

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2024-90-6-84-90>

## МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АСФАЛЬТОБЕТОНА С БИТУМОМ, МОДИФИЦИРОВАННЫМ ГИПЕРРАЗВЕТВЛЕННЫМ ПОЛИМЕРОМ

© Алексей Валерьевич Шиверский, Александр Витальевич Кухарский, Сергей Германович Абаимов\*

Центр добычи углеводородов, Сколковский институт науки и технологий, Россия, 121205, Москва, Большой бульвар 30, стр. 1; \*e-mail: s.abaimov@skoltech.ru

*Статья поступила 24 ноября 2023 г. Поступила после доработки 20 декабря 2023 г. Принята к публикации 28 декабря 2023 г.*

Эпоксидная смола — важный модификатор при производстве полимерасфальтобетона. Добавление эпоксидных смол к битуму позволяет увеличить трещиностойкость, сдвигоустойчивость и долговременную прочность асфальтобетона. Однако производство полимерасфальтобетона дороже асфальтобетона ввиду большого объема добавки на основе эпоксидных смол. Гиперразветвленные полимеры (ГРП) с эпоксидными концевыми группами образуют при отверждении высокоразветвленную пространственную структуру, их применение в качестве активного модификатора в составе битума приводит к формированию дополнительных пространственных сетей армирования в асфальтобетоне, что позволяет при малом объеме модификатора усилить эффекты, достигнутые при использовании эпоксидных смол, а также повысить ударную вязкость асфальтобетона, влагостойкость, топливостойкость и температурную стабильность. Цель работы — экспериментальное исследование механических свойств асфальтобетона с битумом, модифицированным ГРП. Добавку на основе доступного в промышленном масштабе ГРП вносили в качестве модификатора в относительно низких долях — 3, 5 и 8 % масс. от массы битума. Определяли такие механические свойства асфальтобетона, как модуль упругости, прочность при сжатии, прочность на растяжение при расколе, сдвигоустойчивость, остаточную прочность на сжатие после малоциклового нагружения, коэффициент остаточной прочности на сжатие, а также предельное относительное сжатие. Установлено, что асфальтобетон с модифицированным битумом обладает лучшими характеристиками, чем исходный асфальтобетон, даже при низких долях модификатора. Модуль упругости и прочность на сжатие тесно взаимосвязаны и при формировании скелета архитектуры связей в битуме растут практически линейно с увеличением содержания ГРП, повышаясь соответственно на 9,0 и 17,7 % для образцов с содержанием 8 % масс. эпоксидного модификатора. При этом асфальтобетон становится более пластичен; предельное относительное сжатие увеличивается с 2,75 до 3,5 % и существенно не зависит от количества ГРП. Предел прочности на растяжение при расколе снижается по мере повышения доли эпоксидного модификатора, что ожидаемо согласно имеющимся в литературе данным. При этом пластичность асфальтобетона значительно улучшается, достигая предельной деформации 1,8 % при 5 % масс. модификатора. При этой же доле модификатора наблюдается самая высокая прочность на сдвиг — 0,48 МПа. С увеличением массовой доли эпоксидного модификатора снижается уплотнение при действии малоциклового нагружения; коэффициент остаточной прочности как отношение остаточной прочности на сжатие после малоциклового усталости к статической прочности на сжатие стремится к единице для асфальтобетона, также модифицированного 5 % масс. ГРП. Таким образом, оптимальный результат достигается при введении в битум 5 % масс. эпоксидного ГРП модификатора.

**Ключевые слова:** эпоксидный асфальтобетон; гиперразветвленный полимер; модифицированный битум; механические характеристики.

## EXPERIMENTAL STUDY OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF AN ASPHALT CONCRETE WITH A BINDER MODIFIED WITH A HYPERBRANCHED POLYMER

© Aleksei V. Shiverskii, Aleksandr V. Kukharskii, Sergey G. Abaimov\*

Center for Petroleum Science and Engineering, Skolkovo Institute of Science and Technology, 30, str. 1, Bolshoy Boulevard, Moscow, 121205, Russia; \*e-mail: s.abaimov@skoltech.ru

*Received November 24, 2023. Revised December 20, 2023. Accepted December 28, 2023.*

