РАЗДЕЛ І ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

УДК 625.089.21 DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866 EDN: XPFBRO



ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ГРАНУЛОМЕТРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ЩЕБЕНОЧНО-МАСТИЧНОГО АСФАЛЬТОБЕТОННОГО ГРАНУЛЯТА

Д.В. Фурманов 🖂, Е.С. Буданова

Ярославский государственный технический университет (ЯГТУ), г. Ярославль, Россия ⊠ ответственный автор denis_furmanov@mail.ru

АННОТАЦИЯ

Введение. В статье предложен энергетический подход к анализу рабочего процесса фрезерования асфальтобетонных покрытий. Рабочий процесс резания асфальтобетона рассматривается как совокупность процессов разрушения каменной фракции, битумных связей и прочих явлений, не связанных с образованием новых поверхностей. Анализ выполнен на основе оценки соотношения энергии, затраченной на фрезерование в целом, и энергии, затраченной на формирование новых поверхностей отдельных фракций асфальтобетонного гранулята и щебенчатого заполнителя.

Материалы и методы. Работа построена на основе экспериментальных исследований гранулометрического состава асфальтобетонного гранулята, полученного при фрезеровании щебеночно-мастичного асфальтобетонного покрытия, и отдельно каменной фракции асфальтобетона, полученной путем выжигания битумной матрицы. Также использован стандартный метод для определения удельной энергии разрушения битумных связей при определении сопротивляемости разрушению образца на растяжении при расколе.

Результаты. В результате рассева получены гранулометрические кривые состава асфальтобетонного гранулята и каменной фракции. Расчетными методами определены составляющие затрат энергии на образование новых поверхностей асфальтобетонного гранулята и новых поверхностей каменной фракции.

Обсуждение и заключение. В итоге работы получены количественные соотношения различных фракций асфальтобетонного гранулята щебеночно-мастичного асфальтобетона, образующегося при фрезеровании, а также степень дробления каменных фракций. Определены удельные затраты энергии при фрезеровании асфальтобетона. Установлено, что наибольшая часть энергии при фрезеровании (64,7% для данного исследования) затрачивается на разрушение битумных связей. Подавляющая часть этой энергии расходуется на образование мелкой фракции гранулята. На разрушение каменной фракции затрачивается незначительная часть энергии. В целом доля затрат энергии, направленной на образование новых поверхностей для указанного исследования, составляет 66,14% от общих затрат энергии. Отмечается перспективность гранулометрического анализа для оценки эффективности процесса фрезерования асфальтобетона.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: асфальтобетон, гранулят, удельная энергия, гранулометрическая кривая, битумные связи, дорожная фреза

Статья поступила в редакцию 05.11.2024; одобрена после рецензирования 21.11.2024; принята к публикации 16.12.2024.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи. Прозрачность финансовой деятельности: авторы не имеют финансовой заинтересованности в представленных материалах и методах. Конфликт интересов отсутствует.

Для цитирования: Фурманов Д.В., Буданова Е.С. Оценка эффективности процесса фрезерования на основе гранулометрического анализа щебеночно-мастичного асфальтобетонного гранулята // Вестник СибАДИ. 2024. Т. 21, № 6. С. 852-866. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866

© Фурманов Д.В., Буданова Е.С., 2024



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.



Original article DOI: https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866 EDN: XPFBRO

EFFICIENCY EVALUATION OF THE MILLING PROCESS BASED ON THE GRANULOMETRIC ANALYSIS OF CRUSHED STONE-MASTIC ASPHALT CONCRETE GRANULATE

Denis. V. Furmanov ⊠, Ekaterina. S. Budanova Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl, Russia ⊠ corresponding author denis_furmanov@mail.ru

ABSTRACT

Introduction. The working process of milling asphalt concrete pavements. The working process of asphalt concrete milling is considered as a set of destruction processes of the stone fraction, bitumen bonds and other phenomena unrelated to the formation of new surfaces. The conducted analysis is based on the assessment of the ratio of energy spent on milling in general and the energy needed for the formation of new surfaces made from separate fractions of asphalt concrete granulate and crushed stone aggregate.

