



Research Article

Received: March 26, 2023

Accepted: April 23, 2023

Published: May 10, 2023

ISSN 2304-6295

Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete

Bashkarev, Albert Yakovlevich¹ Bessonova, Victoria Yurievna^{1*} Lazarev, Yuriy Georgievich¹ Lozhechko, Viktor Petrovich¹

¹ Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; bashkarev@spbstu.ru (B.A.Y.); bessonova.viktoria@yandex.ru (B.V.Y.); lazarev-yurij@yandex.ru (L.Y.G.); vplozhechko@mail.ru (L.V.P.);

Correspondence: * email bessonova.viktoria@yandex.ru; contact phone [+79312924945](tel:+79312924945)

Keywords:

Asphalt concrete; Bitumen; Granite; Adhesion; Strength

Abstract:

The strength and durability of asphalt concrete are directly related to the adhesive properties of the bitumen. The destruction of asphalt concrete occurs at the boundaries of its mineral fractions' connection, i.e., at the adhesive connection. **The object of the study** is the adhesion strength of bitumen and granite in asphalt concrete. The research **method** is based on the thermofluctuation theory of strength. The initial increase in adhesion strength can be explained by the fact that during the thermal degradation of bitumen molecules, other active radicals appear to create adhesion bonds. At the same time, there is a process of thermal degradation not only of bitumen but also of the adhesive bonds formed. It is confirmed that the destruction of asphalt concrete occurs at the boundaries of the connection of its mineral fractions, i.e., at the adhesive bond. The character of fracture can be cohesive, but the strength of bitumen at the boundary with the surface of mineral fractions and in the free state significantly differs. Thus, we can conclude that choosing the correct temperature-time technological regime can significantly increase the initial adhesive strength of the formed asphalt concrete. According to calculations, this will also provide an increase in its durability.

1 Введение/ Introduction

Асфальтобетон является основным материалом для создания дорожных покрытий, так как обладает хорошими технологическими и эксплуатационными качествами. По своему составу и строению он относится к минеральным композиционным материалам. Размеры его фракций находятся в диапазоне от нескольких десятков микрон до десятков миллиметров. Все они объединяются в единый монолит с помощью 5-7% битума, который по характеру строения молекул можно отнести к органическим полимерам.

Проблема повышения прочности и долговечности асфальтобетона остается важной задачей в рамках национального проекта «Безопасные и качественные автомобильные дороги», решение которой не находит должного отражения в исследованиях данной области. Обусловлено это тем, что прочность и долговечность асфальтобетона напрямую связаны с адгезионными свойствами битума.

Свойства битумов многообразны и в свою очередь зависят от многочисленных факторов.

Например, от природы минеральных составляющих [1]-[2]. Целью авторов этих работ является анализ факторов, определяющих влияние состава и структуры композиционных материалов из твердой и жидкой фаз, на их эксплуатационные показатели и выявление новых подходов к разработке композитов с оптимальными свойствами на примере асфальтобетона.

Bashkarev, A.; Bessonova, V.; Lazarev, Y.; Lozhechko, V.

Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **108** Article No 10802. doi: 10.4123/CUBS.108.2



Потенциальные возможности битумоминеральных материалов далеко не исчерпаны, что определяет необходимость проведения в дальнейшем исследований по их совершенствованию [3].

Или от температуры приготовления и эксплуатации асфальтобетонной смеси [4]. В работах [5]-[6] утверждается, что важно не только математико-статистическое исследование качества готовой продукции, но и процесс ее производства. Инструментами изучения процесса производства служат статистические методы управления качеством продукции и процессов, в частности, контрольные карты Шухарта, позволяющие проводить мониторинг процессов и оценивать их пригодность, а также методы многомерного анализа: карты Хотеллинга и метод главных компонент. Для создания структуры асфальтобетона с оптимальными или близкими к ним свойствами с учетом экономических требований, требуются существенные изменения как в составе асфальтобетонных смесей, так и в технологии их производства [7]. Здесь на первый план, по мнению авторов [8]-[9], должны выдвигаться классические положения физико-химической механики, связанные с созданием оптимальной структуры асфальтобетона и использованием эффекта структурирования частиц в композите. В данных работах исследовались свойства самих битумов и не в полной мере затрагивались вопросы разрушения асфальтобетона.

В 2000–2023 годы предпринимаются попытки улучшить свойства дорожных битумов путем введения в них различных добавок [10]-[11]. Появились так называемые модифицированные битумы [12]-[13], качество которых не всегда оказывается бесспорным. Доля производства модифицированных битумов в общем объеме битумного производства выросла на 1,6%. Авторы Тюкилина П. М. и Андреев А. А. [14] для обеспечения требований к нефтяным дорожным битумам рассматривают регулирование реологических свойств дисперсных систем, уточняют [15] реологические характеристики дорожных вяжущих через эволюцию нормативных требований. Представленные исследования соотносят модификации битума с разных точек зрения для оценки эффективности введенных добавок и полимеров для улучшения технических свойств битума как в дорожном, так и в промышленном применении. Знания, полученные в этих исследованиях, показали важность химического состава базового битума для его модификации. Можно заявить, что, хотя некоторые полимеры/добавки могут улучшить один или несколько аспектов свойств чистого битума, они могут привести к проблемам совместимости при хранении и производстве. В этом отношении несколько исследований показали эффективность восков для улучшения совместимости полимеров с битумом в дополнение к некоторым преимуществам при производстве асфальтобетона с теплой смесью. Суммируя выводы исследователей [16]-[17], можно представить преимущества и эффект от их применения: минимизация рисков расслоения вяжущего в процессе хранения и транспортировки; баланс микроструктуры полимера обеспечивает оптимальные технологические свойства вяжущего (снижение вязкости и повышение совместимости полимера и битума); комплекс молекулярных характеристик обеспечивает высокий уровень эксплуатационных свойств (широкий интервал работоспособности); позволяет исключить дополнительную операцию перемешивания для нормализации смеси и гарантирует стабильность свойств при транспортировке в течении 3-х дней. Но исследования модификаторов в большей степени связаны с оценкой их воздействия на битумы, без учета работы в асфальтобетонах в целом. К настоящему времени список рекомендуемых модификаторов достаточно обширен, однако четких рекомендаций по их применению нет.

