

## Улучшение деформационно-прочностных характеристик битума модифицированием микропорошками кокса

Е.К. Онгарбаев<sup>1,2\*</sup>, А.Б. Жамболова<sup>2</sup>, А.Р. Кенжегалиева<sup>2</sup>, Д.Б. Әбдіхан<sup>1,2</sup>, Ә.Ж. Қалыбеков<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казахский национальный университет им. аль-Фараби, пр. аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Институт проблем горения, ул. Богенбай батыра, 172, Алматы, Казахстан

### ARTICLE INFO

Получено  
04.02.2026

Получено в исправленном виде  
27.02.2026

Принято  
16.03.2026

#### Ключевые слова:

нефтяной кокс;  
каменноугольный кокс;  
нефтяные битумы;  
микропорошки;  
деформационно-прочностные  
характеристики

### АННОТАЦИЯ

Внедрение новых технологий при получении битумов с применением модификаторов на основе углеродных материалов позволяет улучшить их качество. Одним из таких модификаторов является кокс нефтяного или каменноугольного происхождения. Целью работы является улучшение деформационно-прочностных характеристик нефтяного дорожного битума БНД 100/130 путем его модифицирования микропорошками кокса. В работе проведено механохимическое измельчение образцов каменноугольного кокса месторождения Шубарколь и нефтяного кокса производства ТОО «Павлодарский нефтехимический завод» и установлено влияние полученных микропорошков кокса на деформационно-прочностные показатели нефтяного битума. Оценка усталостной прочности модифицированных битумных вяжущих материалов проводилась по методике линейного амплитудного сканирования, основанной на модели непрерывного вязкоупругого разрушения. Битум с 0,5 мас.% нефтяного микрококса может использоваться в условиях с высокими кратковременными нагрузками, но не рекомендуется для эксплуатации при длительных циклических воздействиях. Битум с 0,5 мас.% каменноугольного микрококса сохраняет структуру лучше при больших деформациях, однако уступает в прочности, подходит для эластичных условий эксплуатации. Битум с 1 мас.% нефтяного микрококса обладает оптимальным соотношением прочности и устойчивости к разрушению, поэтому наиболее перспективен для долговечных дорожных покрытий.

### 1. Введение

В настоящее время актуальным становится использование нефтяного или каменноугольного кокса в производстве дорожно-строительных материалов в качестве модификатора [1-4]. Кокс имеет высокомолекулярную пространственно-сшитую полидисперсную структуру, поэтому его добавка к битумным материалам и асфальтобетонным смесям предполагает улучшение некоторых характеристик. В составе кокса карбены являются высокомолекулярными компонентами, а карбоиды – сшитым трехмерным полимером, где атомы углерода расположены в конденсированных ароматических структурах. Поэтому добавление кокса в битумные вяжущие улучшает высокую прочность на растяжение. Между жесткими

блоками сшитого полимера и полидисперсной системой в битуме формируются новые связи, которые при высоких температурах с повышением подвижности макромолекул не разрушаются, позволяя сшитому полимеру необратимо деформироваться в пространственную структуру битумного вяжущего. Это объясняет уменьшение стекания битумного вяжущего, модифицированного нефтяным коксом.

Перед использованием нефтяного кокса в качестве модификатора предлагается предварительное измельчение в шаровой мельнице [5]. Влажное шаровое измельчение с использованием гептана или воды и сухое шаровое измельчение кокса проводили при следующих условиях: размер исходных частиц кокса 45-90 мкм, продолжительность обработки от 5 мин до 9 ч, ско-

\*Corresponding author: Y.K. Ongarbayev; E-mail address: Erdos.Ongarbaev@kaznu.edu.kz

рость вращения 300 об/мин, массовое соотношение порошка к циркониевым шарам диаметром 5 мм – 1:20. Влажное измельчение способствует получению мелких частиц размерами 3 мкм с более узким распределением по сравнению с сухим шаровым измельчением (размер частиц до 6 мкм). При использовании гептана площадь поверхности увеличилась с 0,2 до 70 м<sup>2</sup>/г после 9 ч измельчения; при этом улучшалась дисперсия частиц и предотвращалась агломерация в процессе обработки.

Предложен модификатор для асфальтобетонной смеси [6] из механоактивированного нефтяного кокса с дисперсностью 10-15 мкм в количестве 70 мас.% и смеси нефтяного дорожного битума с полиэтиленовым окисленным воском в количестве 30 мас.%. На первом этапе готовят 30 мас.% смеси нефтяного дорожного битума с полиэтиленовым окисленным воском в соотношении воск:битум = 1:30 и перемешивают при 120-140 °С. На втором этапе берут 70 мас.% предварительно механоактивированного до дисперсности 10-15 мкм нефтяного кокса и вводят в первую смесь.