Materials and methods. The work is based on carried out experimental studies of the granulometric composition of asphalt concrete granulate obtained by milling crushed stone-mastic asphalt concrete pavement, and, separately, the stone fraction of asphalt concrete got by burning out a bitumen matrix. A standard method was also used to determine the specific energy of destruction of bitumen bonds when determining the fracture disruption resistance of a sample in tension while splitting.

Results. As a result of sieving, granulometric curves of the composition of asphalt concrete granulate and stone fraction were obtained. Calculation methods have determined the components of energy consumption for the formation of new surfaces made from asphalt concrete granulate and new surfaces from stone fraction.

Discussion and conclusion. At the end of the study, quantitative ratios of various fractions of asphalt concrete granulate of stone-mastic asphalt concrete formed during milling, as well as the crushing grade of stone fractions, were obtained. The specific energy consumption during the milling of asphalt concrete has been determined. It was found that the largest part of the energy during milling (64.7% for this study) is needed for the destruction of bitumen bonds. The vast majority of this energy is used for the formation of the fine granulate fraction. An insignificant part of the energy is spent on the destruction of the stone fraction. In general, the share of energy consumption aimed at the formation of new surfaces accounts for this study 66.14% of the total energy costs. The research development prospects of granulometric analysis for evaluating the effectiveness of the asphalt concrete milling process have been noted.

KEYWORDS: asphalt concrete, granulate, specific energy, granulometric curve, bitumen bonds, road milling cutter

The article was submitted: 05.11.2024 approved after reviewing: 21.11.2024; accepted for publication: 16.12.2024.

All authors have read and approved the final manuscript.

Financial transparency: the authors have no financial interest in the presented materials or methods. There is no conflict of interest.

For citation. Furmanov D.V., Budanova E.S. Efficiency evaluation of the milling process based on the granulometric analysis of crushed stone-mastic asphalt concrete granulate. *The Russian Automobile and Highway Industry Journal*. 2024; 21 (6): 852-866. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2024-21-6-852-866

© Furmanov D.V., Budanova E.S., 2024



Content is available under the license Creative Commons Attribution 4.0 License.



введение

По оценочным данным. до 10% мирового потребления энергии используется для измельчения различных материалов [1]. Эффективность процесса измельчения строительных материалов для различных условий существенно отличается. Так, коэффициент полезного действия роторных дробилок составляет 0,75-0,8 [2]. В то же время помол цементного клинкера осуществляется с коэффициентом полезного действия, соответствующему значению 0,009-0,0098 [3]. Даже незначительное повышение эффективности процессов измельчения в промышленности приведет к большой экономии энергоресурсов. Однако принципы, на которых работают современные машины для измельчения материалов. заложенные еще более 100 лет назад, и во многих отраслях остаются неизменными до сих пор [4].

Это обстоятельство не обошло стороной и рабочий процесс удаления асфальтобетонных покрытий. Конструкции роторов и режущих элементов горнодобывающих машин без существенного изменения реализованы в рабочих органах дорожных фрез по сей день.

Удаление старого асфальтобетонного покрытия - важная технологическая операция, выполняемая при ремонте дороги. Дорожные фрезы, используемые для этих целей, являются сложными машинами, обладающими большой мощностью, а сам процесс фрезерования, безусловно, обладает высокой энергоемкостью [5]. Снижение затрат энергии рабочего процесса фрезерной машины хотя бы на 10-15% приведет к значительному снижению расхода топлива, вредных выбросов в атмосферу, а также снижению текущих и капитальных затрат. Однако достижение такого результата невозможно без тщательного изучения работы режущего инструмента дорожной фрезы, взаимодействующего с материалом.

Отметим, что рабочий процесс фрезерования асфальтобетона с энергетической точки зрения исследован достаточно слабо. Среди существующих работ можно выделить исследования [6], посвященные изучению особенностей работы эксцентричной дорожной фрезы.

Научный и практический интерес представляют так же результаты исследований рабочего процесса фрезерования асфальтобетона с использованием метода дискретных элементов, предложенный еще в семидесятых годах прошлого столетия, но получивший реализацию только в последнее время в связи с развитием вычислительных ресурсов [7]. К таким работам можно отнести исследования [8, 9, 10, 11].