Прочность приготавливаемых асфальтобетонов и соответственно качество соединения его минеральных фракций оценивается по результатам испытаний стандартных асфальтобетонных образцов. С помощью такой методики можно только косвенно оценить качество адгезии битума, так как результаты испытаний зависят и от других факторов: степени уплотнения, количественных пропорций многочисленных фракций, количества самого битума в асфальтобетонной смеси и т.д. Самой большой проблемой было то, что оценивалась начальная прочность адгезии битума, но не было критериев её долговечности.

Объектом исследования в данной работе является прочность сцепления битума и гранита в асфальтобетоне. Предлагается решение этой задачи применительно к соединению битума с гранитом. Гранит был выбран как объект исследования, поскольку гранитный щебень является одним из наиболее часто применяемых материалов при создании дорожных покрытий.

Цель исследования состоит в повышении долговечности асфальтобетона на основе прогнозирования адгезионных соединений.



Решаемые для достижения цели задачи: обоснование экспериментальной методики определения энергии активации разрушения адгезионных соединений битума; определение оптимальных температурно-временной режимов приготовления асфальтобетонной смеси; экспериментальные исследования, с помощью инфракрасной спектроскопии, адгезионной прочности битума.

2 Методы исследования / Methods

Для прогнозирования долговечности адгезионных соединений был использован метод термофлуктуационной теории прочности, основы которой были разработаны школой академика Журкова С.Н. [18]. Разрушение рассматривается не как критическое явление, наступающее при достижении предельного напряжения или деформации, а как кинетический процесс накопления повреждений, развивающийся в теле с момента приложения нагрузки. Механические напряжения только снижают активационный барьер, облегчая разрыв когезионных связей в полимере. Непосредственное разрушение полимера объясняется образованием трещин в местах концентрации напряжений, а зарождение и развитие трещин рассматривается как следствие кинетического процесса термофлуктуационного разрыва связей.

Методическая основа данного исследования базируется на канонической формуле этой теории, которая, по мнению ее авторов, применима для любых материалов и записывается в виде:

$$\tau = \tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma}{R \cdot T} \quad (1)$$

где τ это долговечность материала, τ_0 это постоянный коэффициент равный $10^{-11} \div 10^{-13}$, T это абсолютная температура, σ это действующие напряжения, u это энергия активации процесса разрушения материала, γ это коэффициент, учитывающий чувствительность материала к действию механических напряжений, R это газовая постоянная.

Формула (1) применима при условии постоянных напряжений и температуры. При их переменных значениях для расчета долговечности может быть использован Критерий Бейли [18]:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 \quad (2)$$

3 Результаты и Обсуждение / Results and Discussion

Известно [4], что разрушение асфальтобетона происходит по границам соединения его минеральных фракций, т.е. по адгезионному соединению. При этом характер разрушения может быть когезионным, но прочность битума на границе с поверхностью минеральных фракций и в свободном состоянии существенно различается.

Разрушение адгезионного соединения происходит в два этапа. На первом происходит постепенное разрушение адгезионных связей в результате их термической и механической деструкции, что ведет к постепенному снижению прочности адгезионного соединения. Когда прочность уменьшится до величины действующих напряжений, наступает второй мгновенный этап разрушения. Время наступления этого момента можно считать долговечностью адгезионного соединения и долговечностью композита в целом. Была обоснована и предложена для практических расчетов адгезионных соединений на долговечность следующая формула:

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 - \frac{\sigma}{[\sigma_0]} \quad (3)$$

где σ это максимальные напряжения от рабочих нагрузок, $[\sigma_0]$ это начальная адгезионная прочность соединения, т. е. композита.

Выполнять с помощью представленной формулы практические расчеты долговечности композитов не представляется возможным. Это обусловлено тем, что в дорожных покрытиях они эксплуатируются при переменных нагрузках и температурах, закон изменения которых носит случайный характер. Однако возможно выявить критерии выбора, по которым следует определять адгезионные добавки для конкретных условий эксплуатации: $[\sigma_0], u, \gamma$.

Для определения параметров долговечности с применением битума БНД 60/90 были проведены следующие исследования.

Прямоугольные гранитные образцы размером 30x20x40 мм предварительно нагревались до температуры 140°C, склеивались битумом и выдерживались в термостате при той же температуре определенное экспериментом различное время. После охлаждения до нормальной температуры 20-22 °С они испытывались на сдвиг по схеме, изображенной на рис.1.