Для модифицирования битума [7] предложен прокаленный мелкодисперсный кокс с содержанием влаги не более 1 мас.% в количестве 7-14 мас.% от массы битума. Введение кокса в битум обеспечивало стабильность поверхностного слоя на укладываемом дорожном покрытии, замедление процессов старения, повышение вязкости, прочности и эксплуатационных характеристик дорожного полотна. Модифицирование коксом обеспечило сдвигоустойчивость, пластическую текучесть при низких температурах и большую сопротивляемость к разрушающей нагрузке.

Порошок нефтяного кокса с размерами частиц 0,055-0,075 мм в количестве 5-15% использован в качестве модификатора битума [8]. Добавление в битум кокса в количестве до 14 мас.% увеличивало его адгезию к минеральной части асфальтобетона, что объясняется наличием на поверхности частиц кокса различных функциональных групп, таких как гидроксильные, карбонильные, хиноидные, которые способны улучшать адгезионные свойства материала. Количество кокса более 14 мас.% привело к уменьшению полярности асфальтенов, ослаблению внутримолекулярных водородных связей, что нарушает гетерогенную структуру битума.

Разработана модифицированная битумная композиция [9], включающая в качестве добавок 1-40 мас.% нефтяного кокса с размером частиц

менее 300 мкм и 2-5% экстракта производства базового масла.

Технический углерод, имеющий состав близкий к коксу, предложен также в качестве модификатора наряду с коксом. Рекомендована технология приготовления модифицированного битума с добавлением пиролитического углерода отходов резины [10]: содержание углерода составляет 10%, время сдвига – 1 ч, а температура приготовления – 150 °С. При добавлении пиролитического углерода повысилась стойкость битума к высокотемпературной деформации, однако его стойкость к низкотемпературному растрескиванию несколько снизилась.

Модификация битума техническим углеродом повышает температуру размягчения, снижает его пенетрацию и пластичность [11]. Наблюдалось улучшение реологических свойств: увеличивались комплексные модули сдвига и уменьшались фазовые углы и температурная чувствительность. Отмечается также улучшение сопротивления колееобразованию и старению битума, вязкости. Выявлено также, что добавление технического углерода негативно влияет на стабильность битума при хранении, поскольку его большая часть модифицирована твердыми частицами.

Исследована природа взаимодействий, происходящих между компонентами технического углерода и матрицей нефтяных дорожных битумов [12]. Доказано химическое взаимодействие технического углерода с матрицей битума по непредельным С=C связям. Установлено, что при модификации техническим углеродом происходит диффузия ароматических углеводородов из битумной составляющей в частицы модификаторов. В процессе модификации в битумной части формируются шестичленные циклические ароматические соединения, изменяется состав парафинонафтеновых углеводородов, образуются соединения серы, «переходящие» из частиц модификаторов в битум.

На нефтеперерабатывающих заводах при производстве нефтяного кокса накапливается большое количество отходов в виде коксовой пыли, которые не находят применения и требуют дополнительных затрат на утилизацию. Фракцию кокса с размером частиц менее 6 мм, достигающую 30% и более, предлагается использовать в качестве модифицирующей добавки для асфальтобетонных смесей. Предложены углеминеральные материалы из смеси обожженного известкового щебня и коксовой пыли для снижения эмиссии опасных углеводородов из битума [13].

Исследование свойств асфальтобетонов с использованием данных материалов показало, что наибольшую растяжимость обеспечивают смеси битума с активированной коксовой пылью.

Усталостное растрескивание серьезно повреждает асфальтобетонные покрытия. Для оценки усталостной прочности битумных вяжущих применяется линейное амплитудное сканирование согласно AASHTO TP 101-14 [14]. Свойства битума определяют износостойкость асфальтобетонных покрытий благодаря присущим битумному вяжущему вязкоупругим характеристикам. Этот подход позволяет исследовать взаимосвязь между усталостной долговечностью вяжущего и уровнем деформации асфальта с использованием методологии вязкоупругого континуального повреждения.

В работе [15] исследовано влияние нефтяного кокса на усталостное поведение битума. Битум становился значительно тверже при добавлении нефтяного кокса. Введение 5% кокса к битуму увеличивало усталостную долговечность вяжущего на 39,9%.

Установлено, что добавление технического углерода повышает сопротивление колееобразованию и усталостную прочность при средних температурах битума [16]. Для состаренного битума добавление технического углерода снижает сопротивление колееобразованию и повышает усталостную прочность. Рекомендуемое содержание и размер частиц технического углерода составляют 2% и 2,6 мкм, соответственно.

На основе вышеизложенного, модифицирование нефтяных битумов коксом является одним из методов улучшения их физико-механических свойств. Целью работы является улучшение деформационно-прочностных характеристик нефтяного дорожного битума БНД 100/130 путем его модифицирования микропорошками кокса. Впервые проведено механохимическое измельчение образцов каменноугольного и нефтяного кокса отечественного производства и установлено влияние полученных микропорошков кокса на деформационно-прочностные показатели нефтяного битума. Отличительной особенностью работы является выявление оптимального содержания микропорошков кокса 0,5 и 1 мас.%, в то время как этот показатель в ранее проведенных исследованиях варьировал от 1 до 70 мас.% при рекомендованном оптимуме 2-5 мас.%. Также в данной работе сравнительно оценено влияние добавок микропорошков кокса каменноугольного и нефтяного происхождения на устойчивость битума к усталостному разрушению.

