

А.И. Рудской¹, А.Я. Башкарев¹, В.Ю. Бессонова¹

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННОЙ ТЕОРИИ ПРОЧНОСТИ ДЛЯ РАСЧЕТА ДОЛГОВЕЧНОСТИ АДГЕЗИОННЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ГРАНИТНО-БИТУМНЫХ КОМПОЗИТОВ



¹Андрей Иванович Рудской,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: (812)552-6757, E-mail: rector@spbstu.ru



¹Альберт Яковлевич Башкарев,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(921)950-3715, E-mail: bashkarev@spbstu.ru .



¹Виктория Юрьевна Бессонова,
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра
Великого
Россия, Санкт-Петербург
Тел.: 8(931)292-4945, E-mail: bessonova.viktoria@yandex.ru.

Аннотация

В работе рассматривается адгезионный и когезионный механизм разрушения полимерных композитов, включая методику определения параметров прочности и долговечности, а также их зависимость от температурно-временных факторов. Представлены результаты экспериментов, выполненных с соединениями гранита и битума, в том числе модифицированного железным суриком (Fe_2O_3).

Ключевые слова: прочность, долговечность, адгезия, битум, наполнители.

Введение

Полимеры как конструкционные материалы обозначились лишь в середине прошлого века, поэтому опыт их практического применения на многие сотни лет меньше, чем металлов, пока остается скромным, что сдерживает их практическое применение. Тем не менее, специфические особенности полимеров, как конструкционных материалов, привлекают все большее внимание. В первую очередь это: малый удельный вес (легкость), хорошие технологические качества, низкая стоимость получения, хорошие антифрикционные свойства, декоративные качества и многое другое.

Естественно, по сравнению с металлами имеется и ряд недостатков: нестабильность физико-механических свойств и пока еще недостаточная их изученность, как конструкционных материалов; относительно низкая прочность и ее зависимость от многих факторов, например, от температуры; недостаток методик расчета на прочность и долговечность и т.д.

В последние десятилетия применение полимерных материалов показало, что их эффективное практическое применение возможно лишь в составе композиционных материалов, состоящих из различных по своей природе других материалов: мелкодисперсных металлических порошков, коротких стекловолокон, минеральных фракций, отходов различных производств и т.д. Во всех приведенных примерах возможно применение только таких полимеров, которые могут создавать достаточно прочное адгезионное соединение с другими составляющими композиционных материалов [1-5].

Как известно, полимерные материалы подразделяют на две группы: термопласты и реактопласты.

Основное технологическое преимущество термопластов состоит в том, что они могут повторно расплавляться, поэтому из них можно формировать новое изделие. Это их главное преимущество, а недостаток – зависимость физико-механических свойств от температуры. Физико-механические свойства термопластов в меньшей степени зависят от температуры, включая их прочность и их деформационные свойства: модуль упругости, тепловое расширение и т.д. [6-8].

Процессы приготовления композитов с использованием термопластов, особенно при создании малогабаритных и простых по конфигурации изделий, отличаются простотой и их качеством. Поэтому они нашли широкое распространение, в том числе при ремонте и восстановлении деталей машин.

Методы

На существующем этапе применения полимерных композиционных материалов возникла проблема расчета изделий из них на прочность и долговечность. До сих пор механизм их разрушения рассматривается с позиции классических теорий прочности, разработанных применительно к металлическим конструкционным материалам.

Опыт показывает, что применительно к полимерным композиционным материалам технологии изготовления и работы материалы применительно к условиям эксплуатации должны рассматриваться и математически описываться как единый процесс [6, 9].

Сейчас такую задачу можно сформулировать и подойти к ее решению с использованием термофлуктуационной теории прочности, разработанной отечественной фундаментальной наукой в физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе, научная школа академика С.Н. Журкова. Согласно ее концепции, разрушение материала начинается с термодеструкции межатомных и межмолекулярных связей, когда количество тепловой энергии превысит энергию этих связей. Механические (растягивающие) напряжения лишь снижают уровень необходимой для этого тепловой энергии, а вот сжимающие напряжения этот уровень повышают [10, 11].

