УДК 625. 85

Ю.Г. БОРИСЕНКО, канд. техн. наук (borisenko2005@yandex.ru), О.А. БОРИСЕНКО, канд. техн. наук,
С.О. КАЗАРЯН, инженер (sam23otr@mail.ru), М.Ч. ИОНОВ, канд. эконом. наук
Северо-Кавказский федеральный университет (355028, г. Ставрополь, пр. Кулакова, 2)

# Влияние высокодисперсных отсевов дробления керамзита на структуру и свойства ЩМА

Проведен анализ влияния различных высокопористых минеральных наполнителей на свойства и сорбционную активность асфальтовяжущих и асфальтобетонов на их основе. Выявлена эффективность применения высокодисперсных отсевов дробления керамзита в качестве стабилизирующей добавки щебеночно-мастичного асфальтобетона (ЩМА), позволяющей существенно снизить показатель стекаемости битума в щебеночно-мастичную асфальтобетонную смесь (ЩМАС), повысить прочностные свойства, теплостойкость и водостойкость материала. В результате лабораторных исследований установлено повышение трещиностойкости, морозостойкости и сдвигоустойчивости ЩМА, модифицированных высокодисперсными отсевами дробления керамзита, за счет изменения структуры асфальтовяжущего и снижения температурных напряжений в материале покрытия. Показано, что включение в состав ЩМАС добавок из порошковых пористых материалов повышает структурно-механические характеристики ЩМА. Экспериментально установлено, что модификация щебеночно-мастичных асфальтобетонов высокодисперсными пористыми материалами позволяет существенно повысить долговечность ЩМА.

**Ключевые слова:** щебеночно-мастичный асфальтобетон, высокодисперсные отсевы дробления керамзита, стабилизирующая добавка, дорожные покрытия.

Yu.G. BORISENKO, Candidate of Sciences (Engineering) (borisenko2005@yandex.ru), O.A. BORISENKO, Candidate of Sciences (Engineering),
S.O. KAZARYAN, Engineer (sam23otr@mail.ru), M.Ch. IONOV, Candidate of Sciences (Economics)
North-Caucasus Federal University (2, Kulakova Street, 355028, Stavropol, Russian Federation)

## Influence of Fine-Disperse Screenings of Expanded Clay Crushing on Structure and Properties of Stone Mastic Asphalt Concrete

The influence of various highly porous mineral fillers on the properties and sorption activity of asphaltic binders and asphalt concretes based on them was analyzed. The application of fine-disperse screenings of expanded clay crushing as a stabilizing additive to the stone mastic asphalt (SMA) makes it possible to significantly reduce the rate of bitumen draining into the stone mastic asphalt concrete mix (SMAM), improve mechanical properties, heat resistance, and water resistance of the material. As a result, laboratory studies have established the improvement of crack resistance, frost resistance and shear stability of SMA modified with high-disperse screenings of expanded clay crushing due to the change in the asphalt binder structure and reduction of temperature stresses in the coating material. It is shown that the inclusion of powder porous material additives into the composition of SMAM improves the structural and mechanical properties of SMA. It was established experimentally that the modification of stone mastic asphalt concretes with finely dispersed porous materials can significantly improve the durability of SMA.

**Keywords:** stone mastic asphalt, highly dispersed screenings, expanded clay crushing, stabilizing additive, road surfacing.