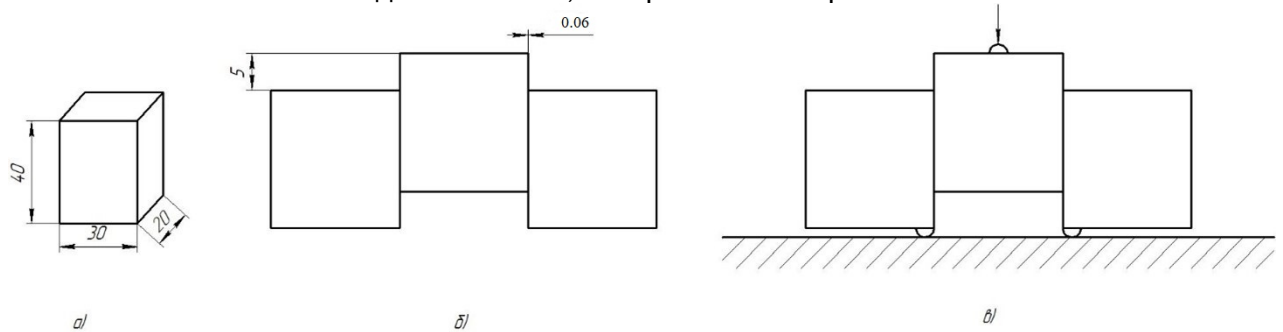


Рис. 1 - Образцы для испытания адгезии битума: а - размеры гранитного образца; б - склеенные образцы; 0.06 мм - толщина битумного слоя; в - схема испытания образцов.

Fig. 1 - Samples for testing the adhesion of bitumen: a - dimensions of the granite sample; b - glued samples; 0.06 mm - thickness of the bitumen layer; c - sample testing scheme.

Скорость приложения нагрузки в процессе исследования для всех образцов была постоянной.

На рис. 2 представлены результаты испытания образцов в виде зависимости представленной на графике прочности адгезионного соединения от продолжительности термостатирования. Зависимость носит явно выраженный экстремальный характер.

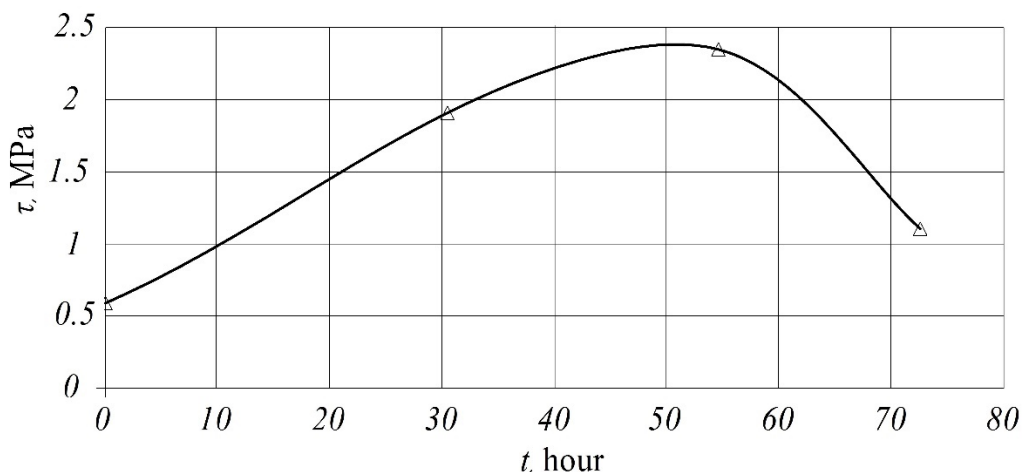


Рис. 2 - Изменение прочности адгезионного соединения битума и гранита в результате термостатирования при температуре 140 °С

Fig. 2 - Change in the strength of the adhesive compound of bitumen and granite because of thermostating at a temperature of 140 °C

Первоначальное увеличение адгезионной прочности можно объяснить тем, что в процессе термической деструкции молекул битума появляются дополнительные активные радикалы, создающие адгезионные связи. Одновременно с этим идет процесс термической деструкции не

Bashkarev, A.; Bessonova, V.; Lazarev, Y.; Lozhechko, V.

Interfacial layers in mineral-bitumen composite and durability of asphalt concrete;

2023; Construction of Unique Buildings and Structures; **108** Article No 10802. doi: 10.4123/CUBS.108.2



$$dN_3 = dN_1 - dN_2 = \left(1 - \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T}}\right) \cdot dN_1. \quad (6)$$

Общее число связей, сохранившихся с начала процесса термодеструкции определяется выражением:

$$N_3 = \int_0^{t_*} \frac{1 - \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T}}}{\tau_0 \exp \frac{u_{\sigma}}{R \cdot T}} d\varphi. \quad (7)$$

Это выражение будет справедливо и при переменной температуре, т.е. когда $T=T(t)$. Но при $T=const$, оно принимает более простой вид

$$N_3 = z \cdot \frac{t_*}{\tau_0 \exp \frac{u_{\sigma}}{R \cdot T}} \cdot \left(1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T}}\right). \quad (8)$$

Если первую производную от $N_3=N_3(t^*)$ приравнять к нулю, то получится выражение для определения момента, когда прочность соединения будет максимальной, т.к. в это время оно будет обладать максимальным числом адгезионных связей.

$$t_*^0 = \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T}. \quad (9)$$

Таким образом, если получить экспериментально график зависимости адгезионной прочности от времени термостатирования при заданной технологической температуре, то по его экстремуму можно найти величину u_a .