## 2. Экспериментальная часть

Объектами исследования были образцы каменноугольного кокса месторождения Шубарколь [17] и нефтяного кокса производства ТОО «Павлодарский нефтехимический завод» (г. Павлодар) и битум марки БНД 100/130 производства ТОО «Асфальтобетон 1» (г. Алматы).

### 2.1. Методика получения микропорошков кокса

Метод получения микропорошков кокса для производства асфальтобетонов заключается в измельчении образцов путем механохимической активации. Измельчение проводили в мельнице марки GT 300 при оптимальных условиях: скорость вращения шаров 1200 об/мин, время – 40 мин, соотношение масс образцов кокса и стальных шаров составляло 1:1 для нефтяного и 1:2 для каменноугольного кокса.

### 2.2. Методика модифицирования битума порошками кокса

Модификация битума марки БНД 100/130 микродиспергированными порошками нефтяного и каменноугольного кокса в количестве 0,5 и 1 мас.% проводилась пропеллерной мешалкой при скорости вращения 750 об/мин и температуре 160 °С в течение 1 ч.

### 2.3. Методика определения деформационно-прочностных характеристик битумных вяжущих

Оценку усталостной прочности модифицированных битумных вяжущих материалов проводили согласно LAS (Linear Amplitude Sweep) по AASHTO T391-20 [18], основанной на модели непрерывного вязкоупругого разрушения (VECD – Viscoelastic Continuum Damage) по AASHTO TP101-14 [14]. Испытания выполняли на динамическом сдвиговом реометре SmartPave 102e с использованием геометрии параллельных пластин диаметром 8 мм при температуре 25 °С.

Испытание включает два основных этапа. На первом этапе – частотного сканирования (Frequency Sweep) – определяли линейно-вязкоупругие свойства образца, необходимые для расчетов по модели VECD. Измерения проводились при фиксированной деформации 0,1% в диапазоне частот от 0,2 до 30 Гц. Второй этап – амплитудное сканирование (Amplitude Sweep)

– предусматривает исследование устойчивости материала к усталостному разрушению при возрастающих уровнях деформации. Частота колебаний оставалась постоянной (10 Гц), а амплитуда деформации увеличивалась равномерно от 0,1 до 30% в течение заданного количества шагов. Таким образом, моделировались реальные условия циклической нагрузки, характерные для эксплуатации дорожных покрытий. Обработка полученных данных выполнялась с использованием программы RheoCompass™.

### 3. Результаты и их обсуждение

Каменноугольный кокс характеризуется более высокой механической прочностью по сравнению с нефтяным, поэтому для его измельчения использовали соотношение масс образцов кокса и шаров 1:2, тогда как для нефтяного кокса оно составляло 1:1. После измельчения средний диаметр частиц нефтяного кокса по объему уменьшился до 8,28 мкм, средний диаметр частиц по поверхности – до 2,4 мкм. Образцы каменноугольного кокса после измельчения имели минимальный средний диаметр частиц: по объему – 16,64 мкм, по поверхности – 7,74 мкм.

При оценке устойчивости исходного и модифицированных образцов битума к усталостному разрушению при возрастающих уровнях деформации основное внимание уделялось трем ключевым параметрам модели:  $C_0$  – начальная жесткость материала, отражающая начальную способность материала сопротивляться зарождению микрповреждений;  $C_1$  – скорость накопления повреждений, характеризующая чувствительность материала к накоплению повреждений при увеличении амплитуды деформации;  $C_2$  – форма кривой повреждения, описывающая нелинейность накопления повреждений и интенсивность разрушения на поздних стадиях усталостного процесса; а также Summed Error – суммарная ошибка аппроксимации модели. Результаты VECD-моделирования представлены в табл. 1.

На основании табличных данных можно провести сравнительный анализ влияния микропорошков каменноугольного и нефтяного кокса на усталостную прочность битума БНД 100/130.

Значения параметра  $C_0$  увеличиваются от исходного образца битума ( $C_0 = 1,713$ ) к модифицированным, достигая максимума у битума с добавкой 0,5% нефтяного микрококса ( $C_0 = 2,021$ ). Добавление микрококса резко увеличивает данный параметр, что указывает на повышение начальной жесткости материала. Это также свидетельствует об увеличении сопротивления деформации в начальной стадии нагружения, что можно интерпретировать как повышение упругих характеристик битума за счет модификации. Максимальный эффект наблюдается у битума с 0,5% нефтяного микрококса ( $C_0 = 2,021$ ), что выше исходного значения на 0,3. Это говорит о том, что даже малые концентрации нефтяного кокса создают более жесткую структуру, чем каменноугольный.