Щебеночно-мастичный асфальтобетон (ЩМА) в настоящее время является одним из наиболее перспективных материалов для устройства дорожных покрытий. Отличительными особенностями ЩМА от других типов асфальтобетонов являются повышенное содержание битума и крупного щебня. Крупный щебень образует жесткую каркасную структуру материала, обеспечивающую эффективную передачу нагрузок на нижележащие слои дорожной одежды. ЩМА менее подвержен деформациям в продольном и поперечном направлениях, а дорожное покрытие из этого материала имеет повышенную прочность и сдвигоустойчивость. Наличие высокого содержания вяжущего в смеси обеспечивает улучшенные водостойкость, трещиностойкость и долговечность. Изготовление и транспортировку ЩМА производят при повышенной температуре (160–170°С), а укладку – при 145–150°С. В таких условиях повышенное содержание битума обусловливает неизбежное расслоение смеси и стекание битума, что предопределяет применение стабилизирующих добавок в составе ЩМАС. Наиболее распространенными для изготовления стабилизаторов являются материалы на основе целлюлозы, асбеста, резины, полимеров. Одними из самых востребованных являются добавки на основе целлюлозы (около 90% всех применяемых добавок). Их выпускают как в виде волокон (TECHOCEL), так и в виде гранул (Viatop, Genicel, Topcel). Также при производстве ЩМА используют: Хризотоп – гранулы на основе асбеста; Unirem – резиновый модификатор; Dolanit – состоящий из высокопрочных акриловых волокон. Высокая стоимость применяемых добавок актуализирует поиск недорогих эффективных стабилизаторов для снижения стекаемости ЩМАС. Одним из перспективных решений этой проблемы является применение пористых высокодисперсных материалов, использование их может не только положительно повлиять на оптимизацию технологических процессов приготовления и укладки, но и позволит оказывать направленное воздействие на регулирование свойств ЩМА, что обусловливается следующим.

В последнее время появился ряд работ, посвященных применению пористых высокодисперсных порошковых материалов в составах асфальтобетонов. В работах [1, 2] проанализировано влияние ряда пористых наполнителей на свойства асфальтовяжущего. Выявлено определяющее влияние пористости минеральных порошков на их структурирующую способность относительно битума. Доказана эффективность использования пористых минеральных порошков с высоким содержанием кислотных центров для создания плотных структур асфальтобетонов. Л.Е. Свинтицких, А.А. Клюсовым предложено битумное вяжущее на вспученном вермикулите [3]. Полученные результаты указывают на повышение тепло- и трещиностойкости асфальтобетонов на вяжущем, модифицированном вермикулитом. Исследования показали, что введение вспученного вермикулита в битум позволяет получить вяжущее с расширенным интервалом пластичности. С.С. Иноземцев и Е.В. Королев исследовали процессы структурообразования асфальтобетона с применением как плотных, так и пористых наполнителей [4]. Наиболее активное взаимодействие с битумом отмечено у диатомита (пористого наполнителя); выявлено повышение термостабильности

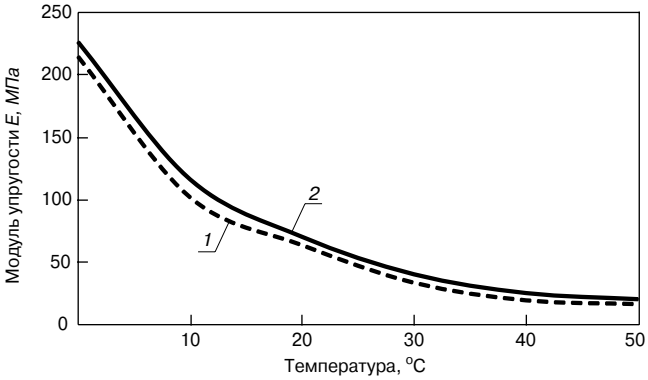


**Рис. 1.** Зависимость модулей упругости (Е, МПа) исследуемых ЩМА-15 от температуры: *1* – ЩМА-15 (Viatop-66); *2* – ЩМА-15 (отсевы дробления керамзита)

