

**Восстановление свойств асфальтобетонных покрытий
методом холодного ресайклинга**

Бусел А.В.

Государственное предприятие «БелдорНИИ»

Веренько В.А.

Белорусский национальный технический университет

г. Минск, Беларусь

Строительство автомобильных дорог в Китае является приоритетным направлением развития экономики, начиная с 60-х годов прошлого века. К 2000 году их протяженность составила 1,4 млн километров, а к настоящему времени увеличилась практически в 3,0 раза [1]. Только за последние 5 лет общая протяженность дорог возросла на 534 тыс. километров, причем построено и отремонтировано 1,28 млн километров сельских дорог [2]. Наряду с расширением масштабов строительства первоочередной задачей стало повышение уровня технического состояния автомобильных дорог. Проводимая диагностика дорожных покрытий в КНР показывает, что значительная их часть не соответствует современным требованиям и подлежит ремонту и реконструкции [3]. Проблемным вопросом на дорогах Китая является движение перегруженных тяжелых транспортных средств, которые разрушают даже такие прочные дорожные одежды на бетонном основании, которые широко применяются в Китае. Вторым значимым фактором, который надо учитывать в настоящее время, является естественное старение асфальтобетонных покрытий, которые в среднем прослужили более 10 лет и требуют восстановления. Огромные масштабы предстоящих дорожных работ требуют применения экологически безопасных технологий.

Известно, что самое большое количество дорог (4,1 млн километров) в Китае имеют асфальтобетонное покрытие с двухполосным движением [4], при этом ширина проезжей части составляет в среднем 7-8 метров. Для восстановления верхнего слоя покрытия толщиной 4 см необходимо уложить на каждом километре такой дороги не менее 700 тонн горячей асфальтобетонной смеси. С учетом того, что ремонт надо производить хотя бы один раз в 7-10 лет, то для этого в Китае потребуется производить ежегодно 3,6 млрд. тонн горячей асфальтобетонной смеси. Выбросы даже от современных асфальтобетонных заводов, содержащих системы газоочистки, составят более 1,5 млн тонн, причем только оксида углерода - более 590 тыс. тонн. Это может существенно повлиять на и без того сложную экологическую обстановку. Снизить уровень загрязнения

атмосферы при выполнении ремонтных дорожных работ можно путем применения холодных технологий регенерации асфальтобетона, основанных на использовании водных эмульсий органических вяжущих веществ и цементных суспензий.

Проблема регенерации асфальтобетона на протяжении ряда лет привлекает внимание исследователей и производственных организаций во многих странах мира [5,6]. В последнее время упор делается на максимальное использование имеющихся структурных составляющих асфальтобетона без существенного нарушения их прочности, сложившейся за время эксплуатации дорожных покрытий. Все чаще исключается нагрев асфальтобетона, вызывающий дополнительное старение битума и необратимые изменения физико-механических свойств асфальтовяжущего. Холодное дробление дорожных покрытий приводит к разрушению асфальтобетона по наиболее слабым контактам. Замена этих контактов на новые прочные и устойчивые во времени связи позволяет восстановить слой покрытия и обеспечить его высокие потребительские свойства (ровность, шероховатость, долговечность).

Учитывая, что наиболее подвержен старению верхний слой асфальтобетонного покрытия [7], его периодическая регенерация может приостановить разрушение нижележащих конструктивных слоев дорожной одежды.

Структура асфальтобетона во многом определяется наличием и состоянием пленок битума на поверхности минеральных частиц. Обычно эти пленки перенасыщены высокомолекулярными компонентами, такими как асфальтены и смолы. В граничных слоях их больше на карбонатных материалах, чем на кварцевых [8]. Высокомолекулярные соединения образуют ориентированные цепочки, прочность которых падает по мере удаления от минерального зерна, и на расстоянии нескольких миллиметров битум приобретает объемные свойства. Поэтому разрушение структуры асфальтобетона при холодном дроблении происходит за пределами зоны адсорбции. Получение при измельчении частиц асфальтогранулята с ненарушенной внутренней структурой зависит от технологических факторов дробления.

Как показывает мировая практика, качество дорожно-строительных работ с использованием холодных регенерированных смесей определяется совокупностью технологических и материаловедческих факторов. Поэтому большое количество исследований направлено на совершенствование машин и оборудования для получения холодных регенерированных смесей (как на заводе, так и непосредственно на дороге), их укладки и уплотнения, а также на повышение надежности и долговечности самих регенерированных материалов.