Диспергированные углеродсодержащие частицы, обладающие высокой удельной поверхностью, взаимодействуют с асфальтовыми агрегатами и полярными компонентами битума, что приводит к формированию более структурированной дисперсной системы. При достаточной степени диспергирования частицы создают пространственно распределенную сеть физико-механических контактов, способствующую перераспределению напряжений и снижению их локальной концентрации в мальтеновой фазе. Это ограничивает подвижность дисперсионной среды, увеличивает эффективную жесткость системы и повышает сопротивление зарождению микрповреждений на начальной стадии нагружения, что отражается в росте параметра  $C_0$ .

Параметр  $C_1$  характеризует скорость падения жесткости материала при увеличении интенсивности повреждений. Для большинства исследованных образцов битума  $C_1$  находится в узком диапазоне от 0,115 до 0,124. Самое высокое значение ( $C_1 = 0,143$ ) зафиксировано для битума с 0,5% нефтяного микрококса. Это свидетельству-

**Таблица 1.** Параметры VECD-моделирования исходного и модифицированного микропорошками кокса битума

Образец	$C_0$	$C_1$	$C_2$	Summed Error
Битум БНД 100/130	1,713	0,115	0,414	0,310
Битум с 1% каменноугольного микрококса	1,704	0,115	0,410	0,270
Битум с 1% нефтяного микрококса	1,892	0,122	0,407	0,319
Битум с 0,5% каменноугольного микрококса	1,938	0,124	0,408	0,344
Битум с 0,5% нефтяного микрококса	2,021	0,143	0,392	0,475

ет о том, что, несмотря на высокую начальную жесткость, данный материал может терять ее быстрее по сравнению с другими образцами при циклической нагрузке.

Значения параметра  $C_2$  для всех модифицированных образцов (0,392-0,410) немного ниже, чем у исходного битума (0,414). Небольшое снижение  $C_2$  указывает на изменение характера распределения микротрещин, делая процесс разрушения чуть более стабильным на поздних стадиях.

Наименьшая ошибка аппроксимации наблюдается для образца битума с 1% каменноугольного микрококса (0,270), а наибольшая – для битума с 0,5% нефтяного микрококса (0,475), что может быть связано с более сложным поведением модифицированного битума, не полностью описываемым текущей моделью.

Таким образом, модифицированные микропорошками кокса образцы битума демонстрируют более высокие значения начальной жесткости ( $C_0$ ), что потенциально повышает их устойчивость к деформации. Однако одновременно с этим растет коэффициент разрушения ( $C_1$ ), что говорит о снижении усталостной стойкости при длительных нагрузках. Особенно это проявляется у образца битума с 0,5% нефтяного микрококса, для которого наблюдаются наибольшая жесткость и склонность к повреждению. Оптимальный баланс между жесткостью и устойчивостью к усталостному разрушению демонстрируют образцы битума с 1% нефтяного и 0,5% каменноугольного микрококса, тогда как битум с 0,5% нефтяного микрококса может быть эффективен для условий кратковременных высоких нагрузок, но не для долговременного нагружения.

С физической точки зрения при повышенном содержании микрококса (0,5% нефтяного микрококса) формируется более жесткая дисперсная система с увеличенным числом контактов между частицами и асфальтовыми агрегатами. Это ограничивает подвижность мальтеновой фазы

и повышает модуль при малых деформациях (рост  $C_0$ ). Однако избыточное структурирование уменьшает способность битумной матрицы к вязкоупругой релаксации и перераспределению напряжений. В условиях длительного циклического нагружения это приводит к более высокой концентрации локальных напряжений и ускоренному развитию микротрещин, что отражается в увеличении коэффициента  $C_1$  и снижении усталостной стойкости.

Модификация микрококсом переводит битум в категорию более жестких вяжущих. Нефтяной кокс эффективнее повышает модуль упругости при малых дозах, в то время как каменноугольный демонстрирует наиболее предсказуемое и стабильное поведение в рамках модели VECD. Данные выводы представлены в табл. 2.

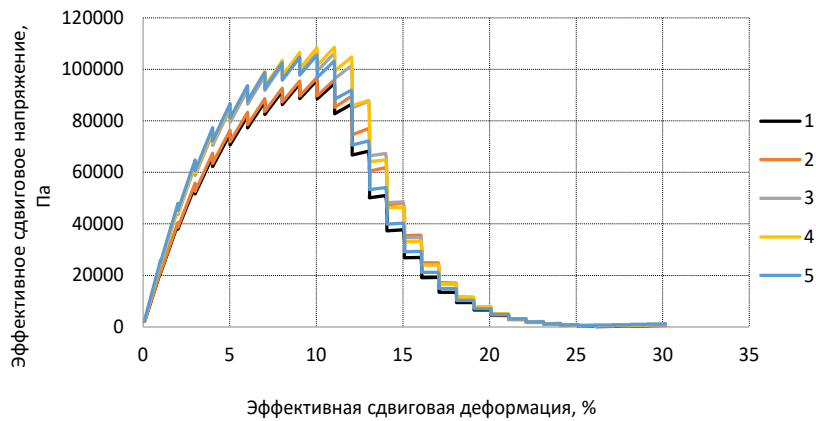
На рис. 1 представлены зависимости эффективного касательного напряжения от эффективной деформации сдвига, позволяющие наглядно сопоставить устойчивость и прочностные характеристики битумов с добавками микропорошков кокса.