Согласно полученным результатам, оптимальное время термостатирования при температуре 140°C было около 50 часов, т.е. 18×10^4 с. Следовательно, энергия активации разрушения адгезионного соединения битума с гранитом, рассчитанная с помощью формулы (9) составляет 132 кДж/моль.

Следует отметить, что в процессе испытания образцов почти всегда имел место когезионный характер разрушения соединения, т.е. по битуму. Необходимо экспериментально определить является ли повышение прочности соединения результатом изменения в адгезионном соединении или только изменением физико-механических свойств самого битума.

Для этого были изготовлены из битума образцы в виде шайб толщиной 3 мм, которые подвергались той же термостатирующей обработке, как и описанные выше клеенные битумом гранитные образцы. После охлаждения шайбы испытывались на срез в устройстве по схеме, изображенной на рис. 4

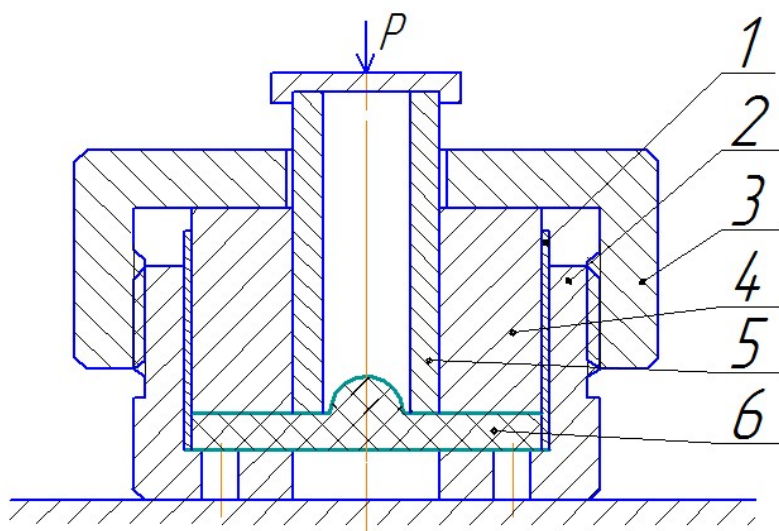


Рис. 4 - Испытание образцов из битума на срез: 1 – кольцо, 2 – оправка, 3 – поджимная гайка, 4 – поджимной цилиндр, 5 – пуансон, 6 – битум

Fig. 4 - Testing of bitumen samples on a slice: 1 – ring, 2 – mandrel, 3 – preload nut, 4 – preload cylinder, 5 – punch, 6 – bitumen

Полученные результаты испытания прочности образцов из битума представлены на рис.5 вместе с результатами испытания прочности его адгезионного соединения с гранитом.

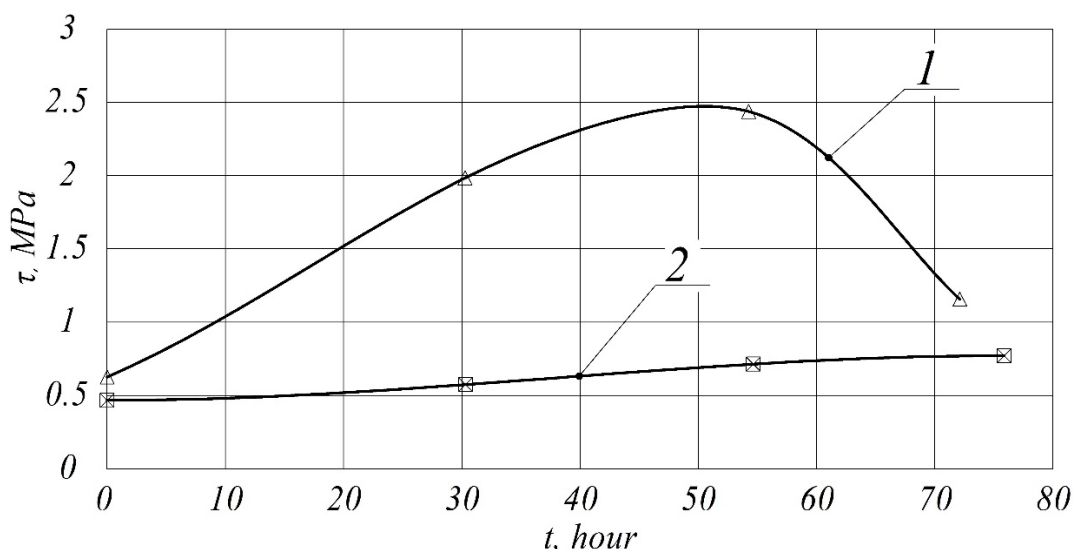


Рис.5 - Зависимость прочности от времени термостатирования: 1 - адгезионного соединения, 2 - битума.

Fig. 5 - Dependence of strength on the temperature control time: 1 - adhesive compound, 2 - bitumen

Прочность самого битума в результате термостатирования возрастает. При этом изменения на порядок меньше, чем изменения прочности его адгезионного соединения. Характер изменения прочности битума также другой, а именно монотонно возрастающий.

