УДК 691.175.5/.8
doi:10.18720/SPBPU/2/id25-54

В.Ю. Лебедева[1], А.Я. Башкарев[1], Н.И. Паневин[2]
[1]Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого,
Санкт-Петербург, Россия, bessonova.viktoria@yandex.ru
[2]ООО «Автодорис», Воронеж, Россия

ТЕРМОАКТИВИРОВАННЫЙ ИЗНОС ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИТОВ НА ПРИМЕРЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА

Аннотация

Теоретически и экспериментально доказывается, что износ полимерноминерального композита – асфальтобетона может иметь два вида разрушения: адгезионный – отслоение битума от минеральных фракций и когезионный – термомеханическое разрушение самого соединяющего слоя битума. Установлено: энергия активации разрушения самого битума значительно меньше. Следовательно, для повышения износостойкости асфальтобетона нужно в первую очередь повышать долговечность тонкого соединительного слоя битума. Разработана методика определения его чувствительности к механическим напряжениям.

Ключевые слова: битум, минеральные материалы, асфальтобетон, долговечность, износостойкость, адгезия, когезия.

Введение

Одно из самых быстропроявляющихся видов разрушения дорожных асфальтобетонных покрытий – это колееобразование. Главные его причины – износ и пластическая деформация под действием транспорта. С увеличением интенсивности дорожного движения и появлением большого количества в зимнее время транспорта с шипованными колесами проблема износа стала особенно острой. По данным Петербургского ОАО «Дорсервис» даже легковой автомобиль за 1 км пробега изнашивает 24 грамма материала покрытия.

Интересно, что во всех скандинавских странах с их холодными зимами особенно интенсивно идет поиск путей уменьшения износа дорожного покрытия. Кстати, в газете «Деловой Петербург» от 13 июля 2011 года было опубликовано, что в Финляндии в 1960 году легковой автомобиль с четырьмя шипованными колесами при скорости 100 км/ час за 100 км пробега изнашивал 11 кг покрытия, а в 1990 году благодаря ряду мер (не указывается каких) износ был уже 2,5 кг. Можно предположить, что это снижение в основном достигнуто за счет соответствующей организации дорожного движения.

Естественно, ожидать, что износ асфальтобетона, как любого другого материала можно уменьшить и за счет повышения его износостойкости. Но, к сожалению, это направление борьбы с колееобразованием пока остается недостаточно изученным, хотя отдельные работы уже выполнены [1-3].

Асфальтобетон – многокомпонентный композит, состоящий примерно на 95 % из минеральных фракций большого диапазона дисперсности. Это – щебень, песок и минеральный порошок. Все они соединяются в единый конструкционный

материал 4-6 % битумом, который по своей природе является натуральным термопластичным полимером.

Прочность асфальтобетона, естественно, и его износостойкость, на прямую зависят от фактической площади контакта битума с поверхностью его твердых фракций. Среди них, благодаря малой дисперсности минеральный порошок даже при его минимальной доле по массе обеспечивает наибольшую часть этой площади.

Минеральные фракции, будучи химически нейтральными, оказывают довольно большое воздействие на формирования надмолекулярных структур в битуме, что положительно отражается на его физико-механических свойствах. Естественно, эффект от этого влияния распределяется между минеральными фракциями прямо пропорционально их фактической площади контакта с битумом [4-6].

Прочность и долговечность адгезионного соединения битума с минеральными составляющими асфальтобетона, по мнению большинства специалистов в основном предопределяют срок службы дорожных покрытий как по деформируемости, растрескиванию, так и износостойкости.

Методы и материалы

Любой износ является результатом действия сдвигающих нагрузок, вызывающих появления касательных напряжений во всех составляющих композита, включая связующий тонкий слой адгезива, которым в данном случае является битум. Учитывая высокую прочность минеральных материалов, можно уверенно утверждать, что именно он является наиболее слабым звеном в асфальтобетоне. При этом разрушение может происходить в виде его отслоения от минеральных фракций (адгезионное) или предельного деформирования самого битума на сдвиг (когезионное). Таким образом, чтобы найти способ повышения износостойкости асфальтобетона, необходимо в первую очередь установить вид разрушения.

С этой целью в данной работе было проведено исследование прочности и долговечности склейки битумом плоских гранитных образцов, по схеме, изображенной на рисунке 1.