An epoxy resin is an important modifier in the production of polymer asphalt concretes; adding epoxy resins to bitumen increases the crack resistance, shear resistance, and the long-term strength of the final product. However, polymer asphalt concrete production is chargeable compared to that of traditional asphalt concrete due to high fraction of epoxy introduced. Hyperbranched polymers (HBP) with epoxy end groups form a highly branched spatial network at curing, their application as an active modifier in bitumen composition leads to the formation of additional spatial reinforcement architectures in asphalt concrete, which allows to strengthen the effects achieved by epoxy resins, as well as to increase impact toughness, moisture resistance, fuel resistance, and temperature stability of asphalt concrete at low fraction of the modifier. We present an experimental study of the mechanical properties of asphalt concrete with a bitumen modified by a hyperbranched polymer. The bitumen was modified with relatively low fractions (3, 5, and 8 wt.%) of the hyperbranched epoxy resin. The mechanical properties of asphalt concrete were characterized with the modulus of elasticity, compressive strength, tensile strength at break, shear strength, residual compressive strength after low-cycle loading, coefficient of residual compressive strength, and the ultimate percent compression. The results demonstrated that asphalt concrete with modified bitumen has improved characteristics compared to the original asphalt concrete, even at low fractions of the modifier. The elastic modulus and compressive strength are closely bound and, during the formation of the architecture of links in bitumen, increase almost linearly with an increase of hyperbranched modifier fraction, achieving an improvement of 9.0 and 17.7%, respectively, for samples with 8 wt.% of epoxy modifier. At the same time, asphalt concrete becomes more ductile; the ultimate percent compression increases from 2.75 to 3.5% and does not depend significantly on the amount of hyperbranched polymer. The tensile strength at break decreases as the fraction of an epoxy modifier increases, which is consistent with the literature data. However, the ductility of asphalt concrete is significantly improved, reaching the ultimate percent deformation of 1.8% at 5 wt.% of the modifier. At the same fraction of the modifier, the highest shear strength of 0.48 MPa is achieved. With an increase in the mass fraction of the epoxy modifier, the compaction under low-cycle loading decreases; the residual strength coefficient, as the ratio of the residual compressive strength after low-cycle fatigue to the static compressive strength, tends to unity for asphalt concrete, also modified with 5 wt.% of hyperbranched polymer. Thus, the best result, as a compromise of all factors under study, is achieved when 5 wt.% of epoxy hyperbranched modifier is introduced into the bitumen.

**Keywords:** epoxy asphalt concrete; hyperbranched polymer; modified bitumen; mechanical characteristics.

## Введение

Повышение интенсивности движения, нагрузок на современные дороги, а также затрат на их содержание требует разработки долговечных дорожных покрытий. Модификация битума полимерами позволяет исключить типичные недостатки асфальтобетона, такие как колейность, низкотемпературное растрескивание и пр. Увеличение срока службы дорожных покрытий приводит к существенному экономическому преимуществу [1]. Поэтому разработка новых износостойких дорожных покрытий является актуальной задачей [2].

Исследования показали, что модификация битума эпоксидными смолами создает устойчивую трехмерную скелетную сшивающую структуру, существенно изменяющую его свойства [1, 3 – 5]. Приготовленный таким образом асфальтобетон демонстрирует превосходную температурную стабильность, сопротивление скольжению, топливостойкость, долговечность и длительную влагостойкость даже в суровых климатических условиях и при нагрузках [2, 6 – 10]. Однако применение полимерасфальтобетонов ограничено их стоимостью ввиду необходимости внесения большой доли добавок на основе эпоксидных смол.

Гиперразветвленные полимеры (ГРП) имеют сильно разветвленную структуру, множество

функциональных концевых групп и низкую вязкость [11]. Их применяют при модификации терморезактивных смол для улучшения их механических свойств [12], в том числе прочности на растяжение и ударной вязкости [13 – 16]. Ранее было показано, что механические свойства эпоксидного асфальтобетона, в частности относительное предельное удлинение, можно улучшить путем введения ГРП в асфальтобетонную смесь. Это создает плотную трехмерную (3D) ветвящуюся архитектуру и позволяет гомогенизировать структуру асфальтобетона [17, 18], что особенно важно для применения при низких температурах, когда приобретенная хрупкость значительно ухудшает характеристики асфальтобетона. В [17, 18] отмечено, что добавление ГРП образует резиноподобную сетку, которая при незначительном ухудшении прочности на растяжение значительно повышает трещиностойкость и относительное предельное удлинение, позволяя асфальтобетону противостоять более сильным деформациям. Однако такую картину авторы наблюдали для асфальтобетона с высоким содержанием эпоксидной смолы, применение которого лимитировано его стоимостью и хрупкостью.

