



УДК 620.169.2

Гайфутдинов Рустем Флюсович

заместитель начальника отдела лабораторного контроля

E-mail: 9600872235@mail.ru

ГКУ «Главтатдортранс»

Адрес организации: 420012, Россия, г. Казань, ул. Достоевского, д. 18/75

Хафизов Эдуард Радикович

кандидат технических наук, доцент

E-mail: hafizov@kgasu.ru

Казанский государственный архитектурно-строительный университет

Адрес организации: 420043, Россия, г. Казань, ул. Зеленая, д. 1

Исследование абразивного износа щебня для автомобильных дорог

Аннотация

Постановка задачи. Цель данного исследования – изучение степени влияния шероховатости поверхности каменных материалов на абразивный износ под влиянием эксплуатационных нагрузок. Абразивный износ щебня имеет отрицательный экономический и экологический эффект и нуждается в изучении для повышения качества автодорожных материалов. Несмотря на то, что абразивный износ достаточно изучен, недостаточно известна степень влияния шероховатости на износостойкость щебня.

Результаты. Основные результаты исследования состоят в оценке износостойкости щебня при помощи теста Микро-Деваль. Испытание двух групп материалов – смеси габброидов и диорита – с различными характеристиками шероховатости их поверхности, полученными искусственно, показали высокое влияние этого параметра на износостойкость щебня. Так влияние шероховатости поверхности на абразивный износ данных материалов составило более 40 %.

Выводы. Значимость полученных результатов исследования для строительной отрасли состоит в возможности выбора долговечных каменных материалов при строительстве автомобильных дорог. Высокую степень влияния шероховатости поверхности каменных материалов на их абразивный износ необходимо учитывать при прогнозировании поведения каменных материалов под воздействием эксплуатационных нагрузок.

Ключевые слова: щебень, абразивный износ, шероховатость, Микро-Деваль, износостойкость.

Введение

Повышение износостойкости щебня для строительства автомобильных дорог является первостепенной задачей существующей транспортной отрасли. Помимо увеличения требований к транспортно-эксплуатационным показателям, возрастает транспортная нагрузка на автомобильных дорогах. Доля дефектов, связанных с абразивным износом покрытий, в данный момент времени на дорогах Российской Федерации увеличивается. Между тем, возрастает и загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа покрытий автомобильных дорог. Согласно исследованиям, содержание алюмосиликатов в притрассовой территории составляет более 11 ПДК и прогнозируется увеличение выбросов. Масса выбросов на 2014 год составляла 90 тыс. т. [1].

В связи с этим необходимо улучшать качество материалов для строительства дорог и изучать факторы, влияющие на процесс образования разрушений покрытий автомобильных дорог [2].

В целом, абразивный износ довольно широко изучен, в первую очередь, в случаях однородных сред наподобие металлов. Интересны практические и теоретические изыскания зарубежных исследователей в этом направлении, однако, в случае каменных материалов не было проведено достаточного количества исследований.

Для понимания процесса износа каменного материала были предложены некоторые расчетные модели на основе кинетической трактовки временной прочности частиц при

износе. Абразивный износ, в случае данной трактовки, пропорционален временной прочности частицы и зависит от характера приложения нагрузки. В случае частиц абразивного материала существуют формулы [3]:

$$\tau = \tau_0 - \exp\left(\frac{U_0 - \gamma\sigma}{kT}\right), \quad (1)$$

где τ – время существования частицы с момента приложения нагрузки до его разрыва;

τ_0 – период тепловой флуктуации одного атома тела;

U_0 – энергоактивационный барьер;

γ – характеристика материала;

σ – напряжение, действующее в материале;

k – постоянная Больцмана;

T – температура тела.

Из этой формулы следует, что, чем выше напряжение на поверхности разрыва удельной частицы материала, тем ниже время жизни частицы материала, хотя его прочность и может превышать обычную прочность тела при медленном нагружении. В случае абразивной нагрузки разрушение происходит по поверхности тела. Из этого следует, что наибольшее влияние на абразивную стойкость тела имеют характеристики поверхности, в том числе шероховатость.

