

# **СТРОИТЕЛЬСТВО И ЭКСПЛУАТАЦИЯ ДОРОГ**

УДК 625.765, 625.8

**В. В. Губа, канд. техн. наук, К. Р. Губа, Л. Н. Третьякова**

**Автомобильно-дорожный институт (филиал)  
федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Донецкий национальный технический университет»  
в г. Горловка**

## **ИЗМЕНЕНИЕ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ И ТЕКСТУРЫ АСФАЛЬТОБЕТОНА В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*Для содержания и ремонта существующих дорог необходим доступ к недорогим материалам и ресурсам. К таким ресурсам можно отнести битум, как вяжущее вещество, и щебень, как высококачественный минеральный материал. При реконструкции, капитальном и текущем ремонтах автомобильных дорог происходит накопление до 15–20 млн т в год старого асфальтобетона, который пригоден для вторичного использования в строительстве. Необходимо установить качество старого асфальтобетона и выполнить работы по восстановлению физико-механических свойств битума, находящегося в его составе.*

***Ключевые слова:** структура, текстура, состав, физико-механические свойства, асфальтобетонная смесь, асфальтобетон*

### **Введение**

Интенсивное развитие перевозок грузов и пассажиров по автомобильным дорогам требует повышения эффективности работы транспортных средств, комфортности и безопасности движения, увеличения скорости перевозок, а также снижения себестоимости транспортной работы в целом.

Следуя этим условиям, наиболее важными потребительскими свойствами транспортно-эксплуатационного качества дороги – является ровность асфальтобетонных дорожных покрытий [1]. Потребительские свойства дороги, а также транспортно-эксплуатационные показатели постоянно изменяются и являются изменяющимися показателями во времени. Эти изменения происходят постоянно в процессе эксплуатации дороги и приводят к ухудшению ее состояния. Если не принимать мер к должному уровню эксплуатации, содержания, а также ремонту дорог, то происходит накопление изменений, которые, в свою очередь, приводят к «отказу от работы» участка дороги или всей дороги в целом.

Ровность жестких дорожных покрытий является одним из важнейших показателей транспортно-эксплуатационных свойств автомобильных дорог. Зрительное восприятие водителями повреждений на покрытии проезжей части заставляет изменять траекторию движения, отвлекает внимание от ситуации на дороге, а также повышает эмоциональное напряжение [1, 2]. Требования к ровности дорожных покрытий в период эксплуатации автомобильных дорог должны определяться по показателю IRI, который является критерием для назначения ремонта по восстановлению ровности дорожных покрытий [3]. Так как дорожное покрытие является самым важным элементом дороги, то вопросы его качества и надежности имеют большое значение.

### **Анализ публикаций**

Приведение транспортно-эксплуатационных показателей автомобильных дорог к нормативным требованиям выполняют при ремонтных работах асфальтобетонных покрытий, устраивая новые слои на уже существующем дорожном покрытии. Такие ремонтные работы

приводят к неэкономному использованию строительного материала, увеличению толщины слоя покрытия, некачественному ремонту мелких дефектов и разрушений. Как правило, это приводит к образованию новых, более больших по площади дефектов и разрушений, которые требуют сложных ремонтных работ с максимальным привлечением новых технологий, техники, материалов, а также увеличения времени на выполнение ремонтных работ.

В 80-х годах Г. К. Сюнби, А. П. Васильев, О. Т. Батраков и др. предлагают альтернативные методы восстановления существующих дорожных одежд, которые заключаются в технологии терморегенерации в разных вариациях (remix, remix plus, repave и т. п.) [4]. Экономическая эффективность горячего метода восстановления заключается в повторном использовании имеющегося на дороге материала без необходимости замены его на новый материал.

В 90-х годах ученые В. А. Золотарев, В. В. Ильченко, Г. С. Бахрах, Д. А. Розенталь, Н. В. Горельшев и др. предлагают метод холодного фрезерования дефектных и изношенных слоев дорожной одежды с последующим их удалением и устройством вместо них новых покрытий [5–7]. В результате холодного фрезерования, полученный асфальтный гранулят можно повторно перерабатывать на асфальтобетонных заводах (recycling in plant) или непосредственно на месте (recycling in place). Данная переработка полученного асфальтного гранулята дает значительный экономический эффект.