Каноническая формула С.Н. Журкова имеет вид:

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

где τ – долговечность материала, u – энергия активации межатомных связей, γ – коэффициент чувствительности к механическим напряжениям, σ – механические напряжения, R – газовая постоянная, T – температура. В представленной формуле σ и T имеют постоянное значение. Если они зависят от времени t , то формула С.Н. Журкова принимает вид критерия Бейли:

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

Многолетние исследования в области кинетики процессов разрушения, выполненные профессором Петровым В.А., привели к выводу, что процесс разрушения материалов и адгезионных соединений включает два этапа. Первый – накопление субмикроразрушений и разрушений адгезионных связей, что приводит к снижению прочности

материала или соединения в целом. В соответствии с этим в работе [9] было предложено формулу (2) представить в виде:

$$\tau_0 \cdot \int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \cdot \sigma(t)}{R \cdot T(t)}} = 1 - \frac{\sigma_{\max}}{[\sigma]_0} \quad (3)$$

Здесь $[\sigma]_0$ - начальная мгновенная прочность материала или адгезионного соединения.

Структура композиционного материала может быть представлена следующими схемами:

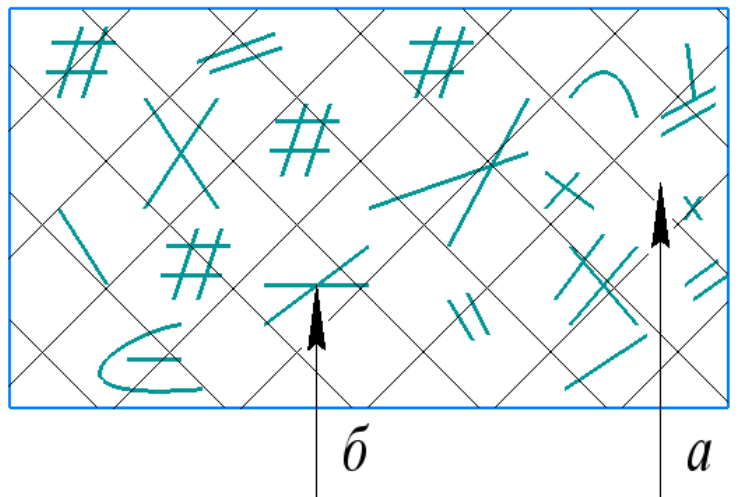


Рис. 1. Структура композиционного материала: *а*) полимер; *б*) волокнистый наполнитель

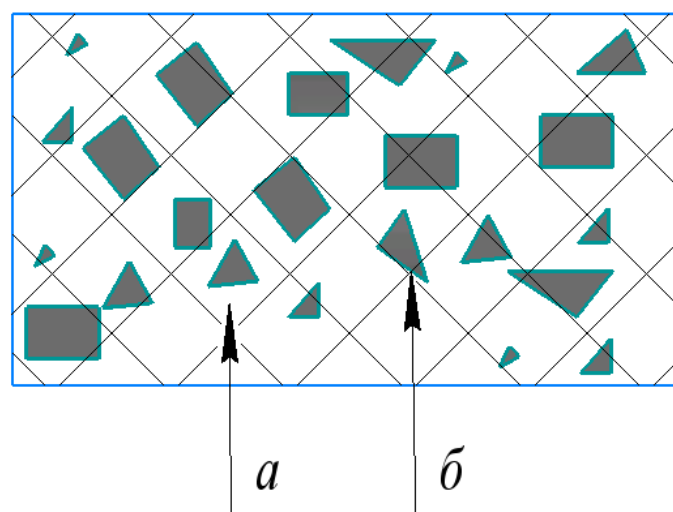


Рис. 2. Структура композиционного материала: *а*) полимер (более 10-15 %); *б*) дисперсный наполнитель