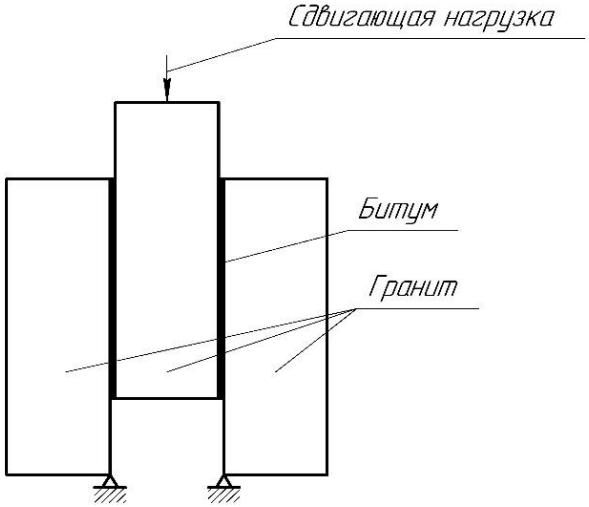

Рисунок 1 – Нагружение склеенных гранитных образцов

Технология и режимы склеивания здесь не описываются. Скорость движения нагружающих пуансонов на испытательной машине ИР 5047-50 Ивановского приборного завода составляла 1 мм/мин. Толщина битумного слоя у всех образцов была одинаковой 0,1 мм и обеспечивалась специальными прокладками и сжатием

склеенных горячим битумом образцов до наступления их полного охлаждения до нормальной температуры (23±1) ºС.

В работах [7,8] была высказана достаточно обоснованная гипотеза, что адгезионная способность термопластов, к которым относится и битум, возникает как результат термодеструкции их молекул, сопровождающийся образованием активных радикалов, способных взаимодействовать с поверхностями других материалов. От их поверхностной энергии зависит во многом энергия этих связей [9].

Образовавшиеся связи даже при отсутствии механических напряжений в свою очередь подвергаются термодеструкции, т.е. параллельно идут два процесса: образование адгезионных связей и их деструкция. При постоянной температуре изменяющееся во времени [10] количество остающихся адгезионных связей можно описать формулой (1):

$$N = z\frac{t}{\tau_0 \exp\dfrac{u_б}{RT}}\left(1-\frac{t}{2\tau_0 \exp\dfrac{u_a}{RT}}\right) \qquad (1)$$

где $u_а$, $u_б$ – энергии активации разрушения молекул (или термопласта-адгезива) и образовавшихся адгезионных связей, z – коэффициент пропорциональности между прочностью соединения и количеством адгезионных связей, устанавливающийся после испытания образцов на прочность, τ_0 – эмпирический параметр, равный 10^{-11}–10^{-13} с (предполагается, что это период вращения электрона вокруг ядра атома), T – температура (К), R – газовая постоянная.

Если взять первую производную от выражения (1), то приравняв ее к нулю, можно определить момент t_*, когда количество сохраняющихся связей, а, следовательно, и прочность адгезионного соединения будут максимальные:

$$t_* = \tau_0 \exp\frac{u_a}{RT} \qquad (2)$$

Если экспериментально определить время, через которое при температуре Т прочность адгезии достигает максимума, то с помощью этой же формулы можно определить величину $u_а$ (3):

$$u_a = RT(\ln t_* - \ln \tau_0) \qquad (3)$$

Если по результатам экспериментов построить два графика изменения адгезионной прочности после выдержки во времени склеенных битумом (или другим термопластом) при двух разных температурах $T_1 > T_2$, то они будут выглядеть согласно рисунку 2.

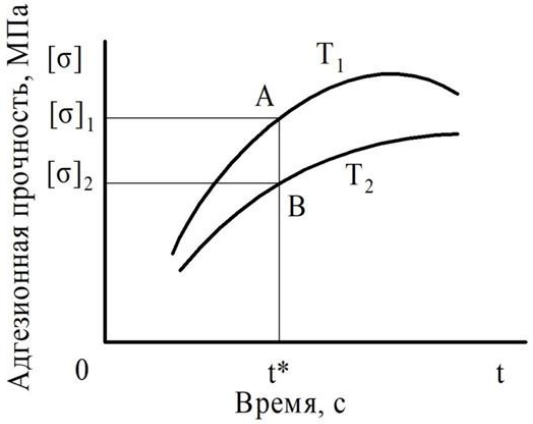

Рисунок 2 – Изменение адгезионной прочности

Соотношение адгезионной прочности $[\sigma]_1$ и $[\sigma]_2$, согласно формуле (1), запишется в виде выражения (4):

$$\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} = \frac{(1-\frac{t}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_1}})\cdot\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT_2}}{(1-\frac{t}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_2}})\cdot\tau_0 \exp\frac{u_б}{RT_1}} \quad (4)$$