В упругой зоне до 5% деформации все кривые растут практически одинаково, что указывает на сходное начальное упругое поведение. Однако битум с 0,5% нефтяного микрококса уже на этом этапе немного опережает остальные, указывая на наивысшую начальную жесткость.

По величине пика касательного напряжения (8-10% деформации) образцы можно расположить в следующий ряд: битум с 0,5% каменноугольного микрококса > битум с 1% нефтяного микрококса > битум с 0,5% нефтяного микрококса > битум с 1% каменноугольного микрококса и исходный битум. Битум с 0,5% каменноугольного микрококса демонстрирует самый высокий пик напряжения ( $\approx 115000$  Па), что свидетельствует о максимальной прочности на сдвиг. Исходный битум и битум с 1% каменноугольного микрококса имеют наименьшие значения пиков, то есть они менее жесткие.

**Таблица 2.** Выводы по оценке усталостной прочности битума в зависимости от вида кокса

Тип модификатора	Влияние на структуру	Примечание
Нефтяной микрокок	Обеспечивает наибольший прирост жесткости ( $C_0$ ), особенно при концентрации 0,5%	Обладает самой высокой ошибкой аппроксимации (0,475), что может указывать на неоднородность смеси
Каменноугольный микрокок	Дает стабильный прирост жесткости (в 2,4-2,7 раза выше исходного)	При концентрации 1% наблюдается минимальная ошибка моделирования (0,270), что указывает на наилучшую совместимость с битумом в данной пропорции



**Рис. 1.** Зависимости эффективного касательного напряжения от эффективной деформации сдвига образцов битума до и после модифицирования: 1 – битум БНД 100/130; битум с добавкой: 2 – 1 мас.% каменноугольного микрококса; 3 – 1 мас.% нефтяного микрококса; 4 – 0,5 мас.% каменноугольного микрококса; 5 – 0,5 мас.% нефтяного микрококса.

Анализ поведения образцов после пика, т.е. в зоне разрушения показал, что битум с 0,5% нефтяного микрококса резко теряет прочность, демонстрируя хрупкое разрушение, – это подтверждает высокое значение  $C_1$  и низкую усталостную прочность. Образцы битума с 1% нефтяного и 0,5% каменноугольного микрококса демонстрируют более плавный спад напряжения, что указывает на лучший баланс между жесткостью и повреждаемостью. Исходный битум и битум с 1% каменноугольного микрококса теряют напряжение наиболее плавно, что говорит о наименьшей склонности к хрупкому разрушению, несмотря на их более низкую жесткость. Сравнение образцов по данным зависимостям представлено в табл. 3.

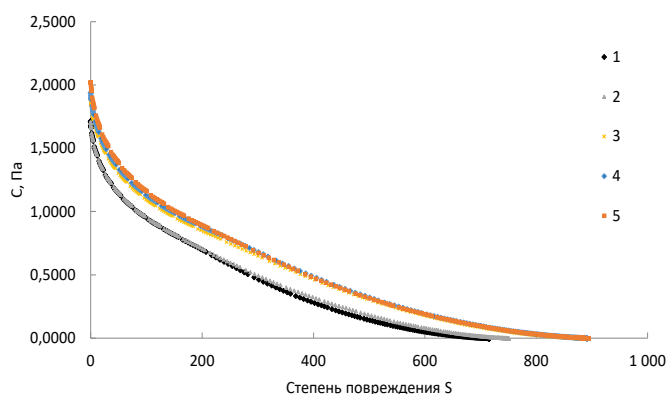
На рис. 2 изображены кривые усталостного повреждения, полученные в рамках упрощенного анализа вязкоупругого континуального повреждения (VECD). Эти кривые показывают за-

висимость параметра целостности материала  $C$  (псевдожесткость) от степени накопленного повреждения  $S$ . Параметр  $C$  отражает способность материала сопротивляться нагрузке. Значение 2,0 соответствует начальному неповрежденному состоянию, а снижение к нулю означает полную потерю несущей способности. Параметр  $S$  отражает объем накопленных микродефектов и структурных изменений в процессе испытания.