Необходимо оценить насколько прочностью термостатированных адгезионных соединений стабильна при изменении температуры. Для того, чтоб провести эту оценку, проведены сравнительные испытания в диапазоне температур от +5 до +40°C. Результаты этих испытаний приведены на рис. 6. Сравнение результатов говорит о том, что адгезионная прочность битума после термостатирования при повышенных для дорожных покрытий температурах на порядок выше, чем не у термостатированных.

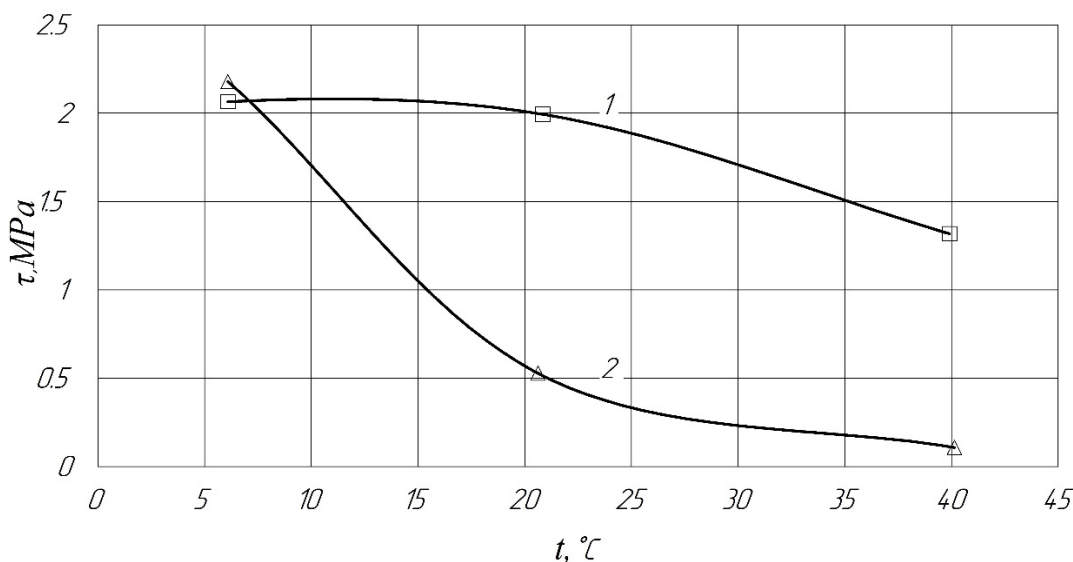


Рис. 6 - Зависимость прочности адгезионного соединения от температуры испытания: 1 - термостатированные образцы, 2 – не термостатированные образцы.

Fig. 6 - The dependence of the adhesive joint strength on the test temperature: 1 - thermostated samples, 2 – non-thermostated samples

При определении прочности соединения одновременно записывалось нарастание его деформации, после чего рассчитывался ее условный модуль. Анализ результатов показывает, что после термостатирования изменяется не только прочность соединения битум-гранит, но и его деформационные свойства (хотя и в меньшей степени, рис. 7).

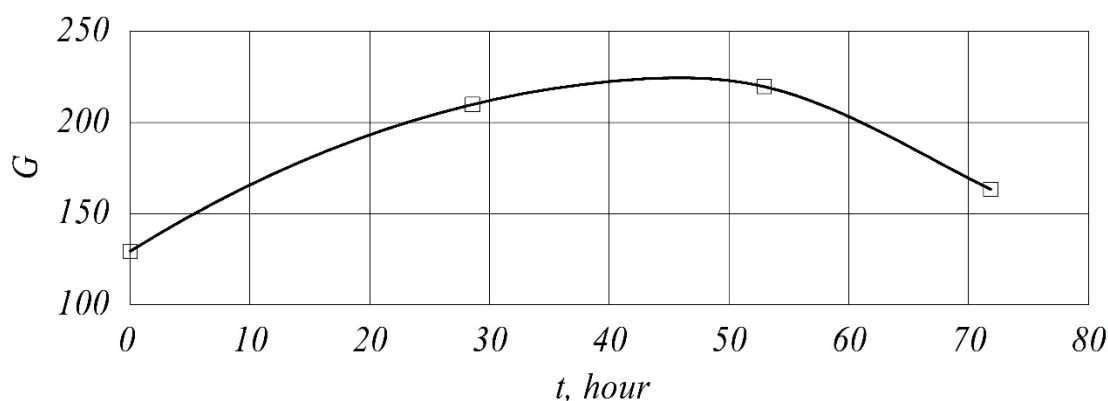


Рис. 7 - Изменение деформационных свойств соединения в результате термостатирования

Fig. 7 - Change in the deformation properties of the joint as a result of thermostating

Испытания при нормальной температуре показали, что прочность соединения увеличилась в 4 раза, а условный модуль сдвига в 2 раза. Значительно больший эффект на образцах после термостатирования был установлен при испытании при повышенных температурах. Так, например, при 40 °C деформационные свойства стали на порядок лучше (рис. 8).