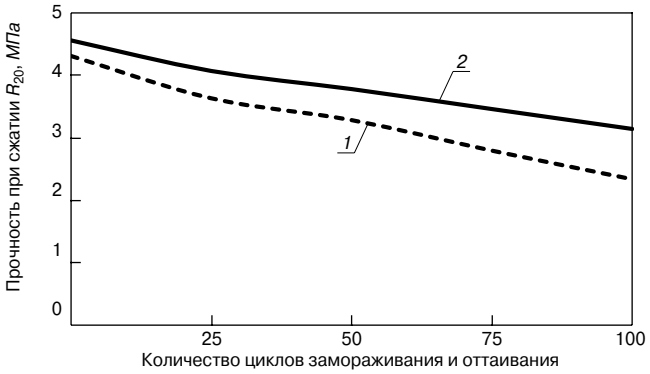


**Рис. 2.** Зависимость предела прочности при сжатии при 20°С ($R_{20}$, МПа) от количества циклов замораживания и оттаивания: *1* – ЩМА-15 (Viatop-66); *2* – ЩМА-15 (отсевы дробления керамзита)

**Таблица 1**

| Показатели битума | Асфальтовяжущее ЩМАС | |
|---|---|---|
| | Битум БНД 60/90, активированный известняковым минеральным порошком | Битум БНД 60/90, активированный известняковым минеральным порошком, модифицированным высокодисперсными отсевами дробления керамзита |
| Глубина проникновения иглы, 0,1 мм при<br>0°С<br>20°С | <br>20<br>51 | <br>20<br>43 |
| Температура размягчения по кольцу и шару, °С | 68,5 | 76,4 |

у асфальтобетонов с применением высокопористых наполнителей. Исследована возможность использования высокодисперсных отсевов дробления керамзита в качестве наполнителя в асфальтобетоне с частичной заменой минерального порошка. Введение в состав асфальтобетона пористого наполнителя позволяет повысить прочность и трещиностойкость [5]. Выявлена высокая адсорбционная активность и структурирующая способность высокодисперсных отсевов дробления керамзита в битумном вяжущем [5]. Учитывая изложенное, применение пористых высокодисперсных наполнителей оказывает положительное влияние на ряд свойств асфальтовяжущего и самих асфальтобетонов.

В представленной работе рассмотрено влияние высокодисперсных порошковых отходов пористых материалов (на примере высокодисперсных отсевов дробления керамзита) на структуру и свойства, технологические параметры ЩМАС, физико-механические и эксплуатационные показатели ЩМА. Высокодисперсные отсевы дробления керамзита фракций менее 0,16 мм, используемые в исследованиях, получали измельчением в лабораторной шаровой мельнице. Определяли пенетрацию и температуру размягчения асфальтовяжущего на основе активированного известнякового минерального порошка, модифицированного высокодисперсными отсевами дробления керамзита (при их оптимальном соотношении) и сравнивали с асфальтовяжущим на стандартном наполнителе (активированном известняковым минеральным порошком). Свойства асфальтовяжущего представлены в табл. 1.

Согласно полученным данным (табл. 1), отмечено снижение показателя пенетрации и увеличение температуры размягчения асфальтовяжущего, модифицированного отсевами дробления керамзита, обусловленное повышением вязкости и теплостойкости вяжущего, что может положительно повлиять на снижение стекаемости битума в ЩМАС. Это связано с тем, что определяющим фактором, влияющим на структуру асфальтовяжущего (а также и асфальтобетонов) на основе высокопористых наполнителей, является избирательная фильтрация компонентов битумного вяжущего в поры минерального материала. В результате происходит структурное изменение органического вяжущего, изменение состава и количества различных по молекулярной массе и реакционной способности соединений, входящих в состав битума. Высокодисперсные отсевы дробления керамзита представляют собой частицы с большим количеством открытых микропор различного размера и при взаимодействии с битумом в микропорах сорбируются масла и легкие ароматические соединения. В результате этого процесса происходит обогащение вяжущего более тяжелыми и активными компонентами – асфальтенами и смолами, что и определяет изменение структуры, свойств битума и соответственно асфальтовяжущего. Повышенная удельная поверхность (до 5000 см$^2$/г) отсевов дробления керамзита также может способствовать обеспечению высокой сорбирующей способности предложенного материала.

