

УДК 625:655.3

*А.Я. Башкарёв, Н.Н. Беспалова*

## **ЗАВИСИМОСТЬ АДГЕЗИИ БИТУМА ОТ ТЕМПЕРАТУРНО-ВРЕМЕННЫХ РЕЖИМОВ ПРИГОТОВЛЕНИЯ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ**

*A.Ya. Bashkarev, N.N. Bespalova*

## **DEPENDENCE ADHESION OF BITUMEN FROM THE TIME-TEMPERATURE MODES ON MAKING ASPHALT MIXES**

В статье показана возможность повышения качества дорожных покрытий за счет управления температурно-временным режимом при приготовлении горячей асфальтовой смеси. Разработана методика исследования адгезионных свойств дорожных битумов, базирующаяся на применении термофлуктуационной теории прочности. Доказано, что, применяя технологическое термостатирование, можнократно увеличить прочность асфальтового бетона и дорожных покрытий.

БИТУМ; АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ; АДГЕЗИЯ; ТЕМПЕРАТУРА; ВРЕМЯ.

The article shows the possibility to improve the quality of road surfaces by controlling the time-temperature modes in the preparation of hot asphalt mixes. We developed a technique of research the adhesive properties of road bitumen based on the application of the thermalfluctuation theory of strength. It is proved that by using temperature control technology, you can multiples increase durability of bituminous concrete and road surfaces.

BITUMEN; BITUMINOUS MIXTURE; ADHESION; TEMPERATURE; TIME.

Развитие дорожного строительства непрерывно ставит задачу повышения прочности и долговечности асфальтобетонных покрытий. Большинство международных фирм, специализирующихся на создании высококачественных дорог, ведут научный поиск, направленный на повышение прочности дорожных одежд и их стойкости к образованию колеи. Главным направлением в этом поиске стало применение различных полимерных добавок и поверхностно активных веществ, способствующих упрочнению связей, которые создаются главным связующим — битумом [1, 2].

Асфальтовый бетон — композиционный материал, который примерно на 95 % состоит из минеральных частиц размером от нескольких микрон до десятков миллиметров, соединенных тончайшей пленкой битума [3–5]. В нашей работе была поставлена задача изучить зависи-

мость адгезионных свойств пленки битума от температуры и продолжительности приготовления асфальтобетонной смеси, которая используется для создания дорожного покрытия [6].

Предварительно была сформулирована следующая концепция образования адгезионных связей между битумом и минеральным материалом.

Битум — довольно сложное органическое вещество, включающее в себя, как известно, масла, смолы и асфальтены. Молекулярное строение этих составляющих имеет достаточно высокую степень полимеризации, поэтому в обычных условиях они практически не образуют химических связей с другими веществами. При определенной подвижности битум с твердыми материалами образует почти стопроцентную фактическую площадь контакта, заполняя все микрошероховатости их поверхностей. Возникает довольно

прочное сцепление, которое образуется за счет действия связей физической природы, т. е. ван-дер-ваальсовых сил. Их особенность заключается в том, что они возникают при относительно большом расстоянии  $r$  между молекулами веществ ( $r = 10^{-9}$  м). Однако эта энергия, т. е. прочность, на порядок, а иногда и больше, уступает энергии химических связей, которые образуются только при  $r = 10^{-10}$  м. Энергия ван-дер-ваальсового притяжения — 0,4–40 кДж/моль, химических валентных сил — 40–400 кДж/моль.

С повышением температуры полимолекулы битума подвергаются термодеструкции, т. е. разрыву, в результате которого образуются химические активные радикалы, обеспечивающие появление прочных связей. Частично эти радикалы взаимодействуют между собой, образуя в битуме трехмерные молекулярные структуры, что приводит к уменьшению его деформационной способности. Часть активных радикалов создает связь с минеральными материалами, усиливая прочность их соединения между собой.

Процесс термодеструкции протекает во времени, т. е. количество разрывов полимолекул и число активных радикалов увеличиваются. Но процесс этот не приводит к монотонному увеличению прочности соединения битума с минералом и повышению прочности битумной пленки. Дело в том, что термодеструкции подвергаются и образовавшиеся адгезионные связи, имеющие свой период существования, продолжительность которого зависит от температуры.

Термодеструкция полимерных молекул битума также приводит к снижению прочности соединения, в результате чего наступает когезионное разрушение композита.

Представляемая здесь концепция развития и последующей деструкции адгезионного соединения может быть описана математически.

Согласно термофлуктуационной теории прочности и критерию Бейли долговечность материала  $\tau$  (или любого соединения) при температуре  $T$  и переменных напряжениях  $\sigma(t)$  в нем определяется выражением [7–9]

$$\int_0^{\tau} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u - \gamma \sigma(t)}{RT}} = 1,$$

где  $\tau_0 = 10^{-11} - 10^{-13}$  с;  $u$  — энергия активации процесса разрушения;  $\gamma$  — структурно чувстви-

тельный коэффициент;  $R$  — газовая постоянная;  $t$  — время.