Цель данной работы — исследование возможности сокращения расходов на получение асфальтобетона путем внесения в асфальто-

**Таблица 1.** Свойства битума и эпоксидной добавки**Table 1.** Manufacturer's properties of bitumen and epoxy

Материал	Свойства	Значение
БНД 60/90 (ГОСТ 22245–90)	Температура размягчения, °С	47
	Пластичность при 25 °С	≥55
	Температура воспламенения, °С	230
Эпоксидная смола SM601Rx75	Вязкость, МПа · с	8000 – 15000
Отвердитель ITAMID B70X	Вязкость при 25 °С, МПа · с	800 – 1500
	Плотность при 20 °С, г/см <sup>3</sup>	0,939

**Таблица 2.** Компоненты асфальтобетонных смесей, % масс.**Table 2.** Asphalt concrete mixtures, %

Материал	Размер сита, мм	Е0	Е3	Е5	Е8
Щебень М-1400 (ГОСТ 8267–93)	15		35		
	10		15		
	7,5		10		
	5		15		
	3		15		
Песок М-800 (ГОСТ 8736 – 2014)	0,63		15		
Минеральный порошок М-400 (ГОСТ 8267–93)	0,315		5		
Битум	—	5	4,85	4,75	4,6
Эпоксидная добавка	—	0	0,15	0,25	0,4

бетонную смесь небольших количеств ГРП. Исследовали механические свойства асфальтобетона, полученного модификацией битума гиперразветвленной эпоксидной смолой, вносимой в относительно низких долях. В целях получения достоверных результатов размер образцов [19] и методику исследований [20] использовали в соответствии с действующими российскими стандартами.

## Материалы и методы исследования

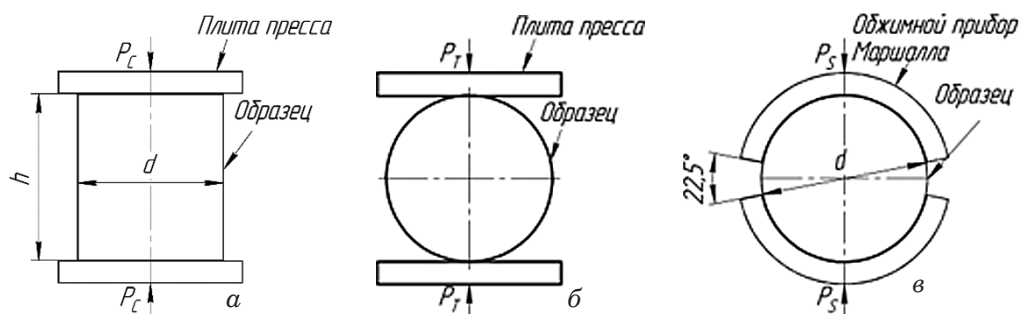
Базовый материал для образцов — битум марки БНД 60/90 («Роснефть», Россия) (табл. 1). Для модификации битума выбирали эпоксидную смолу SM601Rx75 («НОРТЕКС», Россия) и отвердитель ITAMID B70X (Chemicals Coatings, Россия) (см. табл. 1). Выбор эпоксидной добавки обусловлен ее экономической эффективностью и доступностью на рынке в промышленных масштабах. В качестве минеральных заполнителей для изготовления асфальтобетона использовали гранитный щебень, речной песок и гранитный минеральный порошок производства «Неруд-Строй-М» (Россия) (табл. 2).

Было разработано четыре вида асфальтобетонных смесей (Е0, Е3, Е5, Е8) с учетом рекомендаций ГОСТ 9128–2013 (см. табл. 2). Для сушки минеральных наполнителей и поддержания фиксированной температуры использовали

сушильный шкаф SNOL 200/200 (SnolTherm, Литва). Смеситель ЛС-АБ-10 (Новое Дело, Россия) применяли для изготовления асфальтобетонных смесей.