Были запроектированы и приготовлены смеси ЩМА-15, в которых в качестве стабилизирующей добавки использовали высокодисперсные отсевы дробления керамзита; в оптимальном соотношении их вводили в состав ЩМА в качестве стабилизирующей добавки. Для сравнения испытывали образцы ЩМА-15 с использованием стандартных стабилизирующих добавок Viatop-66. Испытания образцов проводили в соответствии с ГОСТ Р 31015–2002 и ГОСТ 12801–98. Результаты испытаний свойств ЩМА представлены в табл. 2. Согласно результатам установлено, что пористость минеральной части, остаточная пористость и водонасыщение исследуемых ЩМА практически равны. Показатели коэффициентов водостойкости и водостойкости при длительном водонасыщении модифицированного ЩМА соответственно на 3 и 13% выше стандартного ЩМА.

Необходимо отметить, что включение в состав ЩМА отсевов дробления керамзита способствует повышению прочности при сжатии ($R_{20}$) на 6%, теплостойкости ($R_{50}$) на 12%. Стоит отметить повышение трещиностойкости и сдвигоустойчивости, что обусловлено особенностями физико-химического взаимодей-

**Таблица 2**

| Показатели ЩМА-15 | Состав № 1 (ЩМА-15 с добавкой на основе отсевов дробления керамзита) | Состав № 2 (ЩМА-15 с добавкой Viatop-66) | Значение показателя по ГОСТ 31015–2002 |
|---|---|---|---|
| Пористость минеральной части, % | 16 | 15,8 | 15–19 |
| Остаточная пористость, % | 3,2 | 2,9 | 2–4,5 |
| Водонасыщение *W*, об. % | 1,94 | 1,85 | 1,5–4 |
| Коэффициент водостойкости $k_в$ | 0,99 | 0,96 | ⩾0,9 |
| Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении $k_{вд}$ | 0,86 | 0,76 | ⩾0,75 |
| Показатель стекания вяжущего *B*, %: | 0,13 | 0,11 | ⩽0,2 |
| Предел прочности на растяжение при расколе при температуре 0°С $R_p$, МПа: | 6,18 | 5,7 | 3–6,5 |
| Коэффициент внутреннего трения $tg_φ$<br>Сцепление при сдвиге *С*т при 50°С, МПа, | 0,95<br>0,24 | 0,94<br>0,2 | ⩾0,94<br>⩾0,2 |
| Предел прочности при сжатии, МПа, при<br>20°С $R_{20}$<br>50°С $R_{50}$ | <br>4,57<br>1,9 | <br>4,3<br>1,68 | <br>⩾2,5<br>⩾0,7 |

ствия органического вяжущего с пористым материалом. Высокие показатели трещиностойкости ЩМА с использованием высокодисперсных отсевов дробления керамзита можно объяснить не только повышением прочностных характеристик, но и некоторым снижением температурных напряжений в результате применения пористых материалов.

Температурные напряжения $\sigma_T$ в дорожном покрытии, возникающие при охлаждении асфальтобетона при линейном напряженном состоянии, М.М. Богуславский описывает следующим выражением [6]:

$$\sigma_T = E(\alpha_a - \alpha_o)\Delta T, \quad (1)$$

где $E$ – модуль упругости асфальтобетона; $\alpha_a$ и $\alpha_o$ – коэффициенты линейного теплового расширения (КЛТР) асфальтобетонного покрытия и материала основания соответственно; $\Delta T$ – разность значений температуры.

При объемном напряженном состоянии согласно исследованиям Н.П. Пригоровского:

$$\sigma_T = E(\alpha_a - \alpha_o)\Delta T/(1 - c_x\mu), \quad (2)$$

где $c_x$ принимает значения 0, 1 или 2 в зависимости от имеющегося ограничения в свободном температурном деформировании в 1–3 направлениях, μ – коэффициент Пуассона асфальтобетонного покрытия.