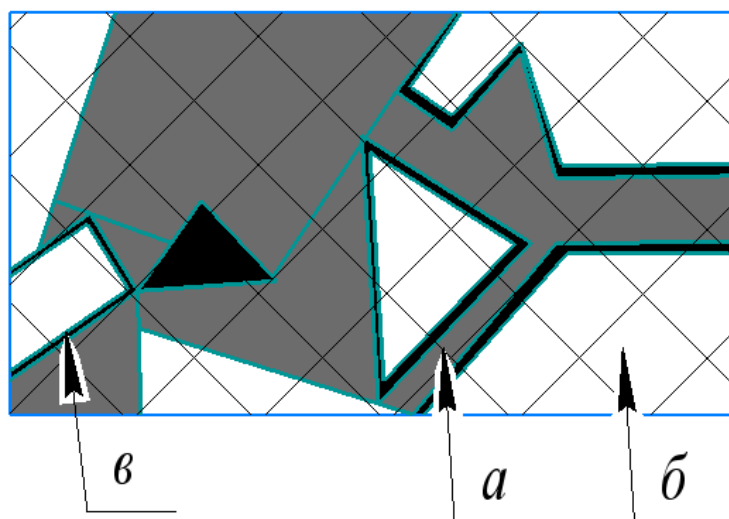


Рис. 3. Структура композиционного материала: *а*) полимер (содержание менее 10 %); *б*) дисперсный наполнитель с мелкодисперсными и крупнодисперсными фракциями; *в*) граничный слой полимера с частицами наполнителя

Композиционный материал, представленный на рис. 1 содержит наполнитель, состоящий из прочных волокон, которые воспринимают всю передаваемую нагрузку на материал. Основная роль полимера – равномерно распределитель нагрузку на все волокна наполнителя.

На рис. 2 представлен материал, в котором нагрузка распределяется на полимер и наполнитель, но полимер, как наименее прочная фракция, минимизирует его прочность. Дисперсный наполнитель создает дополнительные качества. Например, низкий коэффициент трения обеспечивает теплопроводность, стабильность геометрических размеров и т.д.

Рис. 3 – представлен композит, в котором малое количество полимера выполняет только функцию материала, который склеивает прочные фракции наполнителя, воспринимающие все механические нагрузки. Но при этом, полимер, находясь в тонкослойном состоянии под воздействием физико-химического влияния материала наполнителей, приобретает значительно более высокую прочность по сравнению с его обычным состоянием. Это первый важный фактор, обеспечивающий прочность композита.

Второй фактор, который относится только к термопластическим полимерам.

При нагреве происходит термодеструкция полимерных молекул в результате которой появляются их активные радикалы, образующие прочные химические и Ван-дер-Ваальсовы связи между собой и с материалом наполнителей. В результате существенно возрастает прочность композита в целом. Соответственно возрастает количество появляющихся активных радикалов и пропорционально этому количество

образованных ими связей. Но одновременно с этим происходит и процесс деструкции этих связей.

В работе [9] было получено математическое описание этого процесса, который при постоянной температуре описывается формулой:

$$N = k \cdot \frac{\tau}{\tau_0 \cdot \exp \frac{u_n}{R \cdot T}} \cdot \left(1 - \frac{\tau}{2 \cdot \tau_0 \cdot \exp \frac{u_a}{R \cdot T}} \right), \quad (4)$$

где N – количество адгезионных связей, которое описывается с начала термической деструкции ко времени τ , u_a, u_n – энергии активации процесса разрушения связей внутри полимера и уже образовавшихся адгезионных связей, τ_0 – предэкспотенциальный множитель, равный 10^{-11} - 10^{-13} , k – коэффициент меньше единицы, учитывающий долю активных радикалов, которые образуют адгезионные связи.