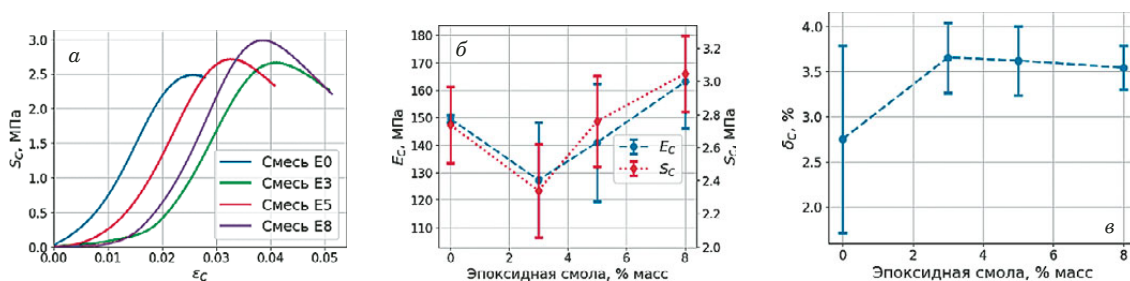
Подготовленную асфальтобетонную смесь загружали в цилиндрическую форму с внутренним диаметром  $d = 71,4$  мм и уплотняли прессом (ТПК ВНИИР, Россия) при давлении  $40 \pm \pm 0,5$  МПа. Учитывая влияние времени полимеризации эпоксидных материалов на механические характеристики [21, 22], все образцы выдерживали в течение одинакового времени перед проведением испытаний. После пяти дней отверждения асфальтобетона при температуре 25 °С проводили механические испытания согласно ГОСТ 12801 на машине INSTRON 5969 (Instron, США). Определяли модуль упругости  $E_C$ , прочность на сжатие  $S_C$ , прочность на растяжение при расколе  $S_T$ , прочность на сдвиг  $S_S$ , остаточную прочность на сжатие после малоциклового усталости  $S_P$ , коэффициент остаточной прочности на сжатие  $k_P$ , а также относительные предельные сжатия  $\delta_C$  и  $\delta_T$ .

Для испытания на прочность при сжатии и на остаточную прочность при сжатии после малоциклового усталости [23 – 24] образцы термостабилизировали при температуре 50 °С в течение 120 мин. После этого при скоростях сжатия 3 и 50 мм/мин соответственно их испытывали по схе-



**Рис. 1.** Схемы приложения нагрузки при испытаниях на сжатие (а), на растяжение при расколе (б), на сдвигустойчивость (в)

**Fig. 1.** Loading schemes for (a) compression test, (b) tensile test at break, (c) shear test



**Рис. 2.** Результаты испытаний асфальтобетонных смесей на сжатие: а — типичные диаграммы деформирования смесей E0 – E8; б — зависимость модуля упругости и прочности на сжатие от содержания ГРП; в — зависимость относительного предельного сжатия от содержания ГРП

**Fig. 2.** Results of the compressive test of asphalt concrete mixtures: (a) typical compressive loading diagrams, (b) dependences of the compressive strength and elasticity modulus, as well as (c) ultimate percent compression on the HBP content

ме, представленной на рис. 1, а. Для определения предела прочности на растяжение при расколе образцы термостабилизировали при температуре 0 °С в течение 120 мин. Затем при скорости движения плиты пресса 50 мм/мин проводили сжатие согласно схеме на рис. 1, б. Перед оценкой сдвигустойчивости образцы также были термостабилизированы при температуре 50 °С в течение 120 мин. Сжатие осуществляли с использованием устройства Маршала согласно схеме нагрузки, показанной на рис. 1, в.

### Результаты и их обсуждение

Для каждого типа асфальтобетонной смеси было изготовлено по пятнадцать образцов: шесть образцов для испытания на сдвигустойчивость

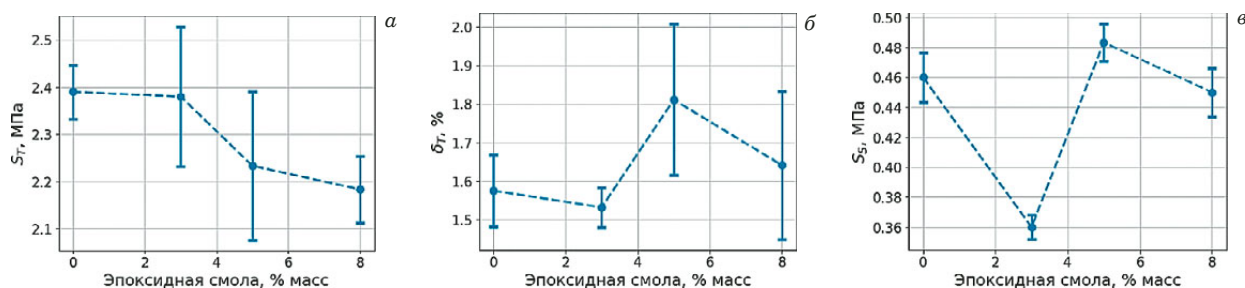
и по три образца для других испытаний. Всего получено и исследовано 60 образцов асфальтобетона. Результаты испытаний представлены в табл. 3.