Применение в составе ЩМА высокодисперсных отсевов дробления керамзита за счет увеличения пористости наполнителя может обеспечить некоторое снижение теплопроводности материала и соответственно коэффициента линейного теплового расширения $\alpha_a$ асфальтобетонного покрытия. Это способствует снижению $\sigma_T$ в слое покрытия. Повышение вязкости μ модифицированного ЩМА также приводит к снижению температурных напряжений.

Изменение структуры битума в ЩМАС за счет введения в наполнитель высокодисперсных отсевов обеспечивает повышение структурно-механических характеристик материала, в частности: увеличение модуля упругости *E* и некоторое снижение деформативности ЩМА при эксплуатационных значениях температуры. Зависимости модулей упругости исследуемых ЩМА от температуры, полученные на основании экспериментальных исследований при одноосном нагружении образцов ЩМА-15, представлены на рис. 1.

Важнейшей эксплуатационной характеристикой асфальтобетонов является их долговечность. Долговечность предложенного состава ЩМА определяли по методике в работе [6] с использованием климатической камеры «СМ – -70/100 – 120ТВХ».

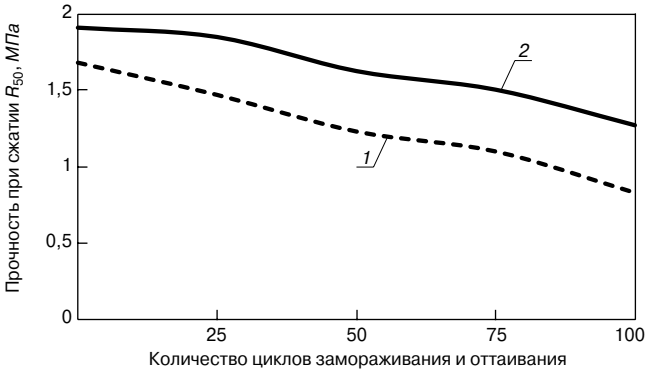


**Рис. 3.** Зависимость предела прочности при сжатии при 50°С ($R_{50}$, МПа) от количества циклов замораживания и оттаивания: *1* – ЩМА-15 (Viatop-66); *2* – ЩМА-15 (отсевы дробления керамзита)

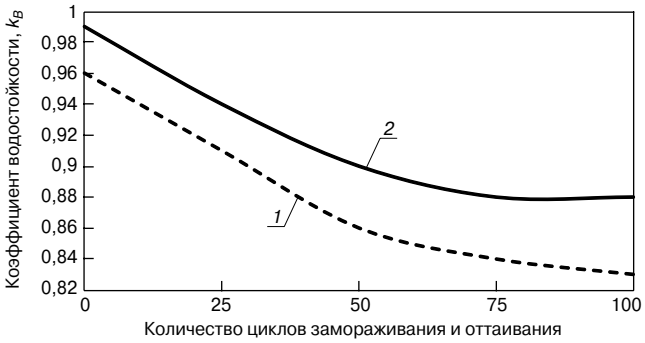


**Рис. 4.** Зависимость коэффициента водостойкости ($k_в$) от количества циклов замораживания и оттаивания: *1* – ЩМА-15 (Viatop-66); *2* – ЩМА-15 (отсевы дробления керамзита)

Эксперимент проводили в три этапа. Первый этап оценки долговечности образцов в лабораторных условиях соответствовал старению при технологическом процессе приготовления ЩМА. На втором – моделировали старение в летний период эксплуатации. Третий этап заключался в полном водонасыщении образцов с последующим попеременным замораживанием и оттаиванием. Образцы испытывали по окончании 25, 50, 100 циклов замораживания-оттаивания. Результаты испытаний представлены на графиках (рис. 2–5).