С 2000-х и по настоящее время ученые А. М. Алиев, Г. С. Бахрах, Л. В. Билай, В. М. Гоглидзе, Б. С. Гмыря, С. К. Илиополов, С. Ф. Филатов, А. П. Лупанов и др. продолжают изучать и совершенствовать методы, технологии и материалы, которые используют при ремонтах дорожных покрытий. Так, в 2001 году в Германии при ремонте дорог было снято и повторно использовано 15 млн т асфальтобетона, из которых 12 млн т (80 %) ушло на приготовление новой смеси.

В связи с этим появляется необходимость исследовать разработки, направленные на выполнение ремонтных работ с более меньшими затратами дорогостоящего нового строительного материала. Поэтому есть необходимость в использовании старого снятого дорожного покрытия, что позволит значительно повысить эффективность ремонтных работ.

**Целью работы** является изучение вопроса старения асфальтобетона при эксплуатации дорожного покрытия и возможности дальнейшего его использования в новой асфальтобетонной смеси.

### **Основная часть**

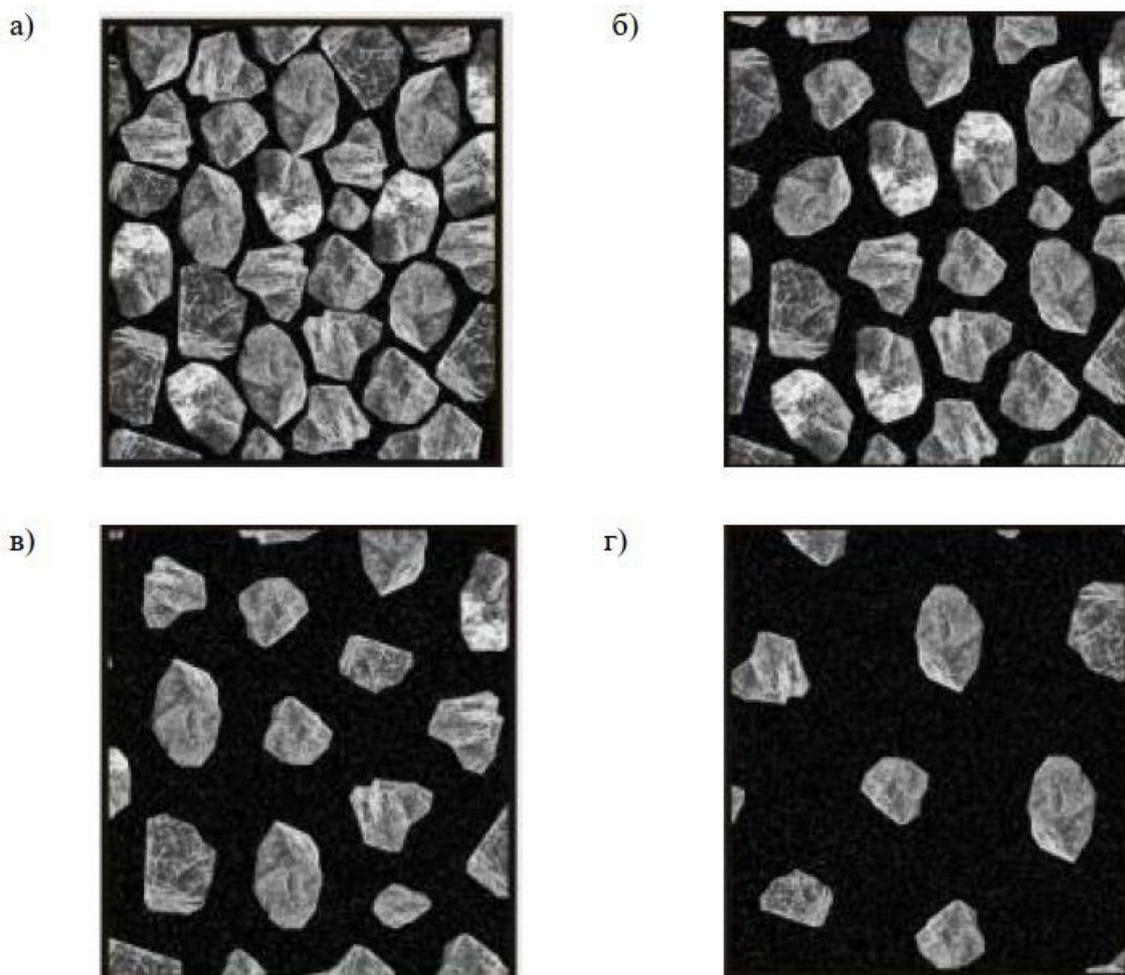
Весь жизненный цикл асфальтобетона (начиная с производства асфальтобетонной смеси и заканчивая разрушением дорожного покрытия), особенно битума, входящего в состав асфальтобетона, это постоянное воздействие негативных факторов. Все негативные факторы вызывают изменение химического состава и структуры битума. В процессе влияния этих факторов происходят обратимые и необратимые изменения. Перестройка надмолекулярной структуры битума (физическое старение), которая при нагревании способна восстанавливаться, является обратимым изменением. Изменение химического состава (химическое старение) связано с происходящими в битуме разного рода реакциями, являющимися необратимыми изменениями [8].