На рис. 2, а показаны типичные диаграммы деформирования, полученные при испытании на сжатие, а на рис. 2, б — усредненные результаты модуля упругости и прочности на сжатие. Видно, что модуль упругости и прочность на сжатие асфальтобетона тесно взаимосвязаны. При низких долях ГРП эффект от его добавления отрицательный, вероятно, из-за невозможности формирования полноценного скелета архитектуры связей в битуме. При более высоком содержании ГРП характеристики образцов стабилизируются, обеспечивая практически линейное улучшение механических свойств с ростом содержания ГРП.

**Таблица 3.** Механические свойства асфальтобетонных смесей

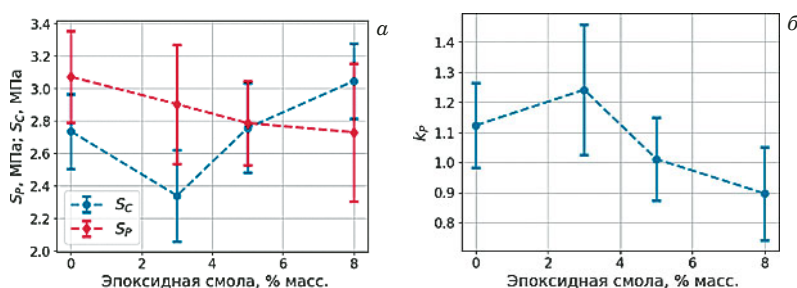
**Table 3.** Mechanical properties of asphalt concrete mixtures

Смесь	$E_C$ , МПа	$S_C$ , МПа	$\delta_C$ , %	$S_T$ , МПа	$\delta_T$ , %	$S_S$ , МПа	$S_P$ , МПа	$k_P$
E0	149,54 ± 1,33	2,74 ± 0,23	2,75 ± 1,04	2,39 ± 0,06	1,57 ± 0,09	0,46 ± 0,02	3,07 ± 0,28	1,12 ± 0,14
E3	127,26 ± 20,85	2,34 ± 0,28	3,66 ± 0,39	2,38 ± 0,15	1,53 ± 0,05	0,36 ± 0,01	2,90 ± 0,37	1,24 ± 0,22
E5	140,89 ± 21,47	2,76 ± 0,28	3,62 ± 0,38	2,23 ± 0,16	1,81 ± 0,20	0,48 ± 0,01	2,79 ± 0,26	1,01 ± 0,14
E8	163,02 ± 16,90	3,05 ± 0,23	3,54 ± 0,24	2,18 ± 0,07	1,64 ± 0,20	0,45 ± 0,02	2,73 ± 0,42	0,90 ± 0,16



**Рис. 3.** Зависимость прочности на растяжение при расколе (а), относительного предельного сжатия при расколе (б), сдвигоустойчивости (в) от содержания ГРП

**Fig. 3.** Dependences of the tensile strength at break (a), ultimate percent compression in indirect tension test (b), and shear strength (c) on the HBP content



**Рис. 4.** Результаты испытаний на сжатие асфальтобетонных смесей: а — изменение статической и циклической прочности; б — коэффициент остаточной прочности на сжатие в зависимости от содержания ГРП

**Fig. 4.** Results of compressive tests of asphalt concrete mixtures: (a) measurements of the compressive static strength and residual strength, (b) dependence of the residual compressive strength coefficient on the HBP content

При этом наиболее высокие значения модуля упругости и прочности при сжатии достигнуты для образцов с содержанием 8 % масс. эпоксиidного модификатора. В частности, модуль упругости и прочность на сжатие повысились на 9,0 и 17,7 % соответственно (рис. 2, б).

На рис. 2, в показано влияние ГРП на предельную деформацию асфальтобетона при сжатии. После введения ГРП асфальтобетон становится более пластичен, даже при малых добавках. Деформация асфальтобетона увеличивается с 2,75 до 3,5 % и существенно не зависит от количества ГРП.

Из результатов испытания на растяжение при расколе видно, что предел прочности асфальтобетона снижается по мере увеличения доли эпоксиidного модификатора (рис. 3, а), как и было показано в [17, 18]. Этот эффект может быть связан с образованием резиноподобной сети ГРП, приводящей к более высоким значениям деформации образцов. Пластичность асфальтобетона значительно улучшается, достигая предельной деформации 1,8 % при 5 % масс. модификатора. При этом из-за сложного напряженно-деформированного состояния при нагружении перпендикулярно оси цилиндра значения предельной деформации растяжения при расколе сложно определить экспериментально, но можно

аппроксимировать как пропорциональные значениям деформации при сжатии — через перемещение траверсы испытательной машины (рис. 3, б).