Откуда после логарифмирования можно получить формулу для расчета энергии активации разрушения битума $u_б$ (5):

$$u_б = \frac{\ln(1-\frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_1}}) - \ln(1-\frac{t_*}{2\tau_0 \exp\frac{u_a}{RT_2}}) - \ln\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}}{\frac{1}{R}\left(\frac{1}{T_2}-\frac{1}{T_1}\right)} \quad (5)$$

Этот метод не требует многочисленных экспериментов, необходимых для построения графиков $[\sigma] = f(t)$ при двух разных температурах. Достаточно экспериментально определить прочность адгезии через одно и то же время t_* при двух разных температурах термостатирования T_1 и T_2 .

С использованием разработанного метода была определена энергия активации разрушения битумов и их адгезионных соединений с гранитом трех разных карьеров северо-западного региона. Во всех случаях энергия разрушения самого битума была ниже, чем их адгезии и довольно в широком диапазоне: (14-61)%. Самый лучший результат был от производителя МНПЗ.

Следовательно, пока можно сделать вывод о том, что разрушение асфальтобетона имеет вид не адгезионный, а когезионный. Этим процессом можно управлять выбором природы минеральных фракций: щебня, песка и минерального порошка. Последний вариант наиболее перспективен.

Согласно термофлуктуационной теории прочности и полученных результатов в процессе эксплуатации дорожного покрытия происходит постепенное снижение его прочности под воздействием повышенной температуры и механических напряжений, что может быть рассчитано с помощью критерия Бейли [11-12] с учетом происходящего снижения прочности (6):

$$\int_0^\tau \frac{dt}{\tau_0 \cdot \exp\frac{u-\gamma\sigma(t)}{RT(t)}} = 1-\frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]_a} \quad (6)$$

где $[\sigma]$ – предел прочности адгезива, т.е. битумного слоя между минеральными фракциями, на сдвиг с учетом его увеличения за счет контактных давлений, σ_{max} – максимальные напряжения от рабочих нагрузок, γ – коэффициент чувствительности битума к механическим напряжениям. Значения $[\sigma]$ и γ определялись по следующей методике.

В металлическое кольцо 1 (рисунок 3) заливается расплавленная при заданной экспериментом температуре с заранее введенными в нее модифицирующими

добавками полимерная композиция 2 (в данной работе битумная). Пуансон 3 после поджатия до кольца 1 формирует толщину слоя – 2 мм.

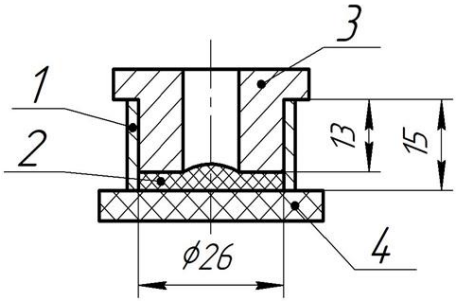

Рисунок 3 – Рисунок 3 – Формирование битумного образца-диска
1-металлическое кольцо, 2- битум, 3-пуансон, 4-керамическая плитка

После охлаждения и перехода битума в твердое состояние кольцо 1, с извлеченным пуансоном 3, устанавливается в специальное устройство, представленное на рисунке 4.

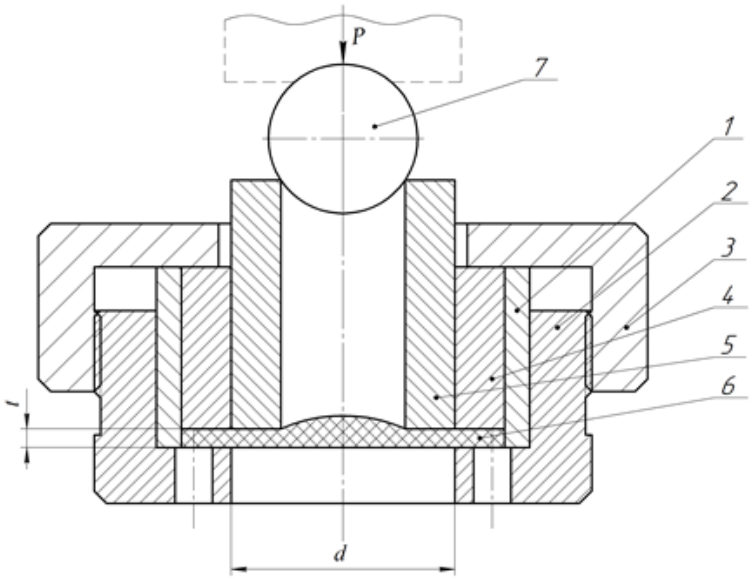

Рисунок 4 – Рисунок 4 – Устройство для испытания образцов из битума на срез
1-кольцо, 2-оправка, 3-поджимная гайка, 4-поджимной цилиндр, 5-пуансон, 6-битум, 7-металлический шарик