Прочность адгезионных соединений $[\sigma]_a$ пропорциональна количеству сохраняющихся адгезионных связей, поэтому ее можно записать в виде функции:

$$[\sigma]_a = f(u_n, u_a, T, \tau)$$

Момент возникновения максимальной прочности можно установить, приравняв первую производную функции к нулю. В результате получается выражение для определения энергии активации разрушения адгезионных связей:

$$u_a = R \cdot T \cdot (27,6 + \ln \tau_*) \quad (5)$$

где τ_* – экспериментально определенный момент времени, когда возникает максимальная прочность адгезионного соединения. Методика этого эксперимента подробно описана в работах [9].

Однако в композите связующий твердые фракции полимер находится не только в пленочном состоянии, но также в значительной части своего объема удален от влияния материала наполнителей. Поэтому здесь он имеет меньшую прочность, что становится слабым местом композита [12-15]. Предстояло установить правильность этого вывода. Для этого в данной работе был поставлен эксперимент по испытанию прочности адгезионного соединения битума и гранита, сформированного при разных температурах по следующей методике.

Проводится определение адгезионной прочности после одинаковой продолжительности выдержки образцов при двух разных температурах, например, $T_1=170\text{ }^\circ\text{C}$ и $T_2=150\text{ }^\circ\text{C}$ в течение времени t^* (рис.4).

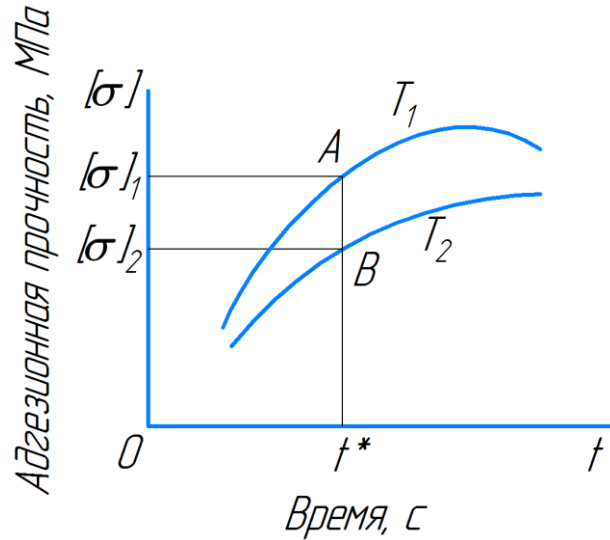


Рис. 4. Изменение адгезионной прочности

Адгезионная прочность $[\sigma]_1$ и $[\sigma]_2$:

$$[\sigma]_1 = \frac{t^*}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{R \cdot T_1}} \cdot \left(1 - \frac{t^*}{2 \cdot \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T_1}}\right) \quad (6)$$

$$[\sigma]_2 = \frac{t^*}{\tau_0 \exp \frac{u_n}{R \cdot T_2}} \cdot \left(1 - \frac{t^*}{2 \cdot \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T_2}}\right) \quad (7)$$

Отсюда получаем уравнение:

$$\frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} = \frac{\left(1 - \frac{t}{2 \cdot \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T_1}}\right) \cdot \tau_0 \exp \frac{u_n}{R \cdot T_2}}{\left(1 - \frac{t}{2 \cdot \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T_2}}\right) \cdot \tau_0 \exp \frac{u_n}{R \cdot T_1}} \quad (8)$$

После логарифмирования уравнения (8), его выражение принимает вид:

$$\ln \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2} = \ln \left(1 - \frac{t_*}{2 \cdot \tau_0 \frac{u_a}{R \cdot T_1}} \right) - \ln \left(1 - \frac{t_*}{2 \cdot \tau_0 \frac{u_a}{R \cdot T_2}} \right) + u_a \cdot \left(\frac{1}{R \cdot T_2} - \frac{1}{R \cdot T_1} \right) \quad (9)$$

Тогда:

$$u_n = \frac{\ln \left(1 - \frac{t_*}{2 \cdot \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T_1}} \right) - \ln \left(1 - \frac{t_*}{2 \cdot \tau_0 \exp \frac{u_a}{R \cdot T_2}} \right) - \ln \frac{[\sigma]_1}{[\sigma]_2}}{\frac{1}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)} \quad (10)$$

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 .