Внешними факторами, которые определяют необратимое изменение битума в составе асфальтобетонной смеси, являются температура, свет, радиация, воздух, влага, агрессивные химические вещества. Также необходимо отметить влияние химического состава, строения, легкоокисляющихся групп и связей в макроструктуре. Проводимые исследования механизма старения битума позволили показать влияние каждого из них и определили направление дальнейших исследований по улучшению этих свойств.

Сравнивая влияние различных факторов старения на битум, можно сделать вывод, что воздействие света незначительно и им можно пренебречь, так как толщина слоя, которая

подвергается влиянию, незначительна по сравнению с толщиной всего слоя. Влияние света происходит на толщину слоя размером 5–10 мк.

Внутренние факторы, которые способствуют необратимым изменениям свойств асфальтобетона, – это его структура и текстура, вид и консистенция органического вяжущего, химико-минералогический состав, а также тип гранулометрического состава минерального материала. При старении асфальтобетона происходят структурные изменения, которые связаны со структурными изменениями битума, входящего в его состав (рисунок).



а – каркасная; б – полукаркасная; в, г – бескаркасная  
Рисунок – Структура асфальтобетона стандартного состава

Рассматривает процесс старения битума как последовательный переход от структуры «золь» в структуру «гель», а затем к частичному или полному разрушению А. С. Колбановская [8]. Вначале происходит образование коагуляционной сетки асфальтенов из надмолекулярных структур смол, это приводит к улучшению структурно-реологических свойств битума. Затем формируется и развивается жесткая пространственная структурная сетка асфальтенов. Дальнейшее увеличение концентрации асфальтенов приводит к разрушению структурной сетки. На последней стадии старения происходит разупрочнение и разрушение пространственной структуры из-за возникающей в отдельных узлах и элементах структурной сетки высоких внутренних напряжений [8].

В первые годы эксплуатации асфальтобетонных покрытий происходит процесс изменения текстуры, который носит затихающий характер [9]. Текстурные изменения связаны перераспределением частиц минерального материала и органического вяжущего. На изменение текстуры влияет движение транспортных средств, от действия которых происходит раз-

рушение минерального материала, истирание и выдавливание битума. Происходит истончение пленки битума на поверхности минерального материала вследствие чего материал становится более жестким и легко подвергается дальнейшим разрушениям.

В осенне-зимний период происходит влияние химически агрессивных сред, которые несут необратимые изменения в структуре асфальтобетона. Химические элементы реагентов оказывают действие на все составляющие асфальтобетона, при этом разрушение происходит в два этапа [10]. На первом этапе происходит изменение группового и химического состава битума, что является процессом старения. На втором этапе происходит разрушение структуры асфальтобетона, что является реакцией обмена с образованием легкорастворимых продуктов реакции с последующим их вымыванием.