Полученные результаты позволяют сделать вывод о повышенной долговечности щебеночно-мастичных асфальтобетонов с применением добавок на основе высокодисперсных отсевов дробления керамзита.

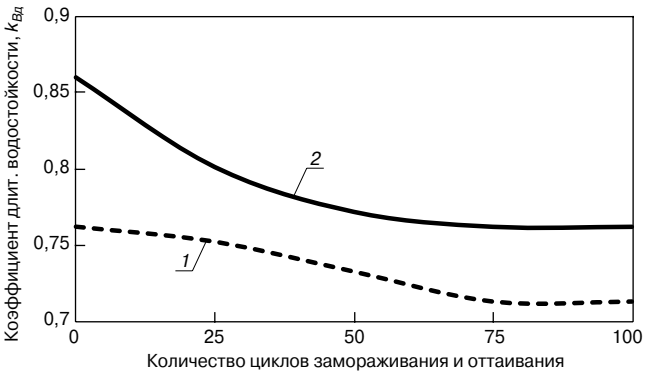


**Рис. 5.** Зависимость коэффициента водостойкости при длительном водонасыщении ($k_{вд}$) от количества циклов замораживания и оттаивания: *1* – ЩМА-15 (Viatop-66); *2* – ЩМА-15 (отсевы дробления керамзита)

**Список литературы**


1. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.К., Барабаш Д.Е. Особенности структурообразования битумоминеральных композиций с применением пористого сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 68–71.
2. Высоцкая М.А., Кузнецов Д.К., Федоров М.Ю. Оценка качества битумоминеральных композитов с применением пористых наполнителей // *Дороги и мосты*. 2012. № 27. С. 241–250.
3. Свинтицких Л.Е., Шабанова Т.Н., Клюсов А.А., Агейкин В.Н. Влияние дисперсности вспученного вермикулита на свойства битумного вяжущего и асфальтобетона // *Строительные материалы*. 2004. № 9. С. 32–33.
4. Иноземцев С.С., Королев Е.В. Выбор минерального носителя наноразмерной добавки для асфальтобетона // *Вестник МГСУ*. 2014. № 3. С. 158–167.
5. Солдатов А.А., Борисенко Ю.Г. Структуры поверхности пористых порошков на основе отсевов дробления керамзита и их адсорбционная активность // *Строительные материалы*. 2011. № 6. С. 36–38.
6. Калгин Ю.И. Дорожные битумоминеральные материалы на основе модифицированных битумов. Воронеж: Воронеж. гос. ун-т, 2006. 272 с.


**References**


1. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.K., Barabash D.E. Features of structure bitumen-mineral compositions with the use of porous materials. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2014. No. 1–2, pp. 68–71. (In Russian).
2. Vysotskaya M.A., Kuznetsov D.K., Fedorov M.U. Assessment of quality of bituminous composites using porous fillers. *Dorogi i mosty*. 2012. No. 27, pp. 241–250. (In Russian).
3. Svintitskih L.E., Shabanov T.N., Klyus A.A., Ageikin V.N. Effect of dispersion on the properties of exfoliated vermiculite asphalt binder and asphalt concrete. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2004. No. 9, pp. 32–33. (In Russian).
4. Inozemcev S.S., Korolev E.V. Selecting a mineral carrier nanosized additives for asphalt concrete. *Vestnik MGSU*. 2014. No. 3, pp. 158–167. (In Russian).
5. Soldatov A.A., Borisenko J.G. The surface structure of porous powders based on expanded clay crushing screenings and their adsorption activity. *Stroitel'nye Materialy* [Construction Materials]. 2011. No. 6, pp. 36–38. (In Russian).
6. Kalgin Y.I. Dorozhnye bitumomineral'nye materialy na osnove modifitsirovannykh bitumov [Road bituminous materials based on modified bitumen]. Voronezh: Voronezh State University Press. 2006. 272 p.