements of motor roads. *Privolzhsky Scientific Journal*. 2016;(53):48–53. (In Russ.). EDN VJLTHR.
8. Kiryukhin G. N. Shear resistance of crushed stone-mastic asphalt concrete. *Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University*. 2008;(40):76–79. (In Russ.). EDN NUZDXF.
9. Chernov S. A., Chirva D. V., Lekontsev E. V. Influence of polymer-bitumen binder on rutting processes in the upper layers of road pavements. *Internet Journal of Science Studies*. 2012;(13):226. (In Russ.). EDN PVXHPX.
10. Ignatov N. D. On the feasibility and direction of research into the use of fiber reinforcements in the design of asphalt concrete mixtures. *Political Transport Systems: Proceedings of the XIII All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, Novosibirsk, October 24–25, 2024*. Novosibirsk: Siberian Transport University; 2024. P. 36–39. (In Russ.). EDN LRIJXX.

Информация об авторах

Ю. А. Цибариус – кандидат технических наук, старший научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Н. Д. Игнатов – аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство», ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории «Контроль качества дорожных одежд и земляного полотна» Сибирского государственного университета путей сообщения.

И. К. Ардышев – преподаватель кафедры «Путь и путевое хозяйство» Сибирского государственного университета путей сообщения.

Information about the authors

Yu. A. Tsibarius – Candidate of Engineering, Senior Researcher of the Quality Control of Pavements and Subgrades Laboratory, Siberian Transport University.

N. D. Ignatov – Postgraduate, Leading Engineer of the Quality Control of Pavements and Subgrades Laboratory, Siberian Transport University.

I. K. Ardyshev – Lecturer of the Track and Track Facilities Department, Siberian Transport University.

Статья поступила в редакцию 25.09.2025; одобрена после рецензирования 01.12.2025; принята к публикации 26.01.2026.

The article was submitted 25.09.2025; approved after reviewing 01.12.2025; accepted for publication 26.01.2026.