Не принимая во внимание прочностные параметры самого материала, можно сделать вывод, что, чем выше шероховатость, тем ниже площадь поверхности разрушения и тем выше напряжение на поверхности. И действительно, эти выводы подтверждаются в случаях работы абразивного зерна шлифовального круга. Согласно исследованиям, наибольшее напряжение и наибольший износ абразивного зерна наблюдается в начальный период работы, данный период работы называется «притиркой» и характеризуется ростом площадки затупления на контакте зерна с обрабатываемым материалом [4].

Более интересны, с точки зрения каменного материала, исследования в области абразивного износа композитных материалов. Сами каменные материалы, как правило, имеют неравномерную структуру с включениями различных минералов, поэтому данная модель наиболее близка к каменному материалу. При этом масштабы данной модели соответствуют масштабам рассматриваемых процессов абразивного износа, когда отдельные частицы материала в цементирующей фазе или же неравномерные кристаллы различных минералов по размеру соответствуют части абразива. Согласно исследованиям Lee, в композитных системах выделяют две фазы: матрицу или основную фазу (matrix) и укрепленные частицы (reinforcement) [5]. При этом укрепленные частицы имеют большую твердость, нежели матрица.

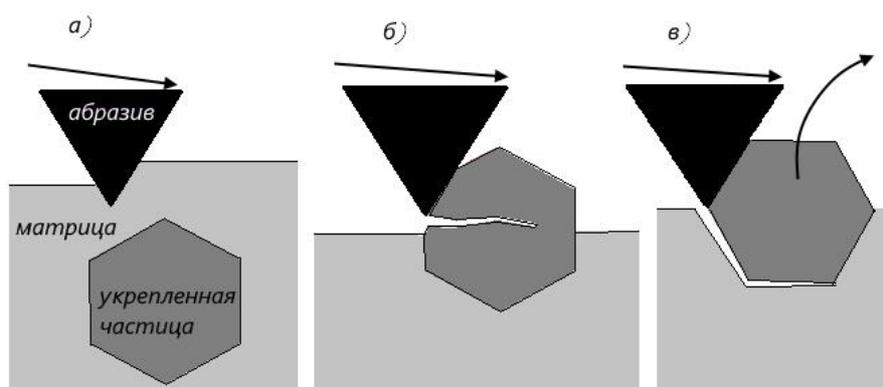


Рис. 1. Механизм абразивного износа (иллюстрация авторов): а – вспашка; б – разрушение укрепленных частиц или матрицы; в – перемещение укрепленных частиц

Согласно данной модели (рис. 1), износ осуществляется благодаря трем основным процессам:

1. Вспашке (plowing) – когда удаление материала осуществляется за счет последовательного разрушения матрицы путем её вспашки, то есть оставления царапин.

2. Разрушению укрепленных частиц или матрицы (cracking at the interface or in the reinforcement) – когда укрепленные материалы, препятствуя движению абразива, разрушают матрицу или же разрушаются сами.

3. Перемещению укрепленных частиц (particle removal) – когда укрепленные частицы и её части отрываются от матрицы и покидают композитную систему.

Данная модель дает объяснение износа двухфазного композита и, в том числе, механизма «ложного укрепления», когда наличие твердых частиц в композите лишь усугубляет процесс износа. Также она подтверждена некоторыми практическими изысканиями.

Согласно этой модели, шероховатость также является качеством материала, усугубляющим его абразивный износ. Быстрый вынос твердой укрепленной частицы из матрицы композита, в качестве которого в данном случае выступает каменный материал, будет вносить наибольший вклад в износ. При этом шероховатость создает наиболее отрицательные условия работы укрепленных частиц, при которых для их отрыва и разрушения воздействуют наибольшие напряжения [5].

Существуют исследования, направленные на связь петрографических параметров каменных материалов и сопротивление износу. Так Johansson представила исследование, в котором пришла к выводу, что четыре различных группы петрографических факторов влияют на прочность и технические свойства горных пород:

1. Минералогический состав и содержание связанной воды, которые важны для различной текстуры слагающих минералов, твердости и слоистости.

2. Микротрещины и пористость – зоны с наименьшей прочностью, способствующие распространению новых микротрещин

3. Размер зерен и их форма – влияют на распространение трещин, разрушения и на степень сцепления между соседними зёрнами материала.

4. Слоистость макроструктуры – влияет на анизотропное поведение породы.

Минералогический состав и размер зерна оказали наибольшее влияние в случае магматических пород, что касается метаморфических пород, максимально влияние слоистости, текстуры и макроструктуры на прочностные свойства. Размер зерна, объем пор, содержание воды и минералогический состав считаются наиболее важными факторами, влияющими на износостойкость осадочных пород [6].