Изменение структуры асфальтобетона способствует повышению скорости проникновения воды под пленку битума, что влечет за собой его отслаивание от поверхности минеральных материалов [11, 12]. В асфальтобетоне, насыщенном влагой, при движении транспортных средств появляются вибрирующие гидродинамические давления, которые только увеличивают отслаивание битума и являются основой для образования трещин на поверхности дорожного покрытия.

Асфальтобетонной смесью является оптимально подобранная смесь, состоящая из минеральных материалов и органического вяжущего, взятых в установленных соотношениях и перемешанных в нагретом состоянии. Асфальтобетонные смеси, приготовленные и уложенные на вязких или жидких битумах, делятся на горячие (не менее 120 °С) и холодные (не менее 5 °С). По минеральному составу асфальтобетонные смеси делятся на крупнозернистые (до 40 мм), мелкозернистые (до 20 мм) и песчаные (до 5 мм). По остаточной пористости асфальтобетоны делят на высокоплотные (1,0–2,5 %), плотные (2,5–5,0 %), пористые (5,0–10,0 %) и высокопористые (от 10 %). В зависимости от содержания щебня смесь делят на типы: А (50–60 %), Б (40–50 %), В (30–40 %), Г (на песке отсева), Д (на природном песке). Физико-механические свойства делят асфальтобетон на марки: I, II, III (горячий высокоплотный и плотный), I, II (горячий пористый и высокопористый), I, II (холодный).

Исследования старения асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов является процессом сложным и длительным, над этим вопросом работали и продолжают работать ряд ученых [13–15]. На сегодняшний день известно небольшое количество критериев, которые позволяют предположить физико-механические свойства и эксплуатационные показатели асфальтобетонных покрытий [16–18].

Старение асфальтобетона зависит от скорости попадания кислорода в пленку битума, поэтому Г. С. Бахрах предложил использовать коэффициент воздухопустности:

$$K_{ВД} = \frac{W}{\delta}, \quad (1)$$

где  $W$  – водонасыщение образца, % по объему;

$\delta$  – средневывчисленная толщина битумной пленки, мкм.

Старение битумо-минеральных материалов в асфальтобетоне характеризуют коэффициентами их старения:

$$K_{cm} = \frac{R_{20}^{\tau}}{R_{20}^0}, \quad (2)$$

где  $R_{20}^{\tau}$ ,  $R_{20}^0$  – предел прочности при сжатии асфальтобетона при 20 °С, подвергнутого тепловому старению в течение  $\tau$  и 0 часов времени соответственно.

В пределах заданного срока службы оценить долговечность асфальтобетона можно по трещиностойкости:

$$T = \frac{\lg[\eta] - 1,1 \cdot \lg \eta_n}{n_c}, \quad (3)$$

где  $[\eta]$  – предельное значение вязкости трещиностойкого асфальтобетона при расчетной низкой температуре;

$\eta_n$  – начальная вязкость асфальтобетона при той же температуре;

$n_c$  – коэффициент старения асфальтобетона;

1,1 – коэффициент приведения начальной вязкости к условно-начальной, соответствующей линейному изменению логарифма вязкости от времени.

Старение асфальтобетона оценивают допускаяемой величиной коэффициента старения:

$$n_c = \frac{\lg[\eta] - 1,1 \cdot \lg \eta_n}{T_n}, \quad (4)$$

где  $T_n$  – нормативный срок службы асфальтобетона.

Изменение физико-механических характеристик асфальтобетона в процессе эксплуатации можно оценить показателем длительной трещиностойкости асфальтобетона:

$$K_{mp}^T = \frac{R_{изг}^T}{E^T}, \quad (5)$$

где  $R_{изг}^T$  – изменение предела прочности на растяжение при изгибе при температуре 0 °С и скорости деформирования 50 мм/мин, МПа;

$E^T$  – изменение динамического модуля упругости асфальтобетона, МПа.