Результаты

По описанной методике была определена энергия активации разрушения битума и его адгезии в соединении с гранитом. Их значения представлены в таблице 1.

Таблица 1. Энергия активации разрушения битума и его адгезии с гранитом

Битум	Температура, Т, °С	Время, мин	Прочность, МПа	u_a , кДж/моль	u_b , кДж/моль
КИНЕФ	165	30	0,28	132,9	23,4
	145	30	0,23		
Лукойл	165	30	0,26	131,9	17,7
	145	30	0,24		
МНПЗ;	165	30	0,34	127,9	78,4
	145	30	0,22		

Результаты экспериментов и расчета показывают, что энергия для внутреннего разрушения полимерного адгезива значительно меньше, чем

для разрушения его адгезионных соединений. Но это еще не основания для вывода о прочности адгезива. В реальной конструкции в материале возникают механические напряжения, которые могут играть и положительную роль, например, в условиях гидростатического сжатия. Это относится не только к материалам, но и к их адгезионным связям.

С помощью инфракрасной спектроскопии была исследована частота колебаний атомов в молекулах полиамида, нанесенного в виде тонкослойного покрытия на стальную поверхность. Оказалось, что частота колебаний самая высокая в непосредственной близости от подложки, на которую полиамид нанесён. С удалением от нее эта разница быстро уменьшается и уже на расстоянии около 50 мкм практически не заметна. Аналогичная картина была отмечена и в слое битума, нанесенного на отшлифованную поверхность гранита. Это явление может быть объяснено двумя факторами. Первый – адгезионные связи упорядочивают расположение молекул полимера, создавая более прочную структуру с меньшей амплитудой тепловых колебаний. Второй фактор, который в большей степени относится к соединению битума и гранита, состоит в том, что в битум из гранита проникают ионы железа с тем же самым эффектом сжатия межатомных связей битума внутри его молекул [16-18].

Как будет показано ниже, это подтверждается тем, что при добавлении в битум железного сурика (Fe_2O_3) его адгезионная и когезионная прочность значительно возрастает.

Чтобы окончательно сделать вывод о прочности композита, необходимо установить коэффициент чувствительности его адгезионных соединений к механическим напряжениям. В данной работе для этого использована установка, схема которой представлена на рис. 5.

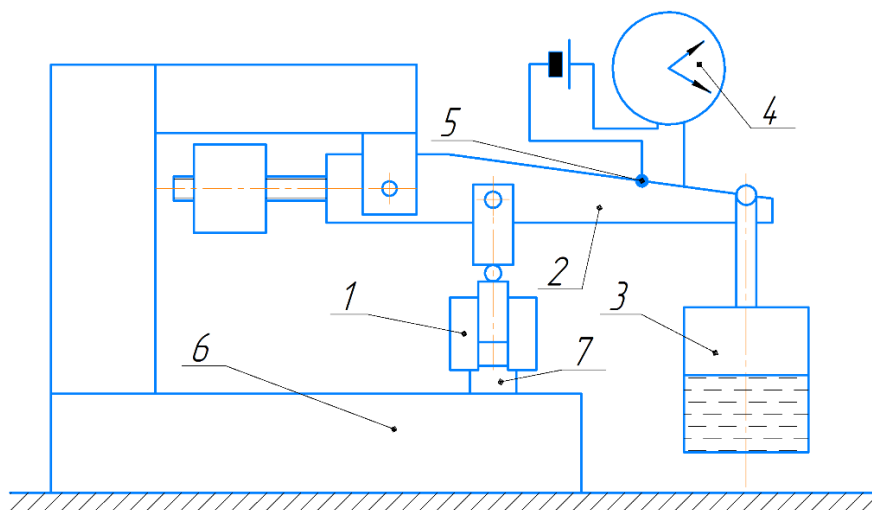


Рис. 5. Устройство для создания статической сдвигающей нагрузки: 1 – испытуемый образец; 2 – рычаг; 3 – груз (сосуд с водой); 4 – электрочасы; 5 – разъемный контакт; 6 – станина; 7 – подставка.