В настоящее время компания Wirtgen (Германия) является признанным мировым лидером в производстве оборудования для выполнения холодной регенерации. Использование ресайклера Wirtgen WR 4200 с двумя фрезеровочными барабанами и высокоэффективной камерой смешения обеспечивает требуемое техническое сопровождение работ даже на автомагистралях с покрытиями, предназначенными для высокой интенсивности движения [9].

В любом случае, помимо технологических аспектов холодной регенерации асфальтобетонных покрытий, которым уделяется повышенное внимание машиностроительными гигантами, следует придать новый импульс материаловедческим изысканиям в области обеспечения качества и надежности регенерированных холодными способами асфальтобетонов. Это позволит, если не достигнуть, то приблизиться к полному восстановлению свойств верхних слоев дорожных одежд.

Измельченный асфальтобетон представлен частицами покрытого битумом щебня и песка, обломками асфальтового раствора и асфальтового вяжущего. Эта смесь зачастую неоднородна по составу, поскольку на дорожных покрытиях встречаются участки с ранее проведенным ремонтом, где использовались разные асфальтобетоны. Так, отобранные пробы асфальтогранулята фракции 0–20 мм на китайских дорогах показали разброс в содержании битума от 3,6% до 5,3%. Причем во фракции 0 – 5 мм содержание битума увеличивается до 4,8% – 5,9%. Взятый для экспериментов асфальтогранулят имел следующий фракционный состав (таблица 1) и содержание битума - 4,6%.

Из данных таблицы 1 видно, что количества щебня (частицы более 4,75 мм) в асфальтогрануляте недостаточно, чтобы создать устойчивый минеральный каркас в регенерируемом асфальтобетоне, способный воспринимать тяжелую транспортную нагрузку. В связи с этим при регенерации дополнительно вводят кондиционные каменные материалы, например, щебень, в т.ч. обработанный битумом или битумной эмульсией, песок, отсеv дробления, наполнители. Добавление «черного» щебня позволяет, с одной стороны, увеличить угол внутреннего трения частиц за счет их заклинки и плотной упаковки. А с другой стороны, наличие пленки свежего битума на поверхности щебня улучшит его адгезию асфальтовяжущему в составе асфальтогранулята при добавлении, например, битумных эмульсий и цемента [10] при приготовлении регенерированных композитов.

Первичные эксперименты с определением показателей физико-механических свойств составов на органо-гидравлических вяжущих, приготовленных на основании асфальтогранулятов (табл. 1), свидетельствуют, что даже без добавления новых кондиционных

материалов можно достигать достаточно высоких значений расчетных характеристик регенерированного асфальтобетона (табл. 2). Так, например, при содержании битумной эмульсии 3-5% и цемента 2-3% значение модуля упругости регенерированного асфальтобетона на 28 суток достигает уровня 40-60% от показателей свойств материала исходного дорожного покрытия.

Полученный регенерированный асфальтобетон имеет достаточно однородную структуру, что обеспечивает его высокую плотность и прочность для надежного восприятия транспортной нагрузки в широком диапазоне температур нагрева покрытия.

Таблица 1

Гранулометрический состав минеральной части асфальтогранулята

Размер сита, мм	Остаток на сите, %	Просев сквозь сито, %
19	0,0	100,0
16	0,0	100,0
13,2	5,2	94,8
9,5	16,1	83,9
4,75	33,9	66,1
2,36	49,0	51,0
1,18	64,4	35,6
0,6	74,6	25,4
0,3	86,0	14,0
0,15	89,8	10,2
0,075	95,1	4,9

Таблица 2

Свойства регенерированного асфальтобетона

Содержание компонента, мас. %		Структурная прочность, МПа	Модуль упругости, МПа
Битумная эмульсия	Цемент		
0	3	1,34	1077
3	2	1,72	1281
5	2	1,81	1538
5	3	1,94	1686
3	5	2,26	2051
Исходный асфальтобетон		3,98	3560

Однако для эффективного повторного использования асфальтогранулята в верхних слоях новых покрытий, устраиваемых на автомагистралях с высокой грузонапряженностью и интенсивностью движения транспорта, надо обеспечить требуемые показатели устойчивости к многократному нагружению и коррозионной стойкости. В связи с этим авторами было предложено направленно модифицировать битумные эмульсии с целью улучшения ресурсных свойств регенерированного асфальтобетона.