Изменение динамической вязкости при изменении температуры определяют:

$$\eta(t) = \eta(0) \cdot e^{\frac{1}{2} \sum_{m=1}^1 (k_m + k_{m-1}) \cdot \Delta t_m}, \quad (6)$$

где  $\eta(0)$  – динамическая вязкость исходного битума (до старения), Па·с;

$k_m$  – коэффициент интенсивности старения битума в конце;

$k_{m-1}$  – коэффициент интенсивности старения битума в начале;

$\Delta t_m$  – продолжительность старения, ч.

Динамическая вязкость битума до старения определяется:

$$\eta(0) = \left( \frac{P(0)}{2 \cdot 10^3} \right)^{-5}, \quad (7)$$

где  $P(0)$  – первоначальное значение глубины проникания иглы в битум при температуре 25 °С, мм<sup>-1</sup>.

Необходимо отметить, что интенсивность старения асфальтобетона обусловлена интенсивностью старения битума, входящего в его состав. Старение самого битума происходит при окислительных и испарительных процессах, а также постепенным изменением группового состава.

### **Заключение**

Анализ нормативной, технической и периодической литературы, а также проведенные исследования показали, что в процессе эксплуатации асфальтобетона происходят его изменения как состава, так и структуры. Данные изменения могут быть как обратимыми, так и необратимыми. Химическое старение битума является необратимым изменением, а физическое старение битума – обратимым, то есть может быть восстановлено после проведения восстановительных работ. Для того чтобы вернуть битуму нормативные значения, необходимо досконально изучить структуры асфальтобетона и определить показатели и коэффициенты старения, а также и изменения свойств, которые помогут в процессе восстановления.

### **Список литературы**

1. Чванов, В. В. Обоснование норм продольной ровности дорожных покрытий, методов ее измерения и контроля / В. В. Чванов, Н. А. Лушников, А. М. Стрижевский // Дороги России XXI века. – 2008. – № 6. – С. 58–62.
2. ГОСТ 33101-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Покрытия дорожные. Методы измерения ровности : межгосударственный стандарт : издание официальное : принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации по переписке (протокол от 14.11.2014 г. № 72-П) : введен впервые. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 23 с.
3. ГОСТ Р 56925-2016. Дороги автомобильные и аэродромы. Методы измерения неровностей оснований и покрытий : национальный стандарт Российской Федерации : издание официальное : утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 23 мая 2016 г. № 370-ст : введен впервые. – Москва : Стандартиформ, 2016. – 15 с.
4. Сюньи, Г. К. Регенерированный дорожный асфальтобетон / Г. К. Сюньи, К. Х. Усманов, Э. С. Файнберг ; под редакцией Г. К. Сюньи. – Москва : Транспорт, 1984. – 118 с.
5. СТО НОСТРОЙ 2.25.35-2011. Автомобильные дороги. Устройство оснований дорожных одежд. Часть 7. Строительство оснований с использованием асфальтобетонного гранулята : национальное объединение строителей : стандарт организации : издание официальное : утвержден и введен в действие Решением Совета Национального объединения строителей, протокол от 5 декабря 2011 г. № 22 : введен впервые / разработан СРО НП «МОД «СОЮЗДОРОСТРОЙ». – Москва : БСТ, 2012. – 29 с.
6. Золотарев, В. А. Долговечность дорожных асфальтобетонов / В. А. Золотарев. – Харьков : Вища школа, 1977. – 115 с.
7. Бахрах, Г. С. Регенерация покрытий и дорожных одежд нежесткого типа / Г. С. Бахрах // Наука и техника в дорожной отрасли. – 1998. – № 3. – С. 18–21.
8. Колбановская, А. С. Дорожные битумы / А. С. Колбановская, В. В. Михайлов. – Москва : Транспорт, 1973. – 264 с.
9. Бахрах, Г. С. Старение асфальтобетонных покрытий и пути его замедления / Г. С. Бахрах // Труды ГипроДорНИИ. – 1974. – Вып. 9. – С. 84–96.
10. Котлярский, Э. В. Изменение свойств асфальтобетона в присутствии химически агрессивных растворов / Э. В. Котлярский // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2008. – № 2(45). – С. 21–24.
11. Гегелия, Д. И. Закономерности изменения некоторых расчетных параметров асфальтобетона при длительном воздействии воды и знакопеременных температур / Д. И. Гегелия // Совершенствование технологии строительства асфальтобетонных и других черных покрытий. Труды СоюздорНИИ. – 1981. – С. 67–76.
12. Жданюк, В. К. Структуроутворення в контактній зоні, як основа формування водостійкості асфальтобетонів : спеціальність 05.23.05 «Будівельні матеріали та виробництво» : автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук / В. К. Жданюк. – Харків : Харківський державний технічний університет будівництва і архітектури, 2000. – 34 с.
13. Радовский, Б. С. Вязкоупругие характеристики битума и их оценка по стандартным показателям : монография / Б. С. Радовский, Б. Б. Телтаев. – Алма-Ата : БЛИМ, 2013. – 152 с.
14. Котлярский, Э. В. Научно-методические основы оценки структурно-механических свойств композиционных материалов на основе органических вяжущих / Э. В. Котлярский // Строительные материалы. – 2011. – № 10(682). – С. 36–41.
15. Стукалов, А. А. Старение асфальтобетонных смесей, асфальтобетонов и способы повышения их термоокислительной стойкости : специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия» : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / А. А. Стукалов. – ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры». – Макеевка, 2016. – 24 с.