Существует множество работ, направленных на изучение износостойкости тех или иных местных материалов, поэтому существуют ориентировочные оценки сопротивления абразивному износу для различных пород [7, 8].

Влияние шероховатости на величину износа в случае каменного материала можно проследить в работе, посвященной модифицированному тесту Микро-Деваль. Исследователи Wu J., Hou Y. и другие ученые проследили динамику потери массы в процессе одного испытания Микро-Деваль. Для этого они прерывали испытание через определенные промежутки времени и проводили замеры параметров полученных материалов. Исследователи обнаружили замедление процесса износа на графике потери массы, что говорит о том, что наибольший износ каменный материал переживает в процессе аналогичной «притирки», когда влияние шероховатости максимально [9].

Однако при всем этом недостаточно исследований, направленных на оценку степени влияния шероховатости поверхности зерен щебня на износ. В связи с этим, цель данного исследования – изучение степени влияния шероховатости поверхности каменных материалов на его абразивный износ под влиянием эксплуатационных нагрузок.

В качестве каменных материалов были выбраны: щебень марки 1400 из диорита с карьера «Сангалык» и щебень марки 1200 из смеси габброидов с карьера «Билимбай».

Определение износостойкости каменного материала

Величина сопротивления износу в данной работе оценивалась по величине потери массы после испытания по методике Микро-Деваль.

Тест Микро-Деваль, созданный во Франции в 1960 году, дает оценку сопротивлению абразивному износу, как частицами самого каменного материала, так и стальными шарами в присутствии воды [10]. Тест был принят в качестве стандартов в ряде стран.

Тест Микро-Деваль указывается многими исследователями, как точный метод определения износостойкости каменного материала [11-13]. Тест Микро-Деваль рекомендуется для использования в дорожном строительстве. Так же была выявлена высокая точность оценки по методу Микро-Деваль при параллельных испытаниях [14].

При этом методика Микро-Деваль может быть выполнена по ряду стандартов, среди них EN 1097-1, ASTM D7428-15 и др. В целом, в различных документах есть некоторые отличия, в частности, в размерах испытываемых фракций и массе абразивной нагрузки. Это приводит к некоторым различиям полученных оценок для различных материалов и фракций, выполненных по различным документам [13].

В качестве основного рассматриваемого документа, регламентирующего порядок проведения испытаний, был выбран ГОСТ 33024-2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение сопротивления истираемости по показателю Микро-Деваль». Согласно ему, истираемость щебня по показателю Микро-Деваль (МД) в процентах, рассчитывается по формуле:

$$МД = \frac{M_1 - M_2}{M_1} 100, \quad (2)$$

где M_1 – масса мерной пробы щебня до испытания, г;

M_2 – объединенная масса остатков на сите с размером ячеек 1,6 мм и 8 мм, высушенная до постоянной массы.

Мерная проба для испытания по ГОСТ 33024-2014 должна составлять 500 ± 5 г, фракции 10-14. При этом масса абразивной нагрузки, в виде шаров диаметром 10 мм, должна составлять 4500 г. Испытание считается оконченным по окончании 12000 оборотов.

Подготовка образцов

Для данного исследования необходимо было получить каменный материал, в котором зерна различаются лишь по величине шероховатости поверхности; минералогический состав, а также форма зерен должна быть идентичной при параллельных испытаниях.

Соблюдение данных условий было достигнуто путем искусственной обработки каменного материала из одной и той же пробы, для получения разных проб одного минералогического состава и формы зерен.

Искусственная обработка материала производилась на испытательном стенде Микро-Деваль. При этом количество абразивной нагрузки в виде стальных шаров было сокращено до 3000 г, а количество оборотов было сокращено в случае диорита до 4000 оборотов, а в случае габброидов – до 3000 оборотов. Масса каменного материала, подвергаемого обработке в одном барабане, составляла 3000 г.

На рис. 2 представлены фотографии поверхностей данных материалов, сделанные при помощи цифрового оптического микроскопа.

После искусственной обработки, из каменного материала были отобраны пробы для испытания по методике Микро-Деваль.