Для оценки сроков службы материалов дорожного покрытия была разработана специальная методика, основанная на применении теории надежности, кинетики накопления повреждаемости и долговечности. Основы теории и применения методики изложены в работе [11]. С учетом использования асфальтогранулята в составе покрытий известная методика потребовала определенной корректировки в части уточнения зависимостей уровней надежности от коэффициентов запаса прочности.

Выделено 4 основных критерия для определения надежности и долговечности покрытия дороги:

- критерий сдвигоустойчивости;
- критерий температурной трещиностойкости;
- критерий усталостной долговечности;
- критерий коррозионной стойкости.

С учетом сказанного теоретическая долговечность материала (T_d) будет определяться общим уровнем его надежности ($P_{об}$) – вероятностью безотказной работы покрытия по всем критериям прочности.

Срок службы в соответствии с [11] является виртуальным и отражает максимально возможный потенциал работоспособности, заложенный в реальном материале и реализуемый при расчетных нагрузках (11,5 тонны на ось и при интенсивности движения 5001000 автомобилей в сутки). Применительно к климатическим условиям центральных провинций КНР график зависимости T_d от $P_{об}$ представлен на рисунке 1.

Данная зависимость была получена путем обобщения многолетних теоретических и экспериментальных исследований общего уровня надежности материала покрытия и срока его службы. Здесь подразумевается проектный срок службы, который носит вероятностный характер, поэтому связь двух вероятных параметров (уровня надежности и проектного срока службы) вполне корректна.

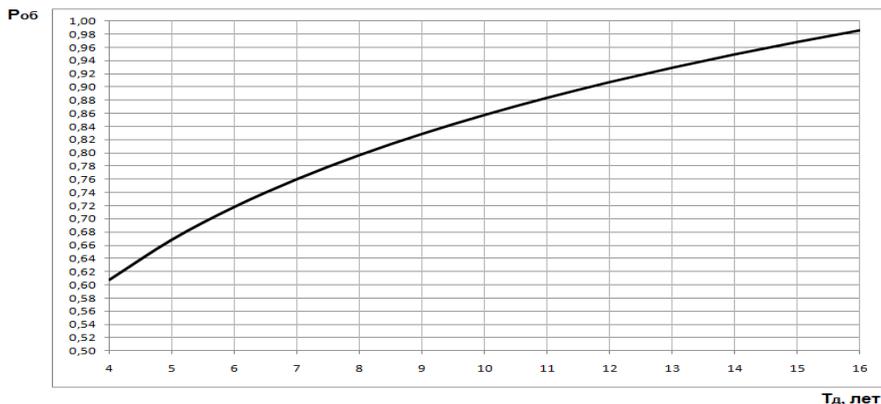


Рис. 1 — График зависимости теоретической долговечности материала покрытия (T_d) от общего уровня надежности материала покрытия ($P_{об}$)

Общий уровень надежности учитывает весь комплекс возможных воздействий и определяется по формуле (1).

$$P_{об} = \sqrt[4]{P_1 \cdot P_2 \cdot P_3 \cdot P_4}, \quad (1)$$

где P_1, P_2, P_3, P_4 – частные уровни надежности по указанным четырем критериям. Графики их зависимости от коэффициентов запаса прочности определены по итогам многочисленных экспериментальных исследований (рисунок 2).

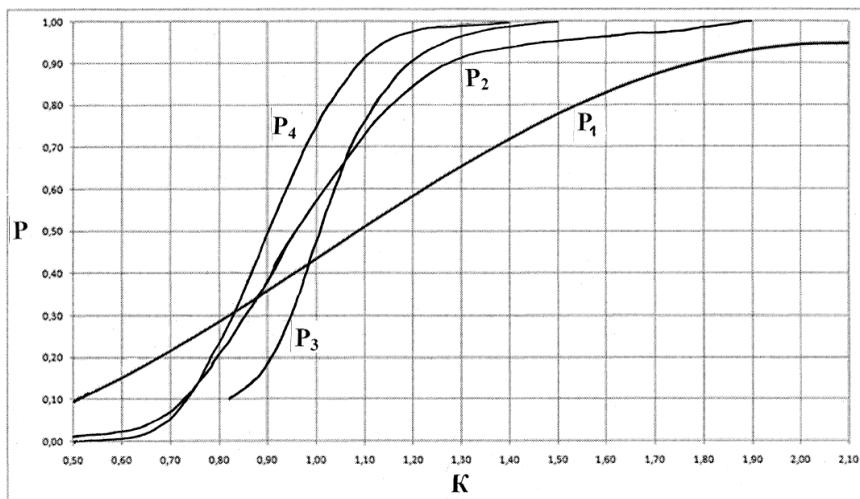


Рис. 2 — Графики зависимости частных уровней надежности P от коэффициентов запаса прочности K