Поскольку количество образующихся за время  $t$  адгезионных связей пропорционально элементарным разрушениям молекул, то при отсутствии нагрузки и постоянной температуре количество адгезионных связей  $N$ , а значит, и прочность соединения увеличивались бы по линейному закону. На рис. 1 этот процесс представлен прямой 1. За элементарный отрезок времени в момент  $t = \varphi$  число связей будет равно

$$dN_1 = z \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_6}{RT}}.$$

Здесь  $u_6$  — энергия активация разрушений битума;  $z$  — коэффициент, отражающий долю из числа появившихся активных радикалов, которые образовали адгезионные связи. Естественно, что  $z$  всегда меньше единицы.

Из числа связей, образовавшихся в момент  $t = \varphi$ , к моменту  $t_*$  происходит термодеструкция некоторого их числа  $N_2$ :

$$dN_2 = dN_1 \int_{\varphi}^{t_*} \frac{dt}{\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT(t)}}.$$

здесь  $u_a$  — энергия активации процесса деструкции адгезионных связей. Тогда количество сохранившихся связей к тому же моменту  $t_*$  будет равно

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

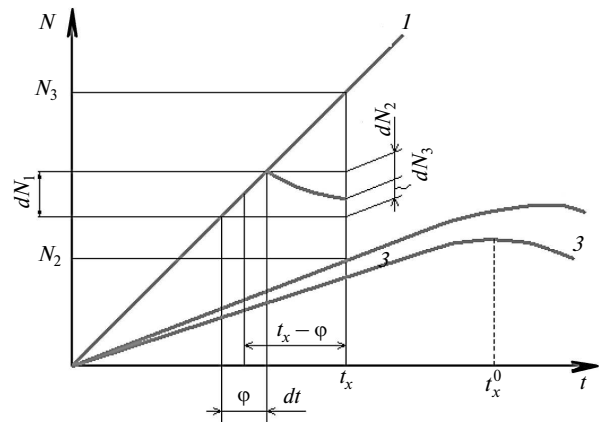


Рис. 1. Динамика изменения количества адгезионных связей

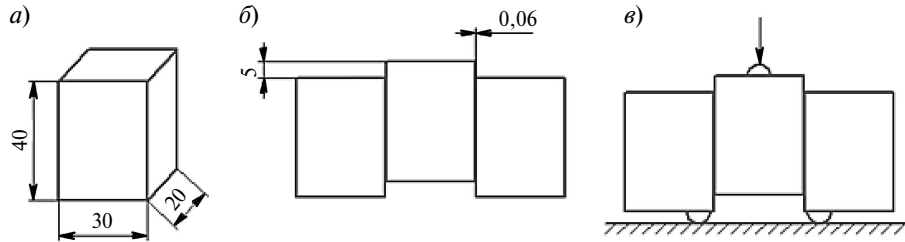


Рис. 2. Образцы для испытания адгезии битума

Общее число связей, сохранившихся с начала процесса термодеструкции, определится выражением

$$N_3 = \int_0^{t_*} \frac{\left( 1 - \int_0^{t_*} \frac{dt}{\varphi \tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right)}{\tau_0 \exp \frac{u_6}{RT}} d\psi.$$

Это выражение будет справедливо и при переменной температуре, т. е. когда  $T = T(t)$ . Но при  $T = \text{const}$  оно принимает довольно простой вид:

$$N_3 = z \frac{t_*}{\tau_0 \exp \frac{u_6}{RT}} \left( 1 - \frac{t_*}{2\tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}} \right).$$

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

$$t_*^0 = \tau_0 \exp \frac{u_a}{RT}.$$

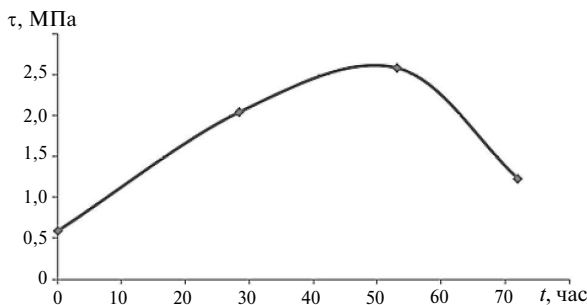


Рис. 3. Зависимость прочности от времени термостатирования при температуре 140 °С

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

В нашей работе для этой цели была проведена серия опытов, для чего была изготовлена партия образцов из гранита, изображенных на рис. 2, а. После нагревания до температуры 140 °С они склеивались с помощью дорожного битума марки БНД 60/90 по схеме, представленной на рис. 2, б. Затем они сразу помещались при этой же температуре в термостат, где выдерживались различные периоды времени. После охлаждения до нормальной температуры образцы разрушались нагружением на сдвиг (рис. 2, в).