Кривые исходного битума и битума с добавкой 1% каменноугольного микрококса демонстрируют наиболее крутое падение, соответственно эти образцы быстрее теряют целостность при относительно малых значениях накопленного повреждения. При этом добавка 1% каменноугольного микрококса практически не улучшает, а в начальных зонах совпадает с кривой исходного битума, что может свидетельствовать о недостаточной адгезии или перенасыщении при данной концентрации.

**Таблица 3.** Сравнительный анализ образцов битума по зависимостям эффективного касательного напряжения от эффективной деформации сдвига

Образец	Жесткость (начало)	Прочность (пик)	Повреждаемость	Вывод
Битум БНД 100/130	Низкая	Низкая	Умеренная	Эластичный, но хрупкий
Битум с 1% каменноугольного микрококса	Низкая	Низкая	Умеренная	Эластичный, но слабый
Битум с 1% нефтяного микрококса	Средняя	Средняя	Умеренная	Оптимальный выбор
Битум с 0,5% каменноугольного микрококса	Высокая	Самая высокая	Низкая	Хороший баланс
Битум с 0,5% нефтяного микрококса	Самая высокая	Высокая	Высокая	Жесткий, но слабый



**Рис. 2.** Кривые повреждения VECD, построенные по результатам амплитудного сдвигового теста для образцов битума до и после модифицирования: 1 – битум БНД 100/130; битум с добавкой: 2 – 1 мас.% каменноугольного микрококса; 3 – 1 мас.% нефтяного микрококса; 4 – 0,5 мас.% каменноугольного микрококса; 5 – 0,5 мас.% нефтяного микрококса.

Кривые остальных модифицированных образцов битума лежат значительно выше и это означает, что при одном и том же уровне повреждения данные образцы сохраняют более высокую жесткость. Битумы с 0,5% каменноугольного и нефтяного микрококса демонстрируют наилучшие показатели: их кривые более пологие, а процесс разрушения растянут во времени. Микропорошки нефтяного кокса демонстрируют стабильно высокие результаты как при 0,5%, так и при 1%, превосходя каменноугольный микрококк в долгосрочной перспективе.

Таким образом, введение микрококса (особенно нефтяного) существенно замедляет деградацию структуры битума. Модифицированные составы обладают более высокой усталостной долговечностью. Это может быть связано с лучшим распределением частиц в объеме вяжущего без образования крупных агломератов, которые могли бы служить концентраторами напряжений. Кривые, соответствующие битуму, модифицированному нефтяным микрококсом, имеют более плавный характер снижения параметра  $C$ , что указывает на лучшую совместимость данной добавки с битумом БНД 100/130 по сравнению с каменноугольным аналогом.

При добавлении в битум микропорошков кокса меняются его внутренняя структура и способность сопротивляться микротрещинам. Кокс отличается высокой адсорбирующей способностью и удерживает на своей поверхности большее количество битума, чем известные импортные и отечественные добавки. Карбены и карбоиды в

составе кокса после термического воздействия восстанавливаются с большой скоростью и возвращаются к первоначальному состоянию. Добавление кокса переводит битум в более структурированное состояние, дорожное покрытие будет оставаться в упруго-пластичном состоянии в широком температурном диапазоне и приведет к увеличению стойкости к образованию колеи.

Микродисперсные частицы нефтяного кокса в составе асфальтобетонной смеси образуют плотную и прочную каркасную сетку, что обуславливает высокую прочность на сжатие. При высоких температурах эта сетка не разрушается и кокс в составе битума способствует созданию надмолекулярной армирующей решетки.

#### 4. Заключение

Таким образом, установлено влияние добавок микропорошков нефтяного и каменноугольного кокса на деформационно-прочностные характеристики битума БНД 100/130. Битум с 0,5 мас.% нефтяного микрококса может быть рекомендован для условий с высокими кратковременными нагрузками, но не подходит для длительных циклических нагрузок. Битум с 0,5 мас.% каменноугольного микрококса лучше сохраняет структуру при больших деформациях, но демонстрирует более низкие прочностные показатели, что делает его предпочтительным для условий эксплуатации с повышенными требованиями к эластичности. Битум с 1 мас.% нефтяного микрококса обладает оптимальным соотношением прочности и устойчивости к разрушению, что позволяет рассматривать его как наиболее перспективный вариант для устройства долговечных дорожных покрытий. Битум, модифицированный 1 мас.% микропорошком нефтяного кокса, может быть рекомендован при строительстве автодорог I и II категорий в регионах с резко континентальным климатом Казахстана. Это обеспечит повышенную сдвигоустойчивость и сопротивление колееобразованию при экстремальных летних температурах и высоких осевых нагрузках от большегрузного транспорта.

#### Вклад авторов

**Ердос Онгарбаев:** концептуализация, привлечение финансирования, администрирование проекта, написание оригинального текста, написание обзора и редактирование. **Айнур Жамболова:** формальный анализ, ресурсы. **Алия Кенжегалиева:** иссле-

дование, методология, программное обеспечение, валидация, визуализация. **Дінмұхамед Абдихан:** подготовка данных, исследование. **Әділет Қалыбеков:** подготовка данных, исследование.