Частный уровень надежности по критерию сдвигоустойчивости P_1 определялся по графику (рисунок 2) в зависимости от значения коэффициента запаса прочности K_1 , который в свою очередь зависит от угла внутреннего трения φ и внутреннего сцепления C частиц в регенерированном асфальтобетоне (2).

$$K_1 = \frac{Cn_1}{\sigma_p - k\sigma_c \operatorname{tg}\varphi}, \quad (2)$$

где C – внутреннее сцепление материала, МПа;

φ – угол внутреннего трения, град;

σ_p , σ_c – растягивающие и сжимающие напряжения на контакте колеса с покрытием, которые принимаются равными 0,5 и 1,0 МПа для сравнительных исследований различных материалов. При необходимости оценки коэффициента запаса K_1 для определенных конкретных нагрузок параметры σ_p , σ_c определяют, используя решение задачи теории упругости для дорожного покрытия, методами компьютерного моделирования.

n_1 – эмпирический параметр, равный 0,8;

k – коэффициент, учитывающий несовпадение угла взаимодействия растягивающих и сжимающих напряжений, принимается равным 0,43.

Аналогично был определен частный уровень надежности регенерируемого асфальтобетона с применением модифицированных

эмульсий по критерию температурной трещиностойкости P_2 (рисунок 2). Коэффициент запаса K_2 , определяли по формуле (3).

$$K_2 = \frac{0,5R_c}{R_0}, \quad (3)$$

где R_c – предельная структурная прочность асфальтобетона, МПа;

R_0 – предел прочности асфальтобетона на растяжение при температуре 0°C , МПа;

Частный уровень надежности по критерию усталостной долговечности P_3 определялся по графику (рисунок 4) в зависимости от значения коэффициента K_3 , определенного по формуле (4)

$$K_3 = 0.08 \cdot \frac{R_c^2}{\sigma \cdot R_0}, \quad (4)$$

где R_c – предельная структурная прочность асфальтобетона, МПа;

R_0 – предел прочности асфальтобетона на растяжение при температуре 0°C , МПа;

σ – максимальные растягивающее напряжение в конструктивном слое при расчетной температуре 0°C , МПа, которое рекомендуется принять равными 1,0 МПа для сравнительных исследований.

Частный уровень надежности по критерию коррозионной стойкости P_4 определяется по графику (рисунок 2) в зависимости от значения коэффициента K_4 , определенного по формуле (5).

$$K_4 = \frac{K_{\text{мрз}}^\Phi}{K_{\text{мрз}}^{\text{тр}}}, \quad (5)$$

где $K_{\text{мрз}}^\Phi$ – фактический коэффициент морозостойкости;

$K_{\text{мрз}}^{\text{тр}}$ – требуемый коэффициент морозостойкости.

В условиях центральных провинций Китая для материала в дорожном покрытии для сравнительных расчетов рекомендуется принять равным $K_{\text{мрз}}^{\text{тр}} = 0,8$.

Используя данную методику, были выполнены экспериментальные исследования свойств регенерированных асфальтобетонов и определены их уровни надежности и сроки службы.

В качестве базового материала был принят вышеприведенный традиционный регенерированный асфальтобетон, состоящий из асфальтогранулята, битумной эмульсии (4%), и цемента (2%).

Разработанный нами материал имел в своем составе модификатор битумной эмульсии на основе эпоксидной смолы.

Значения коэффициентов запаса и частных уровней надежности приведены в таблице 3.

Таблица 3

Показатели надежности

Вид материала	Коэффициенты запаса прочности				Частные уровни надежности				Общий уровень надежности
	K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	P ₁	P ₂	P ₃	P ₄	
Базовый	1,2	1,10	1,05	0,97	0,59	0,71	0,65	0,68	0,66
Предлагаемый	1,2	1,25	1,10	1,90	0,82	0,87	0,77	0,75	0,80

Согласно графику на рисунке 1, срок службы для базового материала составит 4,8 года, а для предложенного – 8 лет, что сравнимо со сроком службы исходного асфальтобетона – 10 лет.