На рис. 3, в показаны результаты испытания на сдвигоустойчивость. При низком содержании ГРП наблюдается ухудшение свойств сдвигоустойчивости асфальтобетона из-за не полностью сформированной полимерной сети. С повышением доли ГРП прочность на сдвиг улучшается. Самая высокая прочность на сдвиг 0,48 МПа достигается для асфальтобетона, модифицированного 5 % масс. ГРП.

Данные испытаний на остаточную прочность на сжатие после малоциклового усталости представлены на рис. 4. Прочность на сжатие (рис. 4, а) после циклической нагрузки (красная кривая) лежит выше статической прочности на сжатие (синяя кривая). Это свидетельствует о процессах уплотнения асфальтобетона под нагрузкой, связанных с явлениями колейности и другими пластическими деформациями дорожного покрытия в эксплуатации.

С увеличением массовой доли эпоксиidного модификатора значения  $S_C$  и  $S_P$  сближаются, что свидетельствует о снижении роли уплотнения. Следовательно, прочность асфальтобетона с высоким содержанием ГРП практически

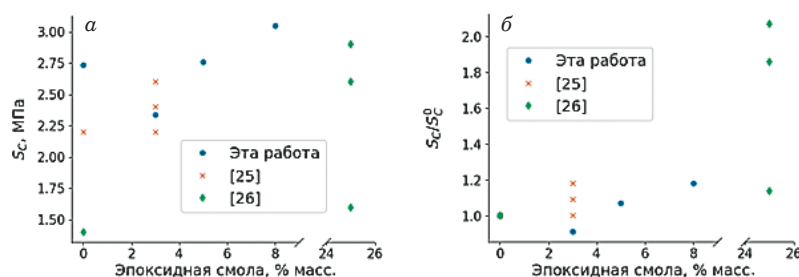


Рис. 5. Результаты определения прочности на сжатие: *a* и *б* — абсолютные и относительные значения

Fig. 5. Comparison of the compressive strength values: (a) absolute values (b) relative values

постоянна на всем сроке эксплуатации и мало зависит от уплотнения при нагружении. Этот результат подтверждает и коэффициент остаточной прочности, стремящийся к единице для асфальтобетона, модифицированного 5 % масс. ГРП (см. рис. 4, б).

Можем сделать вывод, что введение ГРП в асфальтобетон дает положительный эффект за счет образования резиноподобного армирующего полимерного каркаса в битуме и приводит к улучшению механических характеристик образцов. Важно, что характеристики улучшаются при гораздо меньших долях модификатора, чем используемых в полимерных асфальтобетонах [25, 26]. В табл. 4 и на рис. 5 для сравнения приведены полученные результаты, а также данные из литературных источников.

Относительная прочность на сжатие  $S_C/S_C^0$  — отношение измеренной прочности на сжатие  $S_C$  к прочности на сжатие базового асфальтобетона. На рис. 5 показано, что асфальтобетон с добавкой 3 % масс. ГРП по этим параметрам превосходит асфальтобетон, модифицированный 25 % масс. эпоксидной смолы, при одинаковой продолжительности твердения. Более того, полу-

ченные результаты превосходят или сравнимы с данными работы [25], что позволяет предположить, что правильный выбор эпоксидного компонента может в разы повысить механические характеристики асфальтобетона.

Из данных авторов известно, что увеличение времени твердения образцов перед механическими испытаниями или перед вводом дороги в эксплуатацию приводит к повышению механических свойств асфальтобетона почти в два раза. Данное утверждение будет рассмотрено в наших будущих исследованиях асфальтобетонов, модифицированных ГРП.

## Заключение

Исследована возможность замены высоких долей эпоксидных смол в полимерасфальтобетонах на относительно низкие доли гиперразветвленных полимеров.

Результаты испытаний асфальтобетона показали, что модификация битума эпоксидным ГРП повышает прочность асфальтобетона на сжатие и сдвиг за счет образования взаимосвязанного разветвленного полимерного каркаса связей.