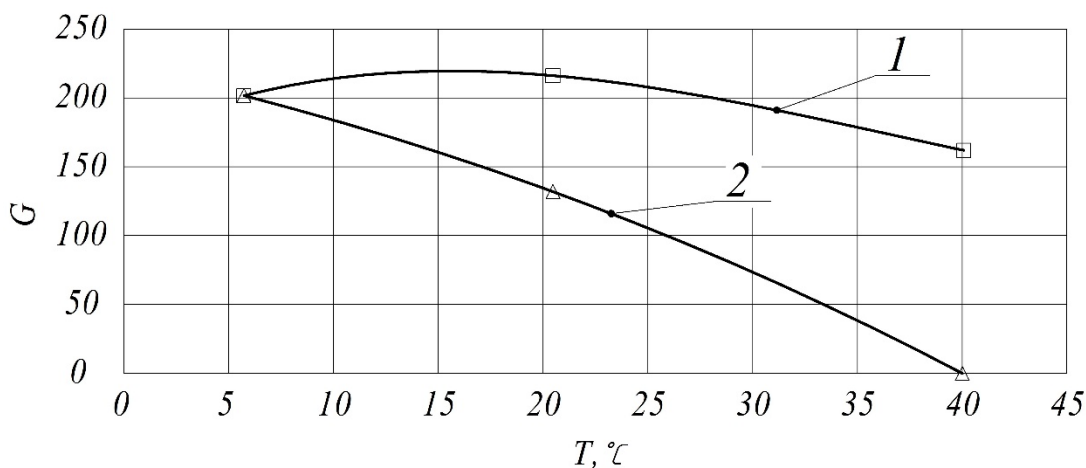


Рис. 8 - Зависимость условного модуля деформации адгезионного соединения от температуры испытания: 1 - термостатированные образцы, 2 – не термостатированные образцы.

Fig. 8 - The dependence of the conditional modulus of deformation of the adhesive joint on the test temperature: 1 - thermostated samples, 2 – non-thermostated samples.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что выбором правильного температурно-временного технологического режима можно существенно повысить начальную адгезионную прочность сформированного асфальтобетона. Согласно расчетам, это обеспечит и увеличение его долговечности.

Поскольку прочностные свойства самого битума в процессе нагрева, как показал эксперимент, изменяются не столь значительно, по сравнению с его адгезионными свойствами, встает вопрос о рациональном его количестве в составе асфальтобетонной смеси. Очевидно, что при превышении его объема разрушение будет идти непосредственно по самому битуму и положительный фактор повышения долговечности его адгезии никакого влияние на долговечность асфальтового бетона не окажет [19]-[20].

Для изучения фактора оптимального количества битума была проведена еще одна серия опытов по изучению влияния прочности соединения гранит-битум от количества битума между соединяемыми поверхностями. Для этого те же образцы и при тех же температурных и временных режимах склеивались с помощью битума (рис.1). Но при этом с помощью прокладок из калиброванной проволоки между образцами регулировалась толщина битумного слоя. Устанавливалась зависимость прочности склейки от его толщины. Полученные результаты представлены на рис.9.

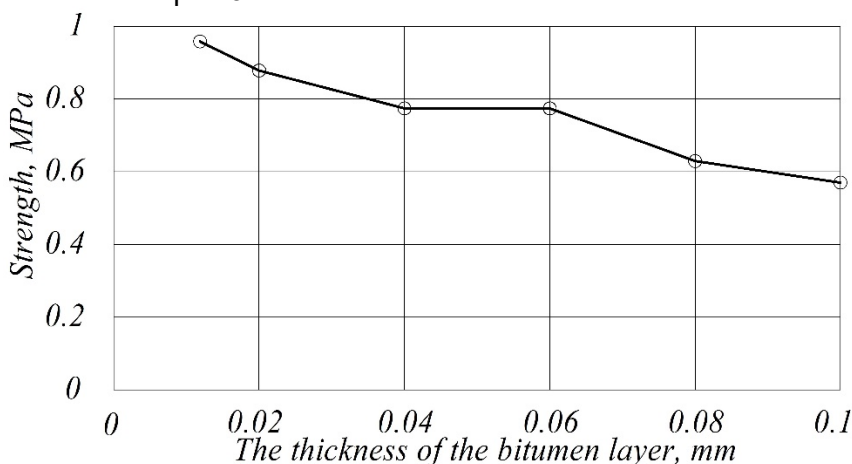


Рис. 9 - Зависимость прочности соединения гранитных образцов от толщины битумного слоя

Fig. 9 - Dependence of the joint strength of granite samples on the thickness of the bitumen layer

Для выяснения причины повышения адгезионной прочности соединения битума и гранита при уменьшении в нем толщины слоя битума был выполнен следующий эксперимент.

На отшлифованную поверхность гранитного образца при температуре 140 °C наносился слой разогретого битума. На него укладывались узкие полоски алюминиевой фольги толщиной

8мм. К битуму через фторопластовую пленку поджимался отполированный стальной брусок. После охлаждения битума он убирался вместе с фторопластовой пленкой, которая предотвращала его прилипание к битуму.

С помощью инфракрасного спектрометра ИК Фурье IRPrestige-21, (фирмы "Shimadzu Corporation", Япония) замерялась частота колебаний атомов в молекулах битума. При этом принималось во внимание, что самую большую молекулярную массу в битуме имеют асфальтены, поэтому именно они определяют его основные физико-механические свойства.

Известно, что число валентных колебаний ароматического кольца в асфальтенах равно 1600 1/см. Это было подтверждено и экспериментом.

При изменении толщины слоя битума на других образцах за счет дополнительных слоев фольги число валентных колебаний заметно уменьшалось. Это говорит о том, что чем ближе битум находится к гранитной подложке, тем частота валентных колебаний выше, т.е. материал здесь сжат и его прочность выше (рис.10).