Методика испытания предусматривала определение продолжительности времени, через которое соединение образцов разрушится при постоянной нагрузке. Более подробно она описана в работе [9].

Использовался немодифицированный и модифицированный битум БНД 60/90. В качестве модификатора применялся мелкоисперсный порошок железного сурика (Fe_2O_3) в количестве двух и четырех процентов от массы битума.

При склеивании гранитных образцов часть их термостатировалась при $140\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 72 часов. Испытания на долговечность проводились при комнатной температуре $20\text{ }^\circ\text{C}$.

Результаты вычисления коэффициента чувствительности к механическим напряжениям по формуле 11 представлены в виде графиков на рис. 6.

$$\gamma = \frac{(29,2 - \ln \tau_*) \cdot 293 \cdot R - u_a}{\sigma} \quad (11)$$

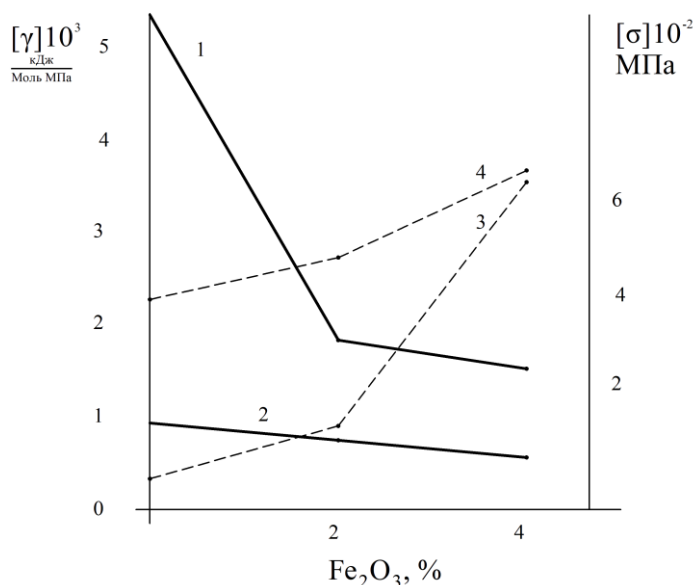


Рис. 6. Зависимость прочности и чувствительности адгезионного соединения битума к механическим напряжениям от содержания железного сурика: 1,3 без термостатирования; 2,4 с термостатированием (72 часа, $140\text{ }^\circ\text{C}$)

Заключение

В результате выполненной работы доказано, что в большинстве полимерных композитов разрушение происходит по связующей фракции, которая объединяет все другие в единый многокомпонентный материал. В асфальтобетоне это дисперсные минеральные фракции соединены нефтяным битумом.

Доказано, что процесс разрушения межатомных и межмолекулярных связей в полимерной связующем, а также его адгезионных связей может быть описан с позиций термофлуктуационной теории прочности.

Разработана методика определения величины энергии активации процесса разрушения самого связующего (битума) и его адгезионных связей, используя которые можно рассчитать когезионную и адгезионную прочность, а также долговечность композита с учетом условий его работы: температуры и продолжительности действия нагрузок.

Используя модификаторы полимера, можно существенно уменьшить его чувствительность к механическим напряжениям, в частности в битум достаточно внести 2-4 % мелкодисперсного порошка железного сурика.

Одним из главных практических результатов, может быть, повышение долговечности дорожных асфальтобетонных покрытий, благодаря уточнения назначения оптимальных режимов приготовления горячих асфальтобетонных смесей.