В процессе обработки контролировалась форма зерен каменного материала. Данная задача была решена путем замера площади поверхности зерен щебня. К примеру, при исследовании щебня в Ростовском государственном университете путей сообщения, выполнялись аналогичные замеры площади поверхности единичных зерен. Измерение поверхности производилось путем парафинирования с последующим определением расхода парафина по объему и толщине пленки парафина по поверхности зерна. Толщина пленки парафина определялась на пенетрометре с точностью 0,1 мм. В работе ученых применялся коэффициент, отражающий близость формы зерна к форме шара [15].

В данной работе в качестве сравнительной характеристики достаточно определения удельной площади поверхности:

$$S_{уд.м} = \frac{S_{нов.щ.}}{m_{щ.}}, \quad (3)$$

где $S_{уд.м}$ – удельная площадь поверхности;

$S_{нов. щ.}$ – площадь поверхности навески щебня, вычисленная при помощи парафина;

$m_{щ.}$ – масса навески щебня.

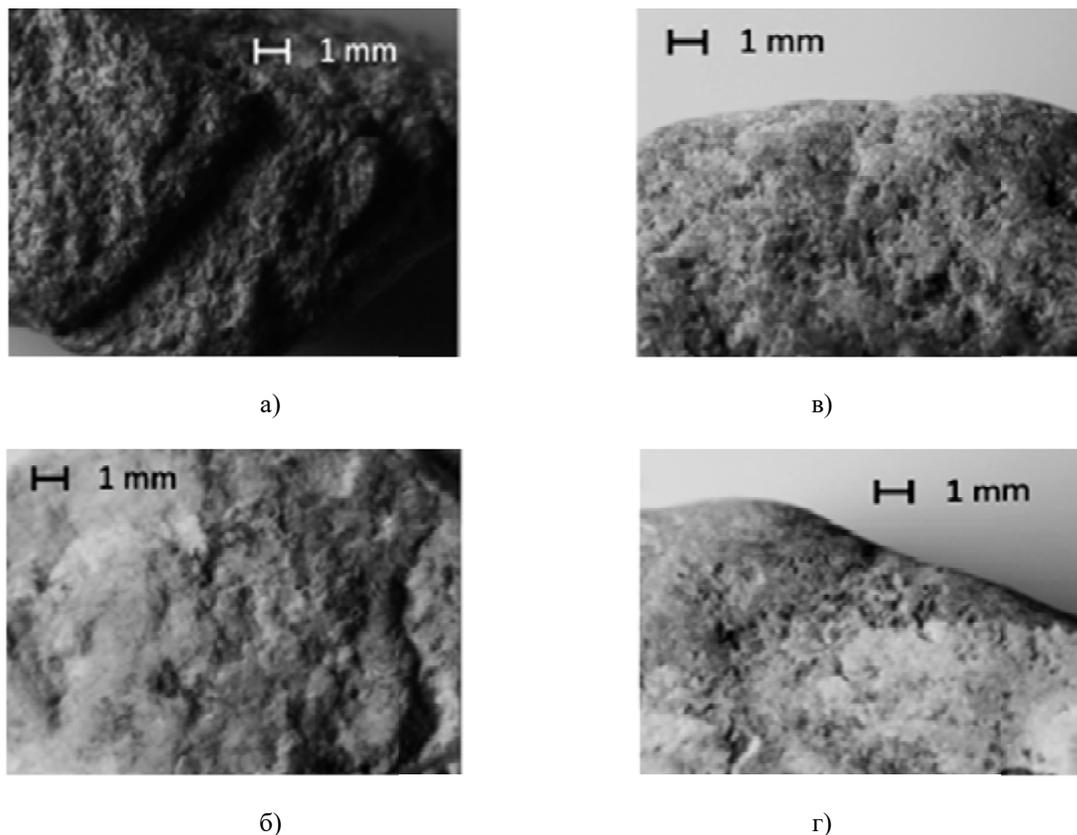


Рис. 2. Фотографии поверхности исследуемых материалов (иллюстрация авторов):
 а) необработанный диорит карьер «Сангалык»; б) обработанный диорит карьер «Сангалык»;
 в) необработанный габброид карьер «Билимбай»; г) обработанный габброид карьер «Билимбай»

Площадь навески пробы щебня определяется исходя из плотности парафина, его массы и толщины пленки. Масса парафина находится как разность массы навески щебня до и после парафинирования. Взвешивание производилось на весах с погрешностью измерений 0,01 г.