Специфика устройства состоит в том, что испытуемый материал в находящемся внутри кольца 1, установленного внутри оправки 2 и поджатого в ней гайкой 3, сверху перекрыт цилиндром 4, в который по скользящей посадке опускается пуансон 5. После его нагружения через металлический шарик 7 он срезает испытуемый битум на срез по кольцевой поверхности ϕdx2 мм^2. Такая конструкция создает условия чистого сдвига без каких-либо других деформаций, что позволяет точно определять предел прочности испытуемого материала на «чистый» сдвиг.

Результаты и обсуждение

В процессе испытания битумного образца 6 (рисунок 4) к пуансону 5 прикладывалась нагрузка через пружину небольшой жесткости, чтобы даже при незначительных деформациях, возникающих в процессе продолжительной нагрузки, ее величина оставалась постоянной.

Для сокращения продолжительности эксперимента предварительно в том же устройстве (рисунок 4) определялся предел прочности битума на сдвиг [σ] при движении пуансона 5 мм в минуту, хотя на данном этапе скорость нагружения большого значения не имеет.

После этого опыты повторяются, но при постоянной температуре, нагрузки, создающий напряжения в битуме 0,85 [σ]. Из выражения (6) после его логарифмирования получается формула (7):

$$RT(\ln\tau + 25,7) = u_б - 0,85\gamma[\sigma] \quad (7)$$

Откуда следует, что коэффициент чувствительности битума к механическим напряжениям равен (8):

$$\gamma = \frac{u_б - RT(\ln\tau + 25,7)}{0,85[\sigma]}, \quad (8)$$

где τ – время до разрушения образца.

Таблица 1 – Энергия активации разрушения адгезии $u_а$ и битума $u_б$

Битум БНД 70/100 КИНЕФ	Температура, Т, °С	Время, мин	Прочность, МПа	$u_а$, кДж/моль	$u_б$, кДж/моль
Гранит Эркиля	170 150	172800 172800	1,03 0,88	146,115	60,022
Гранит Красногорское	170 150	172800 172800	0,88 0,54	146,115	85,791
Гранит Габбро-диабаз	170 150	86400 86400	1,07 0,98	143,564	54,393

Результаты расчетов энергий активации разрушения, представленные в таблице 1, показывают, что энергия адгезионных связей не зависит от марок использованных гранитов. Она практически полностью определяется битумом и составляет примерно 146,1 кДж/моль, т.е. значительно больше, чем у Ван-дер-Ваальсовых сил (0,8-8,2 кДж/моль). Скорее всего, это слабые в данном случае химические ковалентные связи на нижней границе их возможности.

Проведенные исследования показали, что слабым местом в асфальтобетоне при воздействии сдвигающей нагрузки со стороны колеи автомобилей является слой битума, соединяющий все минеральные фракции. Таким образом, его адгезионная прочность значительно превосходит когезионную. Объяснением этого явления могут быть результаты опубликованных ранее исследований [13-15], проведенные с помощью инфракрасной спектрометрии, которые показали, что минеральные материалы способствуют возникновению в тончайшем граничном слое битума упорядоченной надмолекулярной структуры. Кроме того, из минеральных фракций в битум могут проникать ионы железа, создающие напряжения сжатия межатомных связей.

Все эти явления способствуют увеличению прочности адгезии по сравнению с внутренними структурами битума.

Динамика, описываемых процессов зависит от температуры и времени нагрева, что можно регулировать с помощью термостатирования горячей асфальтобетонной смеси.

Заключение

Раскрыт механизм разрушения асфальтобетона в условиях износа.

Обоснована перспектива методики расчета долговечности асфальтобетона в процессе его нагружения сдвигающими нагрузками.