Таблица 4. Сравнение полученных механических свойств асфальтобетонных смесей с известными из литературных данных

Table 4. Mechanical properties of different asphalt mixtures as compared to available literature data

Битум и его модификаторы	Отверждение, дней	$S_C$ , МПа	$S_C/S_C^0$	Источник данных
БНД 60/90	5	$2,03 \pm 0,07$	1	Работа авторов статьи
1-1 БНД 60/90 + 3 % ГРП		$1,84 \pm 0,22$	0,91	
1-1 БНД 60/90 + 5 % ГРП		$2,17 \pm 0,22$	1,07	
1-1 БНД 60/90 + 8 % ГРП		$2,39 \pm 0,18$	1,18	
БНД 70/100	Нет данных	2,2	1	[25]
1-1 БНД 70/100 + 3 % BERO + AA		2,2	1	
1-1 БНД 70/100 + 3 % BERO + MA		2,6	1,18	
1-1 БНД 70/100 + 3 % BERO + PEPA		2,4	1,09	
БНД 60/90	7, 14, 28	1,4	1	[26]
1-4 БНД 60/90 + 25 % CHS-EPOXY 525	7	1,6	1,14	
1-4 БНД 60/90 + CHS-EPOXY 525	14	2,6	1,86	
1-4 БНД 60/90 + CHS-EPOXY 525	28	2,9	2,07	

Причем, после добавления в битум модификатора ГРП наблюдалось, как и в работах [17, 18], снижение прочности на растяжение при расколе за счет образования более слабых пластических связей. Одновременно увеличивалась предельная деформация, достигая максимума при 5 % масс. ГРП модификатора. Данная концентрация рекомендована для применения в асфальтобетоне, эксплуатируемом при низких температурах. Механические характеристики асфальтобетона улучшаются при добавлении модификатора за счет повышения стабильности материала (снижения неупругих деформаций и связанной с ними колейности). Такая стабильность достигается при доле ГРП, равной 5 % масс.

### Благодарности

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда и г. Москвы № 22-23-20170, <https://rscf.ru/project/22-23-20170>.

Авторы выражают благодарность Ивану Сергеичеву и Степану Коневу, а также Лаборатории механических испытаний Центра технологий материалов Сколковского института науки и технологий за помощь в проведении испытаний.

### Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет известных конкурирующих финансовых интересов или личных отношений, которые могли бы повлиять на работу, представленную в этой статье.