Асфальтобетон с точки зрения рабочего процесса дорожной фрезы является сложным многокомпонентным композитным материалом. Сопротивляемость резанию режущими элементами дорожных фрез невозможно оценить каким-либо единым показателем прочности. На энергоемкость и характер процесса фрезерования влияют структурные свойства материала, а именно прочность компонентов асфальтобетона, прочность связей между отдельными компонентами, структура материала, его гранулометрический состав и температура.

Работа сил сопротивления резанию единичным режущим элементом фрезерной машины в общем случае затрачивается на:

 преодоление сил трения между режущим элементом и материалом;

 перемещение и сдвиг элементов материала;

– внутреннее трение частиц асфальтобетона;

 – линейное и угловое ускорение отделенных и измельченных частиц асфальтобетона;

 накопление и рост дефектов в уже измельченных частицах;

 уплотнение материала и отдельных конгломератов;

 разрушение битумных связей между структурными компонентами асфальтобетона;

 измельчение (дробление) отдельных каменных фракций асфальтобетона.

С точки зрения механики измельчения материала только две последние составляющие затрат энергии являются полезными. Однако и эти затраты необходимо снижать путем увеличения размеров фракций, если не предъявляются специальные требования к фракционному составу асфальтобетонного гранулята.

Таким образом, коэффициент полезного действия рабочего процесса фрезерования можно рассматривать как отношение работы, затраченной на образование новых поверхностей при измельчении материала А_и к полной энергии, затраченной на процесс фрезерования единичного объема Е:

$$\eta = \frac{A_{\rm H}}{E} \,. \tag{1}$$

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В процессе фрезерования асфальтобетона разрушаются не только битумные связи между зернами минерального заполнителя, но и сам минеральный заполнитель. Поэтому для оценки энергетических характеристик рабочего процесса необходимо исследовать фракционный состав асфальтобетонного гранулята и отдельно фракционный состав щебня образцов асфальтобетона до фрезерования и после.

Наиболее распространенным подходом к исследованию энергетических характеристик процесса измельчения является расчет необходимой работы А₁, затраченной на образование новых поверхностей. Для случая разрушения битумных связей между структурообразующими компонентами материала ее значение можно определить соотношением

$$A_1 = k_1 \cdot (S_1 - S_0), \tag{2}$$

где *k*₁ – удельная энергия разрушения битумных связей;

S₀ – площадь поверхности до измельчения; S₁ – суммарная площадь вновь образованных поверхностей асфальтобетонного гранулята после измельчения.

В указанном выражении значение S₀ необходимо принять равным нулю ввиду отсутствия гранулята как такового до фрезерования.

Также представляет интерес гранулометрический состав каменной фракции асфальтобетона до и после фрезерования. Эта информация позволит обосновать энергетические характеристики рабочего процесса фрезерования в части затраченной энергии на образование новых поверхностей каменной фракции. Отдельно для этого материала можно записать аналогичное уравнение для нахождения работы разрушения А₂:

$$A_2 = k_2 \cdot (S_3 - S_2), \tag{3}$$

где k_2 – удельная энергия образования новых поверхностей щебня при разрушении;

S_{3, 2} — суммарная площадь поверхностей каменной фракции до и после процесса фрезерования (в массиве асфальтобетона и в грануляте).

Предложенный впервые в работах Риттингера эмпирический метод определения необходимой энергии, затраченной на дробление материала, в дальнейшем подтвердил право на свое существование в фундаментальных исследованиях механики хрупкого разрушения Гриффитса, Орована и Ирвина [12, 13, 14]. Согласно этим представлениям, упругая часть энергии, запасенная в материале, в процессе хрупкого разрушения затрачивается на преодоление сил, связывающих структурные элементы материала между собой. Удельная работа этих сил, затрачиваемая на образование трещины некоторой площади, называется вязкостью разрушения. Эта энергия близка по своей сущности к показателю k_2 , однако обе величины определяются различными экспериментальными методами, несмотря на то, что имеют одинаковую размерность.