Разработаны экспериментальные методы определения энергии активации разрушения битума и его адгезии, а также коэффициента их чувствительности к механическим нагрузкам на сдвиг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1.Чернов, С. А. Влияние полимерно-битумного вяжущего на процессы колееобразования в верхних слоях покрытий автомобильных дорог / С. А. Чернов, Д. В. Чирва, Е. В. Леконцев // Интернет-журнал Науковедение. - 2012. - № 4(13). - С. 226.

2.Васильев, Ю. Э. Взаимодействие шипованных шин с дорожным покрытием / Ю. Э. Васильев, Г. А. Понарин // Строительные материалы. - 2016 - № 12 - С. 60-63.

3.Васильев Ю.Э. Исследование устойчивости дорожно-строительных материалов к износному колееобразованию в условиях, приближенных к эксплуатационным / Ю.Э. Васильев, А.В. Ивачев, И. С. Братищев // Интернет-журнал "Науковедение". - 2014. - Т. 7. - № 5. - С. 11TVN514. - URL: https://naukovedenie.ru/PDF/11TVN514.pdf (дата обращения: 10.04.2025).

4.Xu, Yazhi & Zheng, Chuanfeng & Feng, Yupeng & Guo, Xuedong. (2018). Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis. Construction and Building Materials. 183. 95-101.

5.Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete / A. Ya. Bashkarev, V. Yu. Bessonova, Yu. G. Lazarev, V. P. Lozhechko // Construction of Unique Buildings and Structures. - 2023. - No. 3(108). - P. 10802.

6.Башкарев А.Я., Кудрявцева Н.Н. Значение минерального порошка в асфальтобетонной смеси // Дорожная техника. - 2016. - С. 20-22.

7.В.И. Веттегрень, И.И. Новак, Б.Б. Кулик. Тепловые и флуктуационные деформации химических связей в поверхностных и граничных слоях полимеров. Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 5. с.893-898.

8.Zhang H., Ge., Ye H. Effectiveness of the heat conduction rein forcement of particle filled composites. Modelling simul. Mater.Sce.Eng.2005. Vol.13, pp. 401-412.

9.Веттегрень В.И. Определение энергии активации и времени ожидания дилатонов в полимерах // Физика твердого тела. - 1986 - Т. 82. Вып. 10. - С. 124-127.

10.Динамика микротрещин в полимерном композите при трении / В. И. Веттегрень, А. И. Ляшков, А. В. Савицкий [и др.] // Журнал технической физики. - 2012. - Т. 82, № 10. - С. 124-127.

11.Петров, Валентин Алексеевич. Термоактивированное разрушение / В. А. Петров ; Федеральное агентство по образованию, Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. — Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2006. - 166, [1] с.

12.Механизм формирования энергетических флуктуаций и методика его изучения / Ю. В. Ракитский, [и др.] // Доклады Академии наук СССР. - 1985. - Т. 285, № 4. - С. 941-945.

13.Башкарев, Альберт Яковлевич. Долговечность полимерных композитов [Текст] / А. Я. Башкарев, В. И. Веттегрень, М. А. Суслов ; М-во образования и науки Российской Федерации, Санкт-Петербургский политехнический ун-т Петра Великого. — Санкт-Петербург : Изд-во Политехнического ун-та, 2016. - 147 с.

14.Веттегрень В.И. Спектроскопическое изучение разрушающих флуктуаций плотности // Физика прочности и пластичности. Л. Наука, 1986, С.17-27.

15. Веттегрень В.И., Новак И.И. Определение истинных напряжений на межатомных связях в нагруженных полимерах методом инфракрасной спектрометрии // Физика твердого тела. 1973. Т.15. Вып. 5. С. 1417-1422.

V.Y. Lebedeva[1] A.Y. Bashkarev[1], N.I. Panevin[2]

[1]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,
Saint Petersburg, Russia, bessonova.viktoria@yandex.ru
[2]OOO «Avtodoris», Voronezh, Russia

THERMOACTIVATED WEAR OF POLYMER COMPOSITES ON THE EXAMPLE OF ASPHALT CONCRETE

Abstract

Theoretically and experimentally, it is proved that the wear of a polymer-mineral composite – asphalt concrete – can have two types of destruction: adhesive – separation of bitumen from mineral fractions and cohesive – thermomechanical destruction of the bitumen connecting layer itself. It has been established that the activation energy of the destruction of bitumen itself is much lower. Therefore, in order to increase the wear resistance of asphalt concrete, it is necessary first of all to increase the durability of a thin bitumen connecting layer. A method for determining its sensitivity to mechanical stresses has been developed.

Keywords: bitumen, mineral materials, asphalt concrete, durability, wear resistance, adhesion, cohesion.