Толщина пленки определялась микрометром, в отличие от опыта исследователей из Ростовского государственного университета при аналогичной работе. Объясняется это сложностью ручных измерений на пенетрометре, т.к. зерно щебня, помещенное под иглу пенетрометра, смещается от своей изначальной высоты. При измерении микрометром же точность измерений составляла 10 мкм, также этот способ измерения был более практичен.

После измерения толщины пленки и массы парафина площадь поверхности парафина находилась по следующей формуле:

$$S_{\text{пов.щ.}} = \frac{m_n}{\rho_n * t}, \quad (4)$$

где m_n – масса парафина;

ρ_n – плотность парафина;

t – толщина парафиновой пленки на образцах щебня.

Определение шероховатости щебня

В данной работе оценивалась шероховатость поверхности щебня. В качестве основного измеряемого параметра было выбрано среднее отклонение высоты профиля поверхности от среднего значения высоты профиля – R_a .

Шероховатость поверхности щебня представляет собой сложный параметр для измерения, так как поверхность щебня имеет сложный рельеф. Поэтому оценка шероховатости имеет сравнительно невысокую точность, однако её достаточно для сравнительной оценки различных проб каменного материала.

Существует несколько способов измерения шероховатости поверхностей. Целесообразный масштаб имеют два способа: контактный с использованием профилометра и бесконтактный оптический по методу теневого сечения. Оба этих метода позволяют давать оценку шероховатости поверхности в масштабе от 0,8 до 63 мкм. Для измерения параметра шероховатости поверхности (R_a) был выбран метод теневого сечения, как наименее трудоемкий и более простой в обработке, при сложных рельефах поверхности [16].

Согласно этому методу, шероховатость поверхности оценивается по форме световой тени от грани линейки под углом к поверхности. Измерения проводятся с использованием оптических микроскопов. В данном случае использовался микроскоп с возможностью цифровой обработки фотографий. Обработка производилась в программном комплексе AutoCad вручную, затем профили поверхностей обрабатывались в программном комплексе Excel. Была получена оценка R_a , которая высчитывалась как интеграл графика поверхности, пересеченной средней высотой профиля:

$$R_a = \frac{\int |H - R_{cp}|}{t}, \quad (5)$$

где H – отметка профиля;

R_{cp} – средняя отметка профиля;

t – длина участка, на котором производился замер профиля.

Результаты исследования

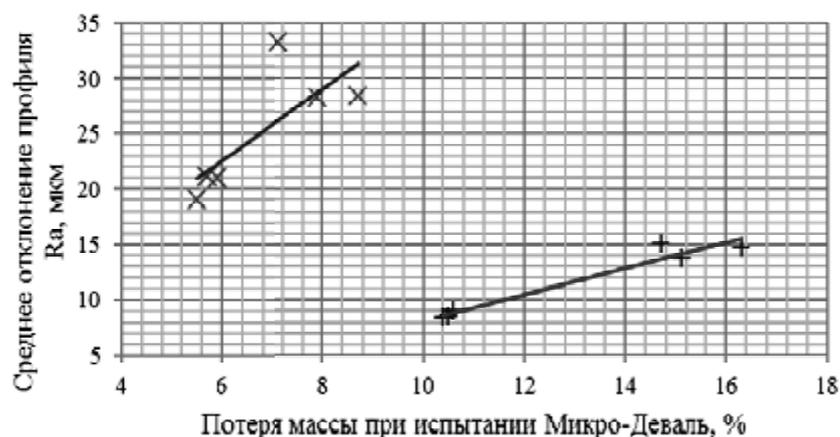
Было проведено 12 испытаний двух групп материалов. Первая группа – щебень марки 1400 из диорита карьера «Сангалык», вторая группа – щебень марки 1200 из смеси габброидных пород карьера «Билимбай». В каждой группе материалы различались по шероховатости, т.к. половина из них была искусственно частично обработана в установке Микро-Деваль для получения различных характеристик шероховатости поверхности.

Испытания включали в себя тест Микро-Деваль, определение водонасыщения, характеристик шероховатости и удельной поверхности щебня. Результаты испытаний приведены на графиках (рис. 3).