Соответственно, полезная работа, затраченная на фрезерование асфальтобетона, может быть определена как сумма двух работ:

$$A_{\mu} = A_1 + A_2. \tag{4}$$

Определение площади поверхностей S_1 , S_2 и S_3 требует проведение экспериментальных исследований. Для решения этой задачи необходимо определять гранулометрический состав материала методом просеивания. Достаточно точное определение площади новых поверхностей может быть выполнено соотношением [15]:

$$S = a \cdot d^n, \tag{5}$$

где *а* – эмпирический коэффициент и *n* – показатель степени, зависящие от свойств материала.

Показатель удельной энергии k_2 определяется экспериментально. Его значение для нерудных материалов предложено в ряде работ [16, 17], связанных с исследованием процессов дробления каменных материалов. В последней работе указано значение показателя удельной энергии 140 Дж/м² для гранита. Отметим, что принятые для расчета параметров дробильных машин значения удельной энергии на порядок отличаются от показателей вязкости разрушения для подобных материалов, определенные экспериментальными методами и показанные в соответствующих работах¹ [18].

Что же касается энергии, затраченной для разрыва битумных связей с образованием новых конгломератов и зерен, то ее удельные показатели могут быть также определены экспериментально. Методически апробирован-



¹Эшби М., Джонс Д. Конструкционные материалы. Полный курс: учебное пособие. Перевод 3-го английского издания. Долгопрудный: Издательский Дом «Интеллект», 2010. 672 с

ный способ определения данного показателя предложен национальным стандартом Российской Федерации². С этой целью готовится образец асфальтобетона и производится его разрушение по схеме Маршала. По той же схеме определяется предел прочности на растяжение при расколе.

Работа по разрушению образца А_{об} определяется соотношением

$$A_{\rm o6} = \frac{F \cdot l}{2},\tag{6}$$

где *F* – разрушающая нагрузка, кН;

 I – максимальная деформация образца до разрушения, мм.

Удельную энергию на разрушение битумных связей, с учетом неравномерной формы образуемой поверхности на образце, получим в следующем виде:

$$k_1 = \frac{A_{\rm o6}}{2 \cdot D \cdot b \cdot a_{\rm cp}},\tag{7}$$

где D и b – диаметр и толщина образцов;

*a*_{ср} – усредненное значение коэффициента формы поверхности.

Оценка степени дробления минерального заполнителя в процессе холодного фрезерования осуществлялась с верхнего слоя покрытия участка Москва–Ярославль автодороги М8 «Холмогоры». Покрытие ранее было устроено в 2008 г. из асфальтобетонной смеси марки ЩМА-15.

Гранулят асфальтобетона подвергался предварительному рассеиванию ситами стандартных размеров³ с круглыми ячейками, установленных на виброплощадке (рисунок 1, а). Рассев производился на ситах с ячейками 31,5, 22,4, 16, 11,2, 4 и 2 мм.

После определения гранулометрического состава формировался зерновой состав минеральной части исходных образцов асфальтобетона. Исследовались образцы неподверженных дроблению каменной фракции при фрезеровании и фрезерованного асфальтобетонного гранулята. Определение зернового состава минеральной части смеси производилось методом выжигания рассева¹ в муфельной печи, разогретой до температуры 500 °С (рисунок 1, б).

Рассев каменных фракций образцов асфальтобетона осуществлялся на ситах с последующим взвешиванием навесок на лабораторных весах (рисунок 1, в). Использовался набор сит с размерами ячеек 20, 15, 10, 5, 3,0, 1,25, 0,63, 0,315 и 0,16 мм.

Определение удельных показателей энергии, затраченной на разделение битумных связей, задавалось на лабораторном прессе ПГМ-100МГ4А при разрушении образца щебеночно-мастичного асфальтобетона стандартных размеров по схеме Маршала (рисунок 1, г).

Для определения эффективности процесса резания режущим элементом дорожной фрезы требуются значения затраченной энергии. Ответы на эти и некоторые другие вопросы помогут дать результаты экспериментальных исследований по резанию асфальтобетона единичным режущим элементом дорожной фрезы на маятниковом стенде [19, 20], опубликованные ранее.