График зависимости адгезионной прочности от времени термостатирования представлен на рис. 3.

Согласно полученным результатам оптимальное время термостатирования при температуре 140 °С было около 50 часов, т. е.  $18 \cdot 10^4$  с. Следовательно, энергия активации разрушения адгезионного соединения битума с гранитом, рассчитанная с помощью последней формулы, составляет 136 кДж/моль.

Как говорилось выше, только часть образовавшихся радикалов битума реализуется в создании адгезионных связей с другими составляющими асфальтобетонной смеси. Остальные, взаимодействуя между собой, создают в нем трехмерные структуры, что делает битумный слой менее подвижным. Несомненно, это должно отразиться на способности к деформированию всего асфальтового бетона, т. е. дорожного покрытия. Чем жестче битумный слой в композите, тем меньше его деформируемость и тем медленнее будет проходить образование дорожной колеи.

Проводя испытания адгезионной прочности, авторы данной работы исследовали зависимость деформации на сдвиг от величины касательных напряжений. Скорость деформирования соединений была постоянна для всех образцов — 0,01 мм/с. На рис. 4 представлен график изменения условного модуля деформации на сдвиг  $G_y$ ,  $\frac{H}{\text{мм}^2} \frac{1}{\text{мм}}$ , образцов с теми же режимами термостатирования, которые были приведены выше.

Анализ результатов показывает, что при термостатировании изменяется не только прочность соединения «битум — гранит», но и его деформируемость (хотя и в меньшей степени). Прочность соединения увеличилась в 4 раза, а условный модуль сдвига примерно в 2 раза.

Асфальтобетонные дорожные покрытия в летнее время работают при повышенной температуре. Именно в это время происходит интенсивный процесс образования дорожной колеи. Способность композита противостоять нагрузке именно при нагреве оказывается определяющей в оценке его качеств. Нами было проведено сравнительное испытание нетермостатированных адгезионных соединений «гранит — битум» и термостатированных при тех же 140 °С в течение 25–28 часов. Испытания проводились в диапазоне температур +5–40 °С. Результаты испытания адгезионной прочности представлены на рис. 5, где кривая 1 — изменение прочности термостатированных образцов, 2 — нетермостатированных.

Они показывают, что в случае обычного асфальтового бетона уже при температуре 40 °С (а летом на солнце дорожные покрытия разогреваются до более высокой температуры) интенсивный процесс образования колеи неизбежен. Термостатирование, почти беззатратное изменение технологии, может существенно уменьшить это отрицательное явление.

Как показали исследования, битум и минеральные составляющие асфальтового бетона взаимодействуют между собой. Это взаимодействие приводит к тому, что между ними образу-

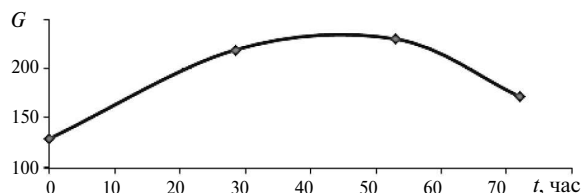


Рис. 4. График изменения условного модуля деформации на сдвиг

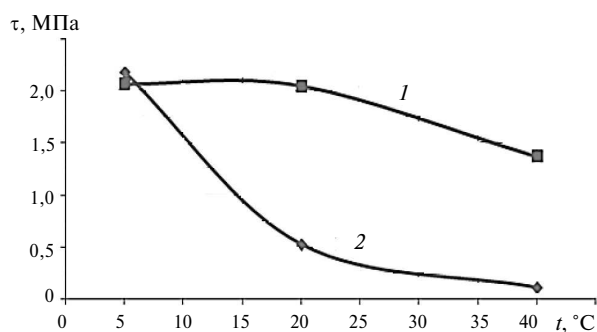


Рис. 5. Зависимость прочности адгезионного соединения от температуры испытания:

1 — термостатированные образцы;  
2 — нетермостатированные образцы

ются «граничные слои». Как известно [10, 11], толщина таких слоев достигает сотен микрон. Изменение надмолекулярной структуры битума ведет к изменению механических и теплофизических свойств соединения.

Показано, что процесс образования и деструкции адгезии битума с минеральными материалами может описываться с помощью термомодификационной теории прочности.

Разработана и обоснована методика, с помощью которой можно определить энергию активации процесса разрушения адгезионных соединений битума.