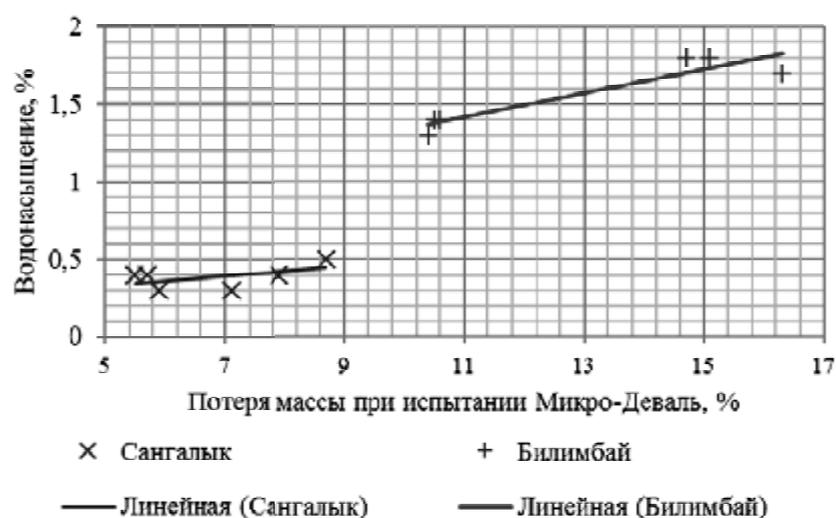
Заметна сильная корреляция между величиной среднего отклонения профиля и износостойкости щебня (рис. 3а). Это говорит о том, что шероховатость оказывает влияние на абразивную стойкость каменного материала. При этом, различия между значениями потери массы в пределах данной корреляции составляют для щебня карьера «Сангалык» до 47 %, а для щебня карьера «Билимбай» – до 46 %. Так для щебня карьера «Билимбай» это соответствует двум различным маркам по истираемости, МД2 и МД3, это говорит о том, что разница более чем существенная.

Так же можно отметить, что аппроксимационная прямая на графике, в случае диоритового щебня карьера «Сангалык», более крутая. Это может говорить о том, что, чем выше износостойкость щебня, тем ниже влияние шероховатости на абразивные процессы. Возможен другой вывод, так как шероховатость в случае диорита выше шероховатости габброидов во всех случаях, данный эффект может быть следствием того, что, чем выше шероховатость, тем меньше влияние её на изменение износостойкости щебня. Данные выводы требуют практических подтверждений и поэтому не отмечаются в данной работе должным образом.

Также заметна невысокая корреляция между водонасыщением и износостойкостью габброидного щебня карьера «Билимбай» (рис. 3б). Для диоритового щебня данной корреляции не замечено. Изменение водонасыщения в данном случае является следствием изменения шероховатости поверхности каменных материалов, так как изменяется количество открытых неровностей на поверхности, способных поглощать воду. Диоритовый щебень в целом характеризуется низким водонасыщением, поэтому, в данном случае, влияние не заметно.



а)



б)

Рис. 3. Зависимости потери массы каменных материалов при испытании Микро-Деваль от шероховатости и водонасыщения (иллюстрация авторов): а) шероховатости; б) водонасыщения

Величина удельной поверхности щебня в данных группах изменяется в невысоких пределах, в соответствии с целью эксперимента. Так же не замечено существенного влияния удельной поверхности щебня на сопротивление щебня абразивному износу в пределах полученных значений.

Единственное, что стоит отметить, это более высокий показатель удельной поверхности в случае диоритового щебня. Визуально форма щебня в случае диоритовых пород не отличается, и небольшое отклонение может быть следствием влияния шероховатости на способность щебня впитывать парафин, который использовался для определения площади поверхности зерен.

Заключение

Как показали результаты исследования, шероховатость поверхности каменных материалов оказывает существенное влияние на величину износа при испытании по методике Микро-Деваль. Заметна корреляция между замерами измеренной шероховатости и потерей массы щебня по методике Микро-Деваль. Так более высокая шероховатость приводит к большей потере массы при испытании. В случае смеси габброидных пород карьера «Билимбай», данное влияние достигает 45 %, в случае диоритового щебня карьера «Сангалык» – 46 % при аналогичных испытаниях. Это может негативно сказаться при изысканиях, так как более прочные породы могут показать

низкие параметры износостойкости, а менее прочные, наоборот, способны дать хорошие результаты при испытаниях. Для адекватной оценки качества щебня необходимо учитывать данный параметр.