В указанных работах приведены уравнения регрессии для определения значений усредненных сил сопротивления резанию асфальтобетона единичным режущим элементом для различных типов асфальтобетона. Для определения сил сопротивления резанию щебеночно-мастичных асфальтовых бетонов рекомендована зависимость [13]:

$$F_{\rm cp\ x} = 900,38 \cdot h^{0,4524} \cdot t^{-0,0758},\tag{8}$$

где *h* – глубина срезаемой стружки, мм;

t – температура асфальтобетона, град. С.

Ценность представленных данных в ракурсе настоящего исследования заключается в использованной методике, которая предполагает определение значений средних сил сопротивления резанию на основе анализа экспериментально полученных значений работы сил сопротивления резанию.

Отметим, что сила сопротивления резанию в выражении (9) нелинейно зависит от толщины срезаемой стружки. Следовательно, затрачиваемая работа и эффективность рабочего процесса будут являться функцией толщины срезаемого слоя

³ ГОСТ 51568–99. Сита лабораторные из металлической проволочной сетки. Технические условия. М.: Госстандарт России, 1999. 8 с.



² ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. М.: Госстрой России, 1999. 67 с.

TRANSPORT, MINING AND MECHANICAL ENGINEERING

а б 100 2 6 ВЕСЫ ЛАБОРАТОРНЫЕ ВЛГ-МГ4 0

> Рисунок 1 – Лабораторные исследования характеристик асфальтобетона: а – рассев материала на виброплощадке с использованием набора сит; б – выжигание битума из асфальтобетонного гранулята в муфельной печи; в – взвешивание отдельных фракций минеральных зерен на лабораторных весах; г – определение работы растяжения при расколе стандартных образцов асфальтобетона Источник: составлено авторами.

> > Figure 1 – Laboratory studies of asphalt concrete characteristics. a – material screening on a vibrating platform using a set of sieves; b – burning out bitumen from asphalt concrete granulate in a muffle furnace; c – weighing individual fractions of mineral grains on laboratory scales; d – determining the tensile work during splitting standard samples of asphalt concrete. Source: compiled by the authors

857



Рисунок 2 – Аппроксимация контура профиля сечения срезаемой стружки асфальтобетона Источник: составлено авторами.

Figure 2 – Section profile contour approximation of the cut-off asphalt concrete chips Source: compiled by the authors.

$$dE = F_{\rm cp\,x} \cdot ds, \tag{9}$$

где *ds* – элементарное перемещение режущего элемента по своей траектории движения в процессе фрезерования.

Достаточно трудно оценивать эффективность процесса фрезерования асфальтобетона, учитывая, что эффективность процесса резания отдельным резцом меняется от врезания в материал до его выхода из него.

Профиль сечения стружки удобно аппроксимировать кривой второго порядка (рисунок 2). Согласно материалам исследований [19], по характерным точкам профиля можно построить уравнение регрессии

$$y = 0,0344 \cdot x^2, \tag{10}$$

где *у* и *х* – оси координат.

Интегрируя полученное выражение относительно у, получим функцию площади сечения стружки S_с как удвоенную площадь под ветвью кривой x = f (y):

$$S_c = 2 \cdot \int_0^h 5,39 \cdot y^{\frac{1}{2}} dy.$$
 (11)

Решением указанного интеграла будет выражение

$$S_c = 7,19 \cdot h^{1,5}. \tag{12}$$

Приращение удельной работы резания материала (работу, приведенную к единице срезаемого объема V) определим соотношением

$$A_{\rm yg} = \frac{dE}{dV}.$$
 (13)

Раскрыв указанное выражение, получим

$$A_{\rm yg} = \frac{F_{\rm cp\,x} \cdot ds}{S_c \cdot ds} = \frac{F_{\rm cp\,x}}{S_c}.$$
 (14)

Указанная зависимость очень легко может привести к заблуждению с учетом того, что величина площади как функция толщины срезаемой стружки получена в миллиметрах и, не смотря на размерность, выраженную в квадратных миллиметрах, является степенной функцией (12) с показателем степени 1,5. Размерности по обеим сторонам указанного выражения не совпадают. Это не приводит к метрологической несостоятельности выражения, однако следует соблюдать аккуратность в вычислениях. В числителе необходимо получить энергию, выраженную в Джоулях, и приращение перемещения по траектории резца ds c этой целью выражается также в метрах. В знаменателе нужно получить объем срезаемого материала, который выражается в кубических метрах. С этой целью итоговое выражение необходимо поделить на 10³ и умножить на 10⁹.