С учетом того, что регенерированный традиционным способом асфальтобетон служит в среднем на 50% меньше исходного горячего асфальтобетона, экологический ущерб от выбросов производственных предприятий в случае применения холодной регенерации даже при двукратном ремонте будет более чем в 8 раз ниже, чем при горячей технологии. В Китае в этом случае объем выбросов не превысит 1900 тонн, а оксида углерода – 800 тонн. Между тем и эти выбросы предложено уменьшать путем повышения надежности и долговечности восстановленного дорожного покрытия. Проведенные нами исследования позволяют увеличить срок службы регенерированного бетона до 8 лет, что позволит еще в 1,6 раза сократить загрязнение окружающей среды.

Перспективные разработки авторов данной статьи показывают, что уже сегодня можно получать материалы на основе асфальтогранулята, способные достигать расчетный ресурс горячего асфальтобетона. Для этого создаются новые технологии, основанные на активизации физико-химических процессов при формировании устойчивой структуры регенерированного асфальтобетона.

Вторым важным направлением в улучшении экологической обстановки при холодной регенерации асфальтобетона является полная целенаправленная утилизация старого дорожного покрытия. Это позволяет сократить ежегодное потребление минеральных ресурсов Китая на 3,0 млрд тонн (каменных материалов и песков) и нефтепродуктов (битумов) – на 18 млн тонн. Перспективным также является применение местных отходов промышленности, не только заменяющих традиционные дорожно-строительные материалы, но и улучшающие их свойства.

Список использованной литературы

- [1] Развитие автодорожной сети КНР [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.webeconomy.ru/index.php?page=cat&cat=mcats&mcats=153&type=news&p=6&newsid=3210>
- [2] За пять лет в Китае построили 534 тысячи километров дорог // Вести. Экономика. – Москва, 28.12.2017. – Режим доступа: <https://www.vestifinance.ru/articles/95824>
- [3] Та Минян. Повышение эффективности ремонта автомобильных дорог северо-восточной части КНР на основе оценки транспортно-эксплуатационного состояния / Автореф. дис. ... канд. техн. наук. – Хабаровск: Тихоокеанский ГУ, 2015. – 21 с.
- [4] Строительство дорог в России и Китае [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://spydell.livejournal.com/639400.html>
- [5] Регенерация асфальтобетонных покрытий : Тематическая подборка. – М.: Росавтодор, 2003. – 92 с.
- [6] Кашевская Е.В. Регенерация асфальтобетонов. – Минск: ДизайнПРО, 2003. – 192 с.
- [7] Асмагулаев Б.А., Косенко, И.Н. Реабилитация асфальтобетона с повторным использованием битумосодержащих материалов старых покрытий при их реконструкции / Проблемы проектирования, строительства и эксплуатации автомобильных дорог: сб. науч. тр. – М., 2001. – С. 11–15.
- [8] Ядыкина В.В. Повышение качества асфальто- и цементобетона из техногенного сырья с учетом состояния его поверхности: автореф. дис. ... докт. техн. наук. – Белгород: БелГТУ, 2004. – 42 с.
- [9] Diekmann M. 2003. [Cold Recycling: A Method of Road Construction with Low CO₂](https://www.soci.org/-/media/Files/Conference-Downloads/2013/Developments-in-Asphalt-Oct-2013/Martin_Diekmann), in papers of «*Developments in Asphalt Plant and Equipment*», 24 October 2013, London, Great Britain. Institute of Materials (Minerals and Mining), London. Available from Internet: https://www.soci.org/-/media/Files/Conference-Downloads/2013/Developments-in-Asphalt-Oct-2013/Martin_Diekmann
- [10] Веренько В.А., Макаревич, А.А. Прогнозирование расчетных характеристик бетонов на органогидравлических вяжущих в широких диапазонах температур и скоростей деформаций // Вестник БНТУ. – 2010. – №3. – С. 34-39.
- [11] Веренько В.А. Деформации и разрушения дорожных покрытий. Причины и пути устранения. – Минск: Бел. Энциклопедия, 2008. – 206 с.