Данный вывод – большой вклад в последующие теоретические изыскания в данном направлении. Анализ шероховатостей поверхности каменных материалов для дорожного строительства при разработке моделей абразивного износа щебня позволит более точно предсказывать поведение тех или иных материалов в условиях эксплуатационных нагрузок. В первую очередь точное прогнозирование позволяет увеличить долговечность материалов и покрытий, в том числе и на автомобильных дорогах.

Список библиографических ссылок

1. Леванчук А. В. Загрязнение окружающей среды продуктами эксплуатационного износа автомобильных дорог // *NAUKOVEDENIE.RU: интернет-журнал «Науковедение»*. 2014. № 1 (20).
2. Makarov D. B., Krasinikova N. M., Morozov N. M., Ayupov D. A., Borovskikh I. V., Khokhryakov O. V., Yagund E. M., Khozin V. G. Improving the Quality of Materials for Highway Construction // *Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2017. V. 11. № 14. P. 3035–3041.
3. Ардашев Д. В. Кинетическая трактовка стойкости абразивного зерна // *Металлообработка*. 2013. № 3 (75). С. 10–19.
4. Ардашев Д. В. Определение величины механического износа абразивных зерен при шлифовании // *Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение»*. 2014. Т. 14. № 4. С. 55–66.
5. Lee Gun Y., Dharan C. K. H., Ritchie R. O. A physically-based abrasive wear model for composite materials // *Wear*. 2002. P. 322–331.
6. Johansson E. Technological properties of rock aggregates // *Luleå university of technology*. Luleå. 2011. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990291/FULLTEXT01.pdf> (дата обращения: 18.01.2020).
7. Kekec B., Bilim N., Dьндar S. Abrasion properties of some building stone wastes and usability for sustainability // *Geo-Resources Environment and Engineering*. 2017. P. 218–222.
8. Teltayev B. B. Importance of rocks in road construction // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2017. № 423 (3). P. 283–292.
9. Wu J., Hou Y., Wang L., Guo M., Meng L., Xiong H. Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. № 11 (2). P. 185–194.
10. Tanyu B. F., Yavuz A. B., Ullah S. A parametric study to improve suitability of micro-deval test to assess unbound base course aggregates // *Construction and Building Materials*. 2017. P. 328–338.
11. Deiros I., Voivret C., Combe G., Emeriault, F. Quantifying Degradation of Railway Ballast Using Numerical Simulations of Micro-deval Test and In-situ Conditions // *In Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 1016–1023.
12. Wang D., Wang H., Bu Y., Schulze C., Oeser, M. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques // *Wear*. 2015. V. 338–339. P. 288–296.
13. Gökalp İ., Uz V. E., Saltan M. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 123. P. 1–7.
14. Tabatabai H., Titi H., Chin-Wei Lee, Quamhia I., Puerta Fella G. Investigation of Testing Methods to Determine Long-Term Durability of Wisconsin Aggregates. Final report // *University of Wisconsin – Milwaukee Department of Civil Engineering and Mechanics*. 2013. URL: <https://wisconsin.gov/documents2/research/final-reports-projects/briefs/WisDOT-WHRP-project-0092-10-08-final-report.pdf> (дата обращения: 18.01.2020).

15. Курочка П. Н., Мирзалиев Р. Р. Оценка формы зерен щебня, получаемого дроблением вторичного бетона // Новые технологии. 2012. № 2. С. 104–109.
16. Макеев А. В., Айрапетян В. С. Анализ современных методов исследования шероховатости поверхности деталей // Вестник СГГА. 2014. № 4 (28). С. 80–86.

Gayfutdinov Rustem Flyusovich

deputy head of laboratory control department

E-mail: 9600872235@mail.ru

SPI «Glavtadortrans»

The organization address: 420012, Russia, Kazan, Dostoevskij st., 18/75

Khafizov Eduard Radikovich

candidate of technical sciences, associate professor

E-mail: hafizov@kgasu.ru

Kazan State University of Architecture and Engineering

The organization address: 420043, Russia, Kazan, Zelenaya st., 1

Research of abrasive wear of crushed stone for highways

Abstract

Problem statement. The purpose of this research is to study the degree of influence of the surface roughness of stone materials on its abrasive wear under the influence of operational loads. Abrasive wear of crushed stone has a negative economic and environmental effect and needs to be studied to improve the quality of road materials. Although abrasive wear is well understood, the degree of influence of roughness on the wear resistance of crushed stone is not well known.