### Заявление о конфликте интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки МНВО РК по проекту программно-целевого финансирования BR24992915 «Разработка технологий получения высокопрочного асфальтобетона на основе эластомерно-, полимерно-битумных вяжущих и плазмохимическая переработка жидких углеродсодержащих отходов».

### References

- [1]. M. Hashami, Y. Ongarbayev, Y. Tileuberdi, Y. Imanbayev, A. Zhambolova, et al. Integration of Coke and CNMs with Bitumen: Synthesis, Methods, and Characterization. *Nanomaterials* 15 (2025) 842. <https://doi.org/10.3390/nano15110842>.
- [2]. L. Yiqun. Application of petroleum coke in cement industry and prospect analysis. *Petroleum Processing and Petrochemicals*. 51 (2020) 1-6. <http://www.sylzyhg.com/EN/Y2020/V51/I10/1>.
- [3]. A. Alshoaibi, T. Rasheed. Transforming petroleum coke into greener and sustainable carbon nanomaterials: Synthesis, structure and applications. *Journal of Environmental Management* 393 (2025) 127002. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.127002>.
- [4]. R.L.B. Cabral, E.R.V.P. Galvão, P.B.A. Fachine, F.M.F. Galvão, J.H.O. Nascimento. A minireview on the utilization of petroleum coke as a precursor for carbon-based nanomaterials (CNMs): perspectives and potential applications. *RSC Advances* 14 (2024) 19953-19968. <https://doi.org/10.1039/D4RA01196A>.
- [5]. A. Cristina, B. Carlotto. Modification of Physicochemical Properties of Petroleum Coke with Ball Milling. Master's thesis. University of Calgary, Calgary, Canada. 2021. <http://hdl.handle.net/1880/112920>.
- [6]. Patent of Russia 2748791 (2021) Kemalov AF, Bryzgalov NI, Kemalov RA.
- [7]. Patent of Russia 2753763 (2021) Bazhenov AV, Kuzik IV.
- [8]. Patent of Russia 2769049 (2022) Bazhenov AV, Kuzik VI.
- [9]. Patent WO 2016/076804 A1 (2016). Caniaz RO, Cetintas R, Baskent E, Arca S, Yasar M.
- [10]. Z. Feng, P. Zhao, X. Li, L. Zhu. Preparation and properties of bitumen modified with waste rubber pyrolytic carbon black. *Construction and Building Materials*. 282 (2021) 122697. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122697>.
- [11]. H. Wang, G. Lu, S. Feng, X. Wen, J. Yang. Characterization of Bitumen Modified with Pyrolytic Carbon Black from Scrap Tires. *Sustainability* 11 (2019) 1631. doi:10.3390/su11061631.
- [12]. N.B. Ainabekov, N.M. Daurenbek, G.F. Sagitova. Use of carbon black as a modifier for petroleum bitumen. *Oil and gas* 4 (2024) 163-174. <https://doi.org/10.37878/2708-0080/2024-4.13>.
- [13]. A.D. Korneev, M.A. Goncharova, S.A. Andriantseva, A.V. Komarichev. Optimization of construction and technical properties of asphalt concrete using metallurgical waste. *Fundamental research* 2 (2015)1620-1625. (In Russ.).
- [14]. AASHTO Designation: TP 101-14 Standard Method of Test for Estimating Damage Tolerance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington, D.C, USA. 2014.
- [15]. N. Motamedrad. Study and characterization of bitumen. Master's Thesis to confer the academic degree of Diplom-Ingenieurin in the Master's Program Chemistry and Chemical Technology. Johannes Kepler Universität Linz. June 2023.
- [16]. K. Zhong, Z. Li, J. Fan, G. Xu, X. Huang. Effect of Carbon Black on Rutting and Fatigue Performance of Asphalt. *Materials* 14 (2021) 2383. <https://doi.org/10.3390/ma14092383>.
- [17]. Y.I. Imanbayev, Y.K. Ongarbayev, A.B. Zhambolova, Y. Tileuberdi, Y. Kanzharkan, et al. Development and study of compositions containing polymers and solid carbon materials. *Combustion and plasma chemistry* 3 (2025) 273-286. [https://doi.org/10.18321/cpc23\(3\)273-286](https://doi.org/10.18321/cpc23(3)273-286). (In Russ.).
- [18]. AASHTO T391-20 Standard Method of Test for Estimating Fatigue Resistance of Asphalt Binders Using the Linear Amplitude Sweep. American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO). Washington D.C, USA. 2021.