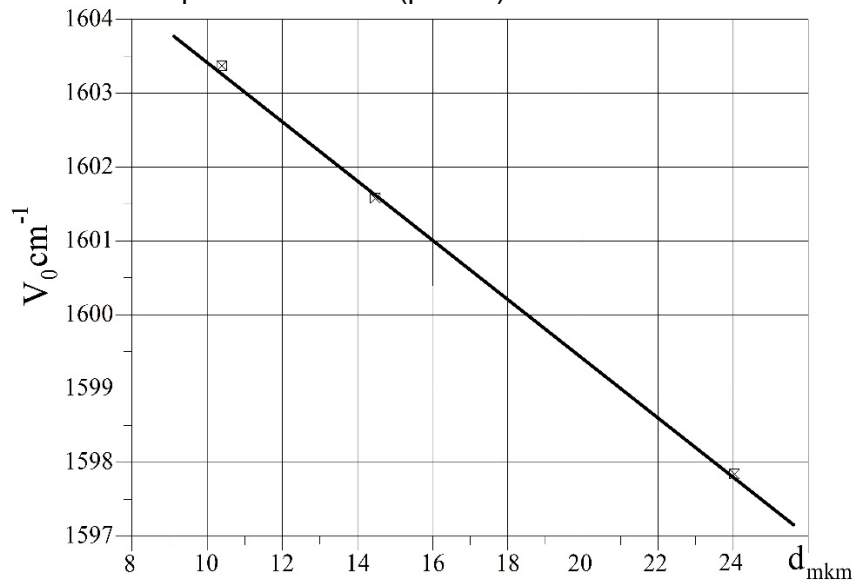


Рис. 10 - Зависимость волнового числа (частоты колебания атомов) для асфальтенов от толщины битумного слоя, $d_{\text{мм}}$.

Fig. 10 - The dependence of the wave number (frequency of vibration of atoms) for asphaltenes on the thickness of the bitumen layer, d_{mm} .

Это вызвано проникновением в асфальтены из гранита ионов железа [21]-[22].

Таким образом, чем толще слой битума, разделяющий в асфальтобетоне его минеральные фракции, тем в большей степени имеет место когезионный характер его разрушения и, следовательно, ниже его прочность.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что энергия адгезионных связей выше, чем энергия молекулярных структур. Это означает, что когезия битума в асфальтобетоне меньше, чем адгезия между его фракциями.

В процессе исследования было также установлено, что прочность адгезии в соединении битум-минеральный материал зависит от температурно-временного режима приготовления асфальтобетонной смеси. Поэтому в технологию приготовления асфальтобетонной смеси целесообразно включить процесс ее термостатирования, режим которого должен согласовываться с температурным режимом её последующего транспортирования к месту укладки в качестве дорожного покрытия.

Температурно-временной режим в наибольшей степени влияет на адгезионную прочность асфальтобетона и значительно в меньшей степени на когезионную прочность битума. В исследованном диапазоне температуры и времени адгезионная прочность имеет свой экстремум, которая затем заметно снижается, а когезионная прочность монотонно возрастает.

Существующие стандартные методики испытания физико-механических свойств асфальтобетона в основном определяют его прочность, а не потенциал долговечности. Стандартизированных критериев для неё практически не разработано.



4 Выводы / Conclusions

Более ранние работы не в полной мере затрагивали вопросы разрушения асфальтобетона в качестве объекта исследования. Подтверждено, что оно происходит по границам соединения его минеральных фракций, т.е. по адгезионному соединению. Применяемый в работе метод исследования показывает, что характер разрушения может быть когезионным, но прочность битума на границе с поверхностью минеральных фракций и в свободном состоянии существенно различается. В работе процесс исследования основывается на гипотезе о том, что долговечность адгезионных соединений достаточно достоверно может прогнозироваться с помощью термофлуктуационной теории прочности.

В результате проведённых нами исследований:

1- Обоснована экспериментальная методика определения энергии активации разрушения адгезионных соединений битума. Например, энергия активации разрушения адгезионного соединения битума с гранитом, составила 132 кДж/моль.

2- Доказано, что для приготовления каждой асфальтобетонной смеси существует свой оптимальный температурно-временной режим, параметры которого зависят от энергии активации разрушения адгезионных связей между битумом и минеральными составляющими асфальтобетона. При этом в процессе испытания образцов почти всегда имел место когезионный характер разрушения соединения, т.е. по битуму.

3- Раскрыта, с помощью инфракрасной спектроскопии, причина увеличения адгезионной прочности битума при уменьшении толщины его пленки на минеральных частицах, что объясняется сжатием межмолекулярных связей в его молекулах.

4- Модификацию битумов можно вести с помощью инфракрасной спектроскопии, ориентируясь на состояние его межмолекулярных и межмолекулярных связей.