С учетом сопротивляемости резанию рассматриваемого материала, подставив в итоговое выражение зависимости (8) и (12), получим

$$A_{\rm yg} = 125.3 \cdot 10^6 \cdot h^{-1.048} \cdot t^{-0.0758},\tag{15}$$

где толщина срезаемой стружки *h* выражена в миллиметрах, а получаемое значение удельной энергии выражается в Дж/м³.

Таким образом, удельная энергия обратно пропорциональна толщине срезаемой стружки для выбранного материала и выбранной схемы резания. Такой вывод хорошо иллюстрируется графиками, которые отражают влияние толщины срезаемой стружки на силы сопротивления резанию и удельную энергоемкость процесса фрезерования, рассчитанные для температура асфальтобетона ЩМА-15 при температуре 20 °C (рисунок 3).







Figure 3 – Graphs of the dependence of the cutting resistance force of asphalt concrete (a) and the specific energy capacity (b) depending on the thickness of the cut chips for the given experimental conditions. Source: compiled by the authors.

При малой толщине срезаемой стружки показатель удельной энергоемкости асимптотически стремится к бесконечности, и говорить о какой-нибудь эффективности рабочего процесса вообще не приходится.

Опираясь на представленный методический материал, возможно определение коэффициента полезного действия процесса фрезерования, однако оговорим ряд условий, для которых эти результаты будут справедливы, и введем некоторые допущения:

 определение коэффициента полезного действия и общая оценка эффективности процесса фрезерования производится для асфальтобетона марки ЩМА-15 при температуре фрезерования 20 °C; коэффициент полезного действия определяется как отношение затрат энергии, необходимых для формирования новых поверхностей при дроблении каменной фракции и разрушении битумных связей между отдельными частицами и конгломератами асфальтобетона к полной энергии, затрачиваемой на фрезерование единичного объема;

 определение полной энергии, затрачиваемой на фрезерование единичного объема, определено экспериментально на стенде маятникового типа в процессе резания единичным режущим элементом асфальтобетона марки ЩМА-15;

 удельные затраты энергии на образование новых поверхностей, связанных с раз-



рывом битумных связей между отдельными частицами и конгломератами, определены экспериментально как отношение работы затраченных сил на разрушение стандартного образца при расколе к площади поверхности раскола;

 удельные затраты энергии на образование новых поверхностей при дроблении каменной фракции имеют фиксированные значения и определяются как справочные данные, представленные для вулканических и излившихся пород;

 определение площади новых образованных поверхностей производится на основе анализа гранулометрического состава.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Каменная фракция асфальтобетона в процессе фрезерования неизбежно подвергается дроблению. Это хорошо заметно по характеру гранулометрической кривой, показанной на рисунке 4, полученной путем рассева зернового состава щебня после выжигания битума. На графике заметно количественное увеличение средней и мелкой фракций за счет уменьшения крупной. Количественная оценка площади новых поверхностей (таблица 1) различных фракций щебня производится на основе разности с использованием зависимости (5).

Суммарная площадь новых поверхностей щебня, приведенная к одному кубическому метру материала для данного исследования, соответствует 3811,3 м² на один кубический метр измельченного материала. Расчет доли удельных затрат энергии, направленных только на измельчение щебня, показывает значение A₂ = 552,6 кДж/м³. Это не очень большие показатели затрат энергии в сопоставлении с реализуемой механической энергией существующих дорожных фрез.



Размер фракции, мм

Рисунок 4 – Суммарные кривые гранулометрического состава каменной фракции исходного материала и фрезерованного гранулята Источник: составлено авторами.

> Figure 4 – Summery curves of the stone fraction granulometric composition of the starting material and milled granulate Source: compiled by the authors.