### ЛИТЕРАТУРА (REFERENCES)

1. **Yu J., Cong P., Wu S.** Laboratory investigation of the properties of asphalt modified with epoxy resin / *J. Appl. Polym. Sci.* 2009. Vol. 113. P. 3557 – 3563. DOI: 10.1002/app.30324
2. **Wang D., Zhang F., Huang K., Zhang L.** Study on preparation and performance of advanced nano-modified epoxy asphalt / *J. Appl. Polym. Sci.* 2023. Vol. 140. DOI: 10.1002/app.53688
3. **Yoshida S.** Quantitative evaluation of an epoxy resin dispersion by infrared spectroscopy / *Polym. J.* 2014. Vol. 46. P. 430 – 434. DOI: 10.1038/pj.2014.15
4. **Apostolidis P., Liu X., Erkens S., Scarpas A.** Evaluation of epoxy modification in bitumen / *Constr. Build. Mater.* 2019. Vol. 208. P. 361 – 368. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.013
5. **Cuadri A. A., Delgado-Sánchez C., Navarro F. J., Partal P.** Short- and long-term epoxy modification of bitumen: modification kinetics, rheological properties, and microstructure / *Polymers (Basel)* 2020. Vol. 12. N 508. DOI: 10.3390/polym12030508
6. **Apostolidis P., Liu X., Marocho P., et al.** Evaluation of epoxy modification in asphalt mastic / *Mater. Struct.* 2020. Vol. 53. N 120. DOI: 10.1617/s11527-020-01494-9
7. **Zhang F., Huang W., Zhang L., et al.** Preparation and properties evaluation of shape memory epoxy asphalt composites with high toughness and damping / *J. Appl. Polym. Sci.* 2022. Vol. 139. DOI: 10.1002/app.53117
8. **Zhou W., Yi J., Pei Z., et al.** Preliminary design of recyclable epoxy asphalt: Regeneration feasibility analysis and environmental impact assessment / *J. Appl. Polym. Sci.* 2022. Vol. 139. DOI: 10.1002/app.52349
9. **Fan Y., Wu Y., Chen H., et al.** Performance evaluation and structure optimization of low-emission mixed epoxy asphalt pavement / *Materials*. 2022. Vol. 15. N 6472. DOI: 10.3390/ma15186472
10. **Cong P., Chen S., Yu J.** Investigation of the properties of epoxy resin-modified asphalt mixtures for application to orthotropic bridge decks / *J. Appl. Polym. Sci.* 2011. Vol. 121. P. 2310 – 2316. DOI: 10.1002/app.33948
11. **Zavareh S., Vahdat G.** Toughening of brittle epoxy using bitumen as a new modifier / *Journal of Reinforced Plastics and Composites*. 2012. Vol. 31. P. 247 – 258. DOI: 10.1177/0731684412437266
12. **Boogh L., Pettersson B., Månson J.-A. E.** Dendritic hyperbranched polymers as tougheners for epoxy resins / *Polymer (Guildf)* 1999. Vol. 40. P. 2249 – 2261. DOI: 10.1016/S0032-3861(98)00464-9
13. **Ratna D.** Toughened FRP composites reinforced with glass and carbon fiber / *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 2008. Vol. 39. P. 462 – 469. DOI: 10.1016/j.compositesa.2007.12.005
14. **Qin H., Mather P. T., Baek J.-B., Tan L.-S.** Modification of bisphenol-A based bismaleimide resin (BPA-BMI) with an allyl-terminated hyperbranched polyimide (AT-PAEKI) / *Polymer (Guildf)*. 2006. Vol. 47. P. 2813 – 2821. DOI: 10.1016/j.polymer.2006.02.062
15. **Xu P., Yang F.** Modification of phenolic resin composites by hyperbranched polyborate and polybenzoxazine / *Polym. Compos.* 2012. Vol. 33. P. 1960 – 1968. DOI: 10.1002/pc.22336
16. **Xu P., Cong P., Gao Z., et al.** High performance modification of hyperbranched polyborate on diglycidyl ether of bisphenol-A resin / *Polym. Compos.* 2015. Vol. 36. P. 424 – 432. DOI: 10.1002/pc.22956
17. **Xu P., Cong P., Li D., Zhu X.** Toughness modification of hyperbranched polyester on epoxy asphalt / *Constr. Build. Mater.* 2016. Vol. 122. P. 473 – 477. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.06.087
18. **Xu P., Zhu X., Cong P., et al.** Modification of alkyl group terminated hyperbranched polyester on paving epoxy asphalt / *Constr. Build. Mater.* 2018. Vol. 165. P. 295 – 302. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.182
19. **Botvina L. R., Shuvalov A. N., Tyutin M. R., et al.** Effect of the sample size on the mechanical and acoustic characteristics of concrete / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2019. Vol. 85. N 10. P. 55 – 63 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2019-85-10-55-63
20. **Golubkova E. V., Komina I. G., Chikantseva E. I.** Validation and verification of measurement methods: opinions and views / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 2(II). P. 77 – 80 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-2-II-77-80
21. **Drachev K. A., Kazarbin A. V., Rimlyand V. I.** Study of changes in the mechanical and acoustic properties of epoxy resins under long-time polymerization / *Industr. Lab., Mater. Diagn.* 2023. Vol. 89. N 4. P. 63 – 70 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2023-89-4-63-70
22. **Starokadomsky D. L., Reshetnyk M. N.** Study of restoration epoxy composites with initial and water-cured fillers / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 87. N 8. P. 34 – 41 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-8-34-41
23. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O.** Study of the properties of materials under complicated conditions of low cycle deformation / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2021. Vol. 87. N 7. P. 49 – 58 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2021-87-7-49-58
24. **Makhutov N. A., Gadenin M. M., Cherniavsky O. F., Cherniavsky A. O.** Mechanical properties of materials in calculations of low cycle deformation of structures / *Industr. Lab. Mater. Diagn.* 2022. Vol. 88. N 6. P. 52 – 59 [in Russian]. DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-6-52-59
25. **Starchevskyy V. L., Hrynychuk Yu. M., Matcipura P. A., Reutskyy V. V.** Physical and mechanical properties of asphalt concrete obtained from bitumen modified by epoxide of vegetable origin / *Chemistry, Technology and Application of Substances*. 2021. Vol. 4. P. 105 – 108. DOI: 10.23939/ctas2021.01.105
26. **Vyrozhemskiy V., Kopynets I., Kischynskiy S., Bidnenko N.** Epoxy asphalt concrete is a perspective material for the construction of roads / *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 2017. Vol. 236. N 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/236/1/012022