16. ГОСТ 11503-74. Битумы нефтяные. Метод определения условной вязкости : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета стандартов Совета Министров СССР от 25 июля 1974 г. № 1771 : изменение № 4 принято Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 19 от 24.05.2001 г.) : взамен ГОСТ 11503-65 : дата введения 1976-01-01 / разработан Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. – Москва : Стандартиформ, 2008. – 4 с.
17. ГОСТ 22245-90. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия : государственный стандарт СССР : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного комитета СССР по стандартам от 12.02.1990 г. № 191 : изменение № 1 принято Межгосударственным Советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол № 8 от 12.10.1995 г.) : взамен ГОСТ 22245-76 : дата введения 1991-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1996. – 11 с.
18. ГОСТ 11501-78. Битумы нефтяные. Метод определения глубины проникания иглы : межгосударственный стандарт : издание официальное : утвержден и введен в действие Постановлением Государственного Комитета СССР по стандартам от 6 сентября 1978 г. № 2457 : взамен ГОСТ 11501-73 : дата введения 1980-01-01 / разработан Министерством нефтеперерабатывающей и нефтехимической промышленности СССР. – Москва : Стандартиформ, 2005. – 7 с.

**В. В. Губа, К. Р. Губа, Л. Н. Третьякова**  
**Автомобильно-дорожный институт (филиал)**  
**федерального государственного бюджетного образовательного учреждения**  
**высшего образования «Донецкий национальный технический университет» в г. Горловка**  
**Изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона в процессе эксплуатации**

Эксплуатация автомобильных дорог при постоянном приросте транспортных средств приводит к быстрому изнашиванию асфальтобетона. На дорожном покрытии, находящемся долгое время в эксплуатации без ремонта, появляются дефекты и разрушения, которые могут привести к серьезным дорожно-транспортным происшествиям. Изучение вопроса износа асфальтобетонного дорожного покрытия является актуальным и своевременным.

Асфальтобетон состоит из минеральных материалов (щебня, песка, минерального порошка), которые обработаны органическим вяжущим (битумом), что делает его многофазной и многокомпонентной системой. Изменение структуры и текстуры асфальтобетона, а также физико-механических свойств, связано со свойствами компонентов, входящих в состав, характером физико-химических связей, а также длительностью внешнего воздействия (длительность и повторяемость нагрузок от транспортных средств, изменение температуры окружающей среды, солнечная радиация и др.). Главным элементом, влияющим на изменение состава, структуры и текстуры асфальтобетона является битум.