Дальнейшим перспективным направлением запланирована разработка компьютерного программного обеспечения для выполнения инженерных расчетов с использованием результатов выполненных экспериментов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Гуреев, А. А. Нефтяные вяжущие материалы. М.: Недра, 2018. – 155 с.
- [2] Yuan, J. LED-based measurement system for affinity between bitumen and aggregate / J. Yuan, W. J. Dong, J. J. Chen. Construction and Building Materials. - 2015. Vol. 81. pp. 298–302.
- [3] Mige Paliukaitea, Viktoras Vorobjovasa, Matas Buleviciusb, Vitalijus Andrejevasa Evaluation of different test method for bitumen adhesion properties. Transportation Research Procedia. 2016, Vol. 14, pp. 724-731.
- [4] Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials, 2018, Vol. 183, pp. 95-101.
- [5] Gawdzik Barbara, Tadeusz Matynia and Krzysztof Blazejowski. The use of De-vulcanized recycled rubber in the modification of road bitumen. Material 2020, 13(21), pp.1-21.

- [6] А.Я. Башкарев, В.И. Веттегрень, М.А. Суслов Долговечность полимерных композитов. Издательство политехнического университета, 2016, 147 с.
- [7] Bashkarev A.Y., Bukreev V.V., Kuschenko A.V., Stukach A.V. Adhesive Bonding Strength of Polyamide Coating on Steel Substrate in Friction Units of Machines. International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.), Vol. 11, N.9, September 2017, pp. 673-676.
- [8] Applications of Machine Vision-Quality Control, Cancer Detection and Traffic Surveillance. Сайт Лундского университета (Швеция). URL: http://www.maths.lu.se/fileadmin/maths/personal_staff/hanna/phd_thesis.pdf (дата обращения 05.04.2022).
- [9] Рудской А.И., Башкарев А.Я, Славутин Л.В. Долговечность полимерных композиционных материалов. Современное машиностроение: Наука и образование: материалы 10-й Международной конференции СПб: Политех-Пресс, 2021, с.677-689.
- [10] В.И. Веттегрень, С.А. Иваньков, Р.И. Мамалинов. Деформация химических связей в молекулах покрытия из полиамида на поверхности стали. Журнал технической физики. 2011, Т.81. Вып. 10, с. 107-113.
- [11] 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.
- [12] Тюрюханов К.Ю. Исследование взаимодействия битума с минеральными частицами в асфальтобетоне. Транспортные сооружения. 2018. Т. 5. № 1.19 с.
- [13] Ying Yuan, Long Chen relationship among cohesion, adhesion and bond strength. Materials and design, V.185, January, 2020.
- [14] Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. Appl. Sci, 2019, №9, pp. 1–35.
- [15] Canestrari F., Ctardone F., Gratiana A. Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage/ J.Road materials and Pavement Design, vol. 11, 2010, pp.11-32.
- [16] В.И. Веттегрень, Башкарев А.Я., Суслов М.А. Влияние формы частиц наполнителя на прочность полимерного композита. Письма в журнал технической физики. 2007.Т. 33. Вып. 20. с.37-47.
- [17] Zhang H., Ge., Ye H. Effectiveness of the heat conduction reinforcement of particle filled composites. Modelling simul. Mater.Sce.Eng.2005. Vol.13, pp. 401-412.
- [18] Zhang, J. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate-bitumen adhesion / J. Zhang, A. K. Apeageyi, G.

A.I. Rudskoy¹, A.Y. Bashkarev¹, V.Y. Bessonova¹

APPLICATION OF THE THERMOFLUCTUATION THEORY OF STRENGTH TO CALCULATE THE DURABILITY OF ADHESIVE JOINTS ON THE EXAMPLE OF GRANITE-BITUMEN COMPOSITES

¹Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Russia

Abstract

The article considers adhesive and cohesive mechanism of polymer composites destruction, including methods of determination of parameters of strength and durability, as well as their dependence on temperature-time factors. The results of experiments performed with connections of granite and bitumen, including modified iron meerka (Fe₂O₃) are presented.

Key words: strength, durability, adhesion, bitumen, fillers.