Литература / References

1. Gotovtsev V.M., Shatunov A.G., Rumyantsev A.N., Sukhov V.D. (2012) Principles of forming the optimal structure of asphalt concrete. *Fundamental research*, **11-1**, 124–128. https://elibrary.ru/download/elibrary_18318364_81361367.pdf
2. Shemshura E.A. (2012) On the issue of the use of building materials in the road transport complex. *Engineering Bulletin of the Don*. **4-1 (22)**, 92 p. https://elibrary.ru/download/elibrary_18640143_30822884.pdf
3. Guvalov A.A., Mamedov A.D., Kakhramanov N.T. (2021) Effect of modifiers on the properties of bitumen and asphalt concrete. – *ChemChemTech*, **10**, 98–104. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46663867&ysclid=lgp03rf02619067675>
4. Canestrari, F., Cardone, F., Graziani, A., Santagata, F., Bahia, H. U. (2010) Adhesive and Cohesive Properties of Asphalt-Aggregate Systems Subjected to Moisture Damage. In *Road Materials and Pavement Design*, **11**, 11–32. <http://doi.org/10.1080/14680629.2010.9690325>
5. Umarova H.H., Smerdova S.G., Petukhova L.V., Tokareva Yu.V. (2012) Quality management of asphalt concrete mixtures production process by statistical methods. *Bulletin of Kazan Technological University*, **13**, 220–223. https://elibrary.ru/download/elibrary_17913772_60358254.pdf
6. Suvorov D.N., Nguyen S.V. (2022) The problem of controlling the temperature of asphalt concrete mixture during its transportation in Vietnam. *Herald of MADI*, **3**, 61–67. https://elibrary.ru/download/elibrary_27467397_46704995.pdf
7. Simchuk E. N., Zhdanov K.A., Didkovsky L.A. (2021) Improving approaches and methods for assessing the physical and operational properties of asphalt concrete in Russia. *Roads and bridges*, **1 (45)**, 181–221. <https://elibrary.ru/item.asp?id=46648325&ysclid=lgklfyntik868352302>
8. Ushakov V.V., Goryachev M.G., Kudryavtsev A.N. (2022) Accounting of natural and climatic conditions of operation of automobile road clothes. *Bulletin of MADI*, **3**, 68–73 <https://elibrary.ru/item.asp?id=49498409&ysclid=lgklhv1e4u853213904>
9. Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. (2019) Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. *Appl. Sci*, **9**, 1–35. <https://doi.org/10.3390/app9040742>



10. Kotlyarsky E.V. (2011) Scientific and methodological foundations for assessing the structural and mechanical properties of composite materials based on organic binders. *Building materials*, **10**, 36 – 41. <https://elibrary.ru/item.asp?id=17292721&ysclid=lgklyaveli538040728>
11. Koshkin A.V. (2021) Investigation of the effect of complex additives on the physico-mechanical properties of bitumen. *Scientific progress – creativity of young*, **3**, 107–108. <https://science.volgatech.net/upload/documents/conference/%D0%A7%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C%203.pdf?ysclid=lgm1urehkf718156679>
12. Rudensky A.V. (2016) Bitumen quality is one of the most important factors in the efficiency of road construction and operation. *Road builders*, **1**, 32–34. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_36979719_62256142.pdf
13. Polacco G., Filippi S., Merusi F., Stastna G. (2015) A review of the fundamentals of polymer-modified asphalt: Asphalt polymer interactions and compatibility. *Advances in Colloid and Interface Science*, **224**, 72–112. <http://doi.org/10.1016/j.cis.2015.07.010>
14. Tyukilina P. M., Andreev A. A. (2019) Regulation of rheological properties of dispersed systems to ensure modern requirements for petroleum road bitumen. *Chemistry and technology of fuels and oils*, **2**, 20 – 26. <https://elibrary.ru/item.asp?id=39797232&ysclid=lgko2l327g424354644>
15. Tyukilina P. M., Gureev A.A. (2021) On the evolution of regulatory requirements for rheological characteristics of road binders in Russia. *Chemistry and technology of fuels and oils*, **1**, 46–48. <https://doi.org/10.32935/0023-1169-2021-623-1-46-48>
16. Vysotskaya M. A., Kuznetsov D. A., Litovchenko D. P., Barkovsky D. V., Shiryaev A. O. (2019) Plasticizer in the production of polymer-bitumen binders – as a necessity. *Bulletin of V. G. Shukhov BSTU*, **5**, 16–22. https://doi.org/10.34031/article_5cd6df466bb9e0.32764094
17. Alatas T., Yilmaz M. (2013) Effects of different polymer on mechanical properties of bituminous binders and hot mixtures / *Construction and Building Materials*, **42**, 161–167. <http://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.027>
18. Zhurkov S.N. *Solid State Physics* URL: <https://journals.ioffe.ru/journals/1> (date of application: 23.11.2022).
19. Yusupov A.I., Abdullin A.I., Emelianycheva E.A. (2012) Road bitumen composite material with improved characteristics. *Bulletin of Kazan Technological University*, **12**, 205–207. https://www.elibrary.ru/download/elibrary_17846291_39290597.pdf
20. Tyukilina P. M., Zinovieva L. V., Egorov A. G. (2017) Influence of refining of petroleum raw materials on cohesive and deformative properties of road bitumen. *Oil refining and petrochemistry*, **5**, 13–18. <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=29333788>
21. Ivankov C.A., Bashkarev A.Ya. (2011) About durability and strength of composites. *Scientific and Technical Bulletin of SPbGPU*, **4**, 169–199. <https://elibrary.ru/item.asp?id=15561868&ysclid=lgkorn6i2u650546799>
22. Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I., Suslov M.A. (2016) Durability of polymer composites, *SPBGPU*, 148 p. <https://doi.org/10.18720/SPBPU/2/i16-316>