На первой стадии образуется коагуляционная сетка асфальтенов, на второй стадии формируется и далее развивается жесткая пространственная сетка асфальтенов, на третьей стадии происходит увеличение концентрации асфальтенов, а на четвертой стадии происходит разупрочнение и разрушение структурной сетки асфальтенов. Данные изменения структуры приводят к истончению и отделению пленки битума от минеральной части, что приводит к попаданию влаги под пленку и продолжению процесса разрушения.

Изменение состава, структуры, текстуры и свойств битума, который подвержен старению в процессе эксплуатации асфальтобетона, можно определять по коэффициентам воздухопроницаемости и старения, по показателям трещиностойкости и динамической вязкости. Определение данных показателей и коэффициентов поможет определить степень старения асфальтобетона в целом. Выполнив работы по улучшению физико-механических свойств «постаревшего» битума, можно будет использовать старый асфальтобетон в новой асфальтобетонной смеси.

**СТРУКТУРА, ТЕКСТУРА, СОСТАВ, ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, АСФАЛЬТОБЕТОННАЯ СМЕСЬ, АСФАЛЬТОБЕТОН**

*V. V. Guba, K. R. Guba, L. N. Tretiakova*  
**Automobile and Road Institute (Branch) of the Federal State Budget Educational Institution  
of Higher Education «Donetsk National Technical University» in Gorlovka**  
**Changes in the Asphalt Concrete Composition, Structure and Texture during Operation**

The operation of roads with a constant increase in vehicles leads to the rapid wear of asphalt concrete. Road surfaces that have been in use for a long time without repair have defects and damages that can lead to serious traffic accidents. The study of the asphalt concrete pavement wear is relevant and timely.

Asphalt concrete consists of mineral materials (crushed stone, sand, mineral powder), which are treated with an organic binder (bitumen), which makes it a multi-phase and multi-component system. Changes in the asphalt concrete structure and texture, as well as physical and mechanical properties, are associated with the properties of the components included in the composition, the nature of physical and chemical bonds, as well as the duration of external exposure (duration and repeatability of loads from vehicles, changes in ambient temperature, solar radiation, etc.). The main element influencing the change in the composition, structure and texture of asphalt concrete is bitumen.

At the first stage, a coagulation network of asphaltenes is formed; at the second stage, a rigid spatial network of asphaltenes is formed and then develops; at the third stage, an increase in the concentration of asphaltenes occurs. These changes in the structure lead to thinning and separation of the bitumen film from the mineral part, which leads to moisture ingress under the film and the continuation of the destruction process.

The change in the composition, structure, texture and properties of bitumen, which is subject to aging during the operation of asphalt concrete, can be determined by the coefficients of air availability and aging, by crack resistance and dynamic viscosity. The determination of these indicators and coefficients will help determine the degree of aging of asphalt concrete in general. Having completed the work to improve the physical and mechanical properties of the «aged» bitumen, it will be possible to use the old asphalt concrete in the new asphalt concrete mixture.

STRUCTURE, TEXTURE, COMPOSITION, PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES, ASPHALT CONCRETE MIXTURE, ASPHALT CONCRETE

**Сведения об авторах:**

**В. В. Губа**

SPIN-код РИНЦ: 7398-9000  
Телефон: +7 (949) 367-31-88  
Эл. почта: guba.viktoriya@mail.ru

**К. Р. Губа**

SPIN-код РИНЦ: 6818-8047  
Телефон: +7 (949) 367-31-90  
Эл. почта: guba.constantin@gmail.com

**Л. Н. Третьякова**

SPIN-код РИНЦ: 9623-0647  
Телефон: +7 (949) 372-17-82  
Эл. почта: luda-tret@mail.ru

*Статья поступила 07.08.2023*

© В. В. Губа, К. Р. Губа, Л. Н. Третьякова, 2023  
Рецензент: Л. Н. Морозова, канд. техн. наук, доц.,  
Автомобильно-дорожный институт  
(филиал) ДонНТУ в г. Горловка