Results. The main results of the study are to assess the wear resistance of crushed stone using the Micro-Deval test. Testing of two groups of materials, a mixture of gabbros and diorite, with various surface roughness characteristics obtained artificially, showed a high effect of this parameter on the wear resistance of crushed stone. Thus, the effect of surface roughness on the abrasive wear of these materials amounted to more than 40 %.

Conclusions. The significance of the research results for the construction industry lies in the possibility of choosing durable stone materials for the construction of roads. The high degree of influence of the surface roughness of stone materials on their abrasive wear must be taken into account when predicting the behavior of stone materials under the influence of operational loads.

Keywords: crushed stone, abrasive wear, roughness, Micro-Deval, wear resistance.

References

1. Levanchuk A. V. Environmental pollution by products of road wear // NAUKOVEDENIE.RU: internet-journal «Naukovedenie». 2014. № 1 (20).
2. Makarov D. B., Krasnikova N. M., Morozov N. M., Ayupov D. A., Borovskikh I. V., Khokhryakov O. V., Yagund E. M., Khozin V. G. Improving the Quality of Materials for Highway Construction // Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. V. 11. № 14. P. 3035–3041.
3. Ardashev D. V. Kinetic interpretation of abrasive grain resistance // Metalloobrabotka. 2013. № 3 (75). P. 10–19.
4. Ardashev D. V. Determination of the mechanical wear of abrasive grains during grinding // Vestnik YuUrGU. Seriya «Mashinostroenie». 2014. V. 14. № 4. P. 55–66.
5. Lee Gun Y., Dharan C. K. H., Ritchie R. O. A physically-based abrasive wear model for composite materials // Wear. 2002. P. 322–331.

6. Johansson E. Technological properties of rock aggregates // Luleå university of technology. Luleå. 2011. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:990291/FULLTEXT01.pdf> (reference date: 18.01.2020).
7. Kekec B., Bilim N., Дьндар S. Abrasion properties of some building stone wastes and usability for sustainability // *Geo-Resources Environment and Engineering*. 2017. P. 218–222.
8. Teltayev B. B. Importance of rocks in road construction // *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*. 2017. № 423 (3). P. 283–292.
9. Wu J., Hou Y., Wang L., Guo M., Meng L., Xiong H. Analysis of coarse aggregate performance based on the modified Micro Deval abrasion test // *International Journal of Pavement Research and Technology*. 2017. № 11 (2). P. 185–194.
10. Tanyu B. F., Yavuz, A. B., Ullah, S. A parametric study to improve suitability of micro-deval test to assess unbound base course aggregates // *Construction and Building Materials*. 2017. P. 328–338.
11. Deiros I., Voivret C., Combe G., Emeriault, F. Quantifying Degradation of Railway Ballast Using Numerical Simulations of Micro-deval Test and In-situ Conditions // *In Procedia Engineering*. 2016. Vol. 143. P. 1016–1023.
12. Wang D., Wang H., Bu Y., Schulze C., Oeser M. Evaluation of aggregate resistance to wear with Micro-Deval test in combination with aggregate imaging techniques // *Wear*. 2015. V. 338–339. P. 288–296.
13. Gökalp İ., Uz V. E., Saltan M. Testing the abrasion resistance of aggregates including by-products by using Micro Deval apparatus with different standard test methods // *Construction and Building Materials*. 2016. V. 123. P. 1–7.
14. Tabatabai H., Titi H., Chin-Wei Lee, Quamhia I., Puerta Fella G. Investigation of Testing Methods to Determine Long-Term Durability of Wisconsin Aggregates. Final report // University of Wisconsin – Milwaukee Department of Civil Engineering and Mechanics. 2013. URL: <https://wisconsin.gov/documents2/research/final-reports-projects/briefs/WisDOT-WHRP-project-0092-10-08-final-report.pdf> (reference date: 18.01.2020).
15. Kurochka P. N., Mirzaliev R. R. Evaluation of the shape of grains of crushed stone obtained by crushing secondary concrete // *Novye texnologii*. 2012. № 2. P. 104–109.
16. Makeev A. V., Ajrapetyan V. S. Analysis of modern methods for studying the surface roughness of parts // *Vestnik SGGU*. 2014. № 4 (28). P. 80–86.