REFERENCES

- [1] Gureev, A. A. Petroleum binding materials. M.: Nedra, 2018. – 155 p.
- [2] Yuan, J. LED-based measurement system for affinity between bitumen and aggregate / J. Yuan, W. J. Dong, J. J. Chen. Construction and Building Materials. - 2015. Vol. 81. pp. 298–302.
- [3] Migle Paliukaitea, Viktoras Vorobjovasa, Matas Buleviciusb, Vitalijus Andrejevasa Evaluation of different test method for bitumen adhesion properties. Transportation Research Procedia. 2016, Vol. 14, pp. 724-731.
- [4] Yazhi Xu, Chuanfeng Zheng, Yepeng Feng, Xuldong Guo Low-temperature cohesive and adhesive strength testing of contact surface between bitumen and mineral aggregates by image analysis // Construction and buildings materials, 2018, Vol. 183, pp. 95-101.
- [5] Gawdzik Barbara, Tadeusz Matynia and Krzysztof Blazejowski. The use of De-vulcanized recycled rubber in the modification of road bitumen. Material 2020, 13(21), pp.1-21.
- [6] A.Y. Bashkarev, V.I. Vettegren, M.A. Suslov Durability of polymer composites. Polytechnic University Press, 2016, p.147.

- [7] Bashkarev A.Y., Bukreev V.V., Kuschenko A.V., Stukach A.V. Adhesive Bonding Strength of Polyamide Coating on Steel Substrate in Friction Units of Machines. *International Review of Mechanical Engineering (I.R.E.M.E.)*, Vol. 11, N.9, September 2017, pp. 673-676.
- [8] Applications of Machine Vision-Quality Control, Cancer Detection and Traffic Surveillance. Website of Lund University (Sweden). URL: http://www.maths.lu.se/fileadmin/maths/personal_staff/hanna/phd_thesis.pdf (accessed 05.04.2022).
- [9] Rudskoy A.I., Bashkarev A.Y., Slavutin L.V. Durability of polymer composite materials. *Modern Mechanical Engineering: Science and Education: Materials of the 10th International Conference St. Petersburg: Polytech-Press*, 2021, pp.677-689.
- [10] V.I. Vettegren, S.A. Ivankov, R.I. Mamalinov. Deformation of chemical bonds in polyamide coating molecules on the steel surface. *Journal of Technical Physics*. 2011, vol.81. Issue 10, pp. 107-113.
- [11] V.I. Vettegren, I.I. Novak, B.B. Kulik. Thermal and fluctuation deformations of chemical bonds in surface and boundary layers of polymers. *Solid state physics*. 2005. Vol. 47. Issue 5. pp.893-898.
- [12] Tyuryukhanov K.Yu. Investigation of the interaction of bitumen with mineral particles in asphalt concrete. *Transport facilities*. 2018. Vol. 5. No. 1. p. 19.
- [13] Ying Yuan, Long Chen relationship among cohesion, adhesion and bond strength. *Materials and design*, V.185, January,2020.
- [14] Porto M., Caputo P., Loise V., Eskandarsefat S., Teltayev B., Rossi C. Bitumen and bitumen modification: A Review on Latest Advances. *Appl. Sci*, 2019, №9, pp. 1–35.
- [15] Canestrari F., Ctardone F., Gratiana A. Adhesive and cohesive properties of asphalt-aggregate systems subjected to moisture damage/ *J.Road materials and Pavement Design*, vol. 11, 2010, pp.11-32.
- [16] V.I. Vettegren, Bashkarev A.Y., Suslov M.A. Influence of the shape of filler particles on the strength of a polymer composite. *Letters to the Journal of Technical Physics*. 2007. T. 33. Issue 20. pp.37-47.
- [17] 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.
- [18] Zhang, J. Influence of aggregate mineralogical composition on water resistance of aggregate–bitumen adhesion / J. Zhang, A. K. Apeageyi, G. D. Airey и др. // *International Journal of Adhesion and Adhesives*. - 2015. - Vol. 62. - pp. 45-54.