Доказано, что прочность асфальтовых бетонов может быть значительно повышена за счет предварительного термостатирования горячих асфальтобетонных смесей.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Золотарев В.А. Битумы, модифицированные полимерами и добавками. — СПб.: Славутич, 2013. С. 96–123.  
2. Соломенцев А.Б. Адгезионные добавки для дорожных битумов и асфальтобетонов и оценка их эффективности // Дороги. 2013. Т. 69. С. 80–83.

3. Грушко И.М., Королев И.В., Борщ И.М., Мищенко Г.М. Дорожно-строительные материалы: Учебник для автомобильных дорожных институтов. М.: Транспорт, 1983. 383 с.  
4. Мелик-Багдасаров М.С., Гиоев К.А., Мелик-Багдасарова Н.А. Строительство и ремонт дорожных

асфальтобетонных покрытий: Учебное пособие. Белгород, 2007. 163 с.

5. **Котлярский Э.В.** Строительно-технические свойства дорожного асфальтового бетона: Учебное пособие. М., 2004. 194 с.

6. **Дементьев Н.В.** Влияние производственных процессов на качество полимерно-битумного вяжущего // Дорожная держава. 2013. Спец. выпуск С. 67–69.

7. **Bailey Y.** Attempt to correlate some tensile strength measurement on glass // *Glass industry*. 1939. Vol. 20, №1. P. 20–35.

8. **Петров В.А., Башкарев А.Я., Веттегрень В.И.** Физические основы прогнозирования долговечности конструкционных материалов. СПб.: Политехника, 1993. 475 с.

9. **Иваньков С.А., Башкарев А.Я.** О долговечности и прочности композитов // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2011. №4. С. 169–199.

10. **Липатов Ю.С.** Коллоидная химия полимеров. Киев: Наукова Думка, 1984. 344 с.

11. **Привалко В.П., Новиков В.В., Янковский В.Г.** Основы теплофизики полимерных материалов. Киев: Наукова Думка, 1991. 232 с.

## REFERENCES

1. **Zolotarev V.A.** Bitumens modified polymers and additives. — St. Petersburg: Slavutich, 2013. P. 96–123 (rus.).

2. **Solomentsev A.B.** Adhesion additives for road bitumen and asphalt, and evaluate their effectiveness. *Doroga*. 2013. Vol. 69. P. 80–83. (rus.)

3. **Grushko I.M., Korolev I.V., Borsch I.M., Mishchenko G.M.** Road construction materials: Textbook for road traffic institutions. Moscow: Transport, 1983. 383 p. (rus.).

4. **Melik-Bagdasarov M.S., Gioev K.A., Melik-Bagdasarova N.A.** Construction and repair of asphalt road surfaces: Tutorial. Belgrade, 2007. 163 p. (rus.)

5. **Kotlyarskii E.V.** Construction and technical properties of the asphalt concrete road: Tutorial. М., 2004. 194 p. (rus.)

6. **Dement'ev N.V.** Impact on the quality of production

processes, polymer-bitumen. *Dorozhnaya derzhava*. 2013. Spets. vypuski. P. 67–69. (rus.)

7. **Bailey Y.** Attempt to correlate some tensile strength measurement on glass. *Glass industry*. 1939. Vol. 20, №1. P. 20–35.

8. **Petrov V.A., Bashkarev A.Ya., Vettegren V.I.** Physical basis of prediction of durability of structural materials. St. Petersburg: Politekhnik, 1993. 475 p. (rus.)

9. **Ivankov S.A., Bashkarev A.Ya.** On the durability and strength of composites. *Scientific and technical statements STU*. St. Petersburg, 2011. №4. S. 169–199. (rus.)

10. **Lipatov Y.S.** Colloid chemistry of polymers. Kyiv: Naukova Dumka, 1984. 344 p. (rus.)

11. **Privalko V.P., Novikov V.V., Jankowski V.G.** Fundamentals of Thermal Physics of polymeric materials. Kyiv: Naukova Dumka, 1991. 232 s. (rus.)

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**БАШКАРЁВ Альберт Яковлевич** — доктор технических наук профессор кафедры строительных и дорожных машин института металлургии, машиностроения и транспорта Санкт-Петербургского государственного политехнического университета лауреат Государственной Премии РФ; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: bashkarev@spbstu.ru

**БЕСПАЛОВА Наталья Николаевна** — студентка Санкт-Петербургского государственного политехнического университета; 195251, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, Россия; e-mail: bespalova91@mail.ru

## AUTHORS

**BASHKAREV Albert Ya.** — Doctor of technical sciences, professor, laureate of the State Prize of the Russian Federation; St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: bashkarev@spbstu.ru

**BESPALOVA Natalia N.** — student; St. Petersburg State Polytechnical University; 195251, Politekhnikeskaya Str. 29, St. Petersburg, Russia; e-mail: bespalova91@mail.ru