### Сведения об авторах

**Е.К. Онгарбаев** – зав. лабораторией нефтехимических процессов Института проблем горения, доктор химических наук, профессор, Алматы, Казахстан  
E-mail: Erdos.Ongarbaev@kaznu.edu.kz  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0418-9360>

**А.Б. Жамболова** – ведущий научный сотрудник, PhD, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан  
E-mail: zhambolova.ainur@mail.ru

**Д.Б. Әбдіхан** – PhD-докторант, Институт проблем горения, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
E-mail: dimash.abdixan02@gmail.com

**А.Р. Кенжеғалиева** – ведущий научный сотрудник, PhD, Институт проблем горения, Алматы, Казахстан  
E-mail: aliakenzik@gmail.com

**Ә.Ж. Қалыбеков** – магистр, КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан  
E-mail: Qalybekov@gmail.com

## Improving the Deformation and Strength Characteristics of Bitumen by Modifying it with Coke Micropowders

**Y.K. Ongarbayev<sup>1,2\*</sup>, A.B. Zhambolova<sup>2</sup>, A.R. Kenzhegaliyeva<sup>2</sup>, D.B. Abdikhan<sup>1,2</sup>, A.Zh. Qalybekov<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Al-Farabi Kazakh National University, Al-Farabi Ave., 71, Almaty, Kazakhstan

<sup>2</sup>Institute of Combustion Problems, Bogenbai Batyr Str., 172, Almaty, Kazakhstan

### ABSTRACT

The introduction of new technologies in the production of bitumen using modifiers based on carbon materials allows for improving their quality. One of such modifiers is coke of petroleum or coal origin. The aim of the work was to improve the deformation and strength characteristics of petroleum road bitumen BND 100/130 by modifying it with coke micropowders. In the work, mechanochemical grinding of Shubarkol field coal coke and Pavlodar Petrochemical Plant LLC petroleum coke samples was carried out and the effect of the obtained coke micropowders on the deformation and strength properties of petroleum bitumen was determined. The fatigue strength of modified bitumen binders was assessed using the linear amplitude scanning technique based on the continuous viscoelastic fracture model. Bitumen with 0.5 wt.% petroleum microcoke can be used for conditions with high short-term loads, but is not suitable for long-term cyclic loads. Bitumen with 0.5 wt.% coal microcoke retains its structure better under large deformations, but is inferior in strength and is suitable for flexible operating conditions. Bitumen with 1 wt.% petroleum microcoke offers an optimal balance of strength and fracture resistance and is most promising for long-lasting road surfaces.

**Keywords:** petroleum coke, coal coke, petroleum bitumen, micropowders, deformation-strength properties

### Кокс микроұнтақтарымен түрлендіру арқылы битумның деформациялық-беріктілік сипаттамаларын жақсарту

**Е.К. Онгарбаев<sup>1,2\*</sup>, А.Б. Жамболова<sup>2</sup>, Ә.Р. Кенжеғалиева<sup>2</sup>, Д.Б. Әбдіхан<sup>1,2</sup>, Ә.Ж. Қалыбеков<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Әл-Фараби ат. Қазақ ұлттық университеті, әл-Фараби даң., 71, Алматы, Қазақстан

<sup>2</sup>Жану проблемалары институты, Бөгенбай батыр к., 172, Алматы, Қазақстан

### АҢДАТПА

Көміртекті материалдарға негізделген түрлендіргіштерді қолдана отырып, битум өндірісінде жаңа технологияларды енгізу олардың сапасын жақсартуға мүмкіндік береді. Мұндай түрлендіргіштердің бірі – мұнай немесе тас көмір текті кокс. Жұмыстың мақсаты БНД 100/130 мұнай жол битумының деформациялық-беріктілік сипаттамаларын кокс микроұнтақтарымен түрлендіру арқылы жақсарту болды. Жұмыста Шұбаркөл кен орнының тас көмір коксы мен «Павлодар мұнай химия зауыты» ЖШС мұнай коксы үлгілерін механохимиялық ұнтақтау жүргізілді және алынған кокс микроұнтақтарының мұнай битумының деформациялық-беріктілік қасиеттеріне әсері анықталды. Түрлендірілген битум байланыстырғыштарының шаршауға қарсы беріктігі үздіксіз тұтқыр серпімді сыну моделіне негізделген сызықтық амплитудалық сканерлеу әдісін қолдана отырып бағаланды. 0,5 мас.% мұнай микрококсы бар битумды қысқа мерзімді жоғары жүктемелер жағдайларында пайдалануға болады, бірақ ұзақ мерзімді циклдік жүктемелерге жараммайды. 0,5 мас.% тас көмір микрококсы бар битум үлкен деформациялар кезінде құрылымын жақсы сақтайды, бірақ беріктігі төмен және икемді жұмыс жағдайларына жарамды. 1 мас.% мұнай микрококсы бар битум беріктік пен сынуға төзімділіктің оңтайлы тепе-теңдігін қамтамасыз етеді және ұзақ мерзімді жол жабындары үшін ең перспективалы болып табылады.

**Түйін сөздер:** мұнай коксы, тас көмір коксы, мұнай битумы, микроұнтақтар, деформациялық-беріктілік сипаттамалар