Учет площади новых поверхностей асфальтобетонного гранулята необходимо производить с учетом того, что часть этих поверхностей образована поверхностями дробленого щебня. С учетом этого площадь новых поверхностей асфальтобетонного гранулята необходимо рассчитывать в виде

$$S_1 = S_c - (S_3 - S_2), \tag{16}$$

где S_c – полная (суммарная) площадь новых поверхностей всех фракций асфальтобетонного гранулята.

Анализ суммарной гранулометрической кривой фрезерованного гранулята (рисунок 5) показывает нелинейное распределение различных фракций по степени измельчения. Беглый взгляд на результаты рассева гранулята

(таблица 2) позволяет сделать вывод о том, что наиболее представительными фракциями являются зерна гранулята с размерами от 4 до 16 мм, что и определяется размерами каменной фракции асфальтобетона. Большие размеры зерен гранулята являются конгломератами из нескольких зерен каменной фракции с не разрушившимися битумными связями.

Однако любопытно, что фракции менее четырех и особенно менее двух миллиметров, которые от общей массы составляют не более 10%, образуют наибольшую удельную площадь новой поверхности. Можно ожидать, что значительная часть энергии процесса фрезерования расходуется именно на образование этой, совершенно ненужной даже для вторичного использования, фракции.

Таблица 1

Результаты рассева каменной фракции исходного образца материала и фрезерованного асфальтобетонного гранулята, полученного после выжигания образцов Источник: составлено авторами.

Table 1

861

Stone fraction sieving results of the initial material sample and milled asphalt concrete granulate obtained after burning the samples. Source: compiled by the authors.

Размер сита, мм	Полные проходы образца № 1, %	Полные проходы образца № 2, %	Разность (степень измельчения, %)	Средний размер фракции, мм	Удельная поверхность соответствующей фракции, м²/кг	Расчетная площадь новых поверхностей на один м ³ материала, м ² /M ³
20	100	100	0	17,5	0,320	-
15	88,77	87,14	-1,63	12,5	0,458	-
10	59,86	62,42	2,56	7,5	0,789	48,5
5	30,89	34,31	3,42	4	1,542	126,6
3	23,58	27,48	3,9	2,125	3,024	283,1
1,25	19,95	23,81	3,86	0,94	7,209	667,9
0,63	17,39	20,73	3,34	0,4725	14,99	1202,3
0,315	13,1	15,08	1,98	0,2375	31,20	1482,9
0,16	8,35	8,19	-0,16	0,08	99,42	-



Размер фракции, мм

Рисунок 5 – Кривая гранулометрического состава асфальтобетонного гранулята Источник: составлено авторами.

> Figure 5 – The granulometric composition curve of asphalt concrete granulate. Source: compiled by the authors.

Таблица 2

Результаты рассева асфальтобетонного гранулята и расчетные значения удельных значений площади поверхности материала для различных фракций Источник: составлено авторами.

Table 2

Asphalt concrete granulate sieving results and calculated data of specific values of the material surface area for various fractions Source: compiled by the authors.

Размер сита, мм	Полные проходы, %	Средний размер фракции, мм	Частные остатки, %	Удельная поверхность соответствующей фракции, м²/кг	Расчетная площадь новых поверхностей гранулята на 1 м ³ асфальтобетонной смеси
31,5	100	26,95	14	0,202	465,0
22,4	86	19,2	19	0,29	667,3
16	67	13,6	27	0,4189	963,4
11,2	40	7,6	30	0,778	1790,4
4	10	3	5	2,095	4818,3
2	5	1	5	6,75	15525

Суммарная удельная площадь поверхности гранулята, согласно таблице 2, соответствует значению 24,23·10³ м²/м³. С учетом формулы (16) значение удельной площади асфальтобетонного гранулята, образованной только разрушением битумных связей, равно 20,42·10³ м²/м³.

Для определения энергии на разрушение битумных связей были испытаны три стандартных образца диаметром 71,4 мм и длиной 71,4 мм на разрушение при расколе (см. рисунок 1, г). Результаты испытаний представлены в таблице 3. Удельная энергия рассчитана для значения усредненного коэффициента формы поверхности а_{со} = 2,1.

Полученное таким образом в ходе эксперимента значение энергии, затрачиваемой на образование новой поверхности единичной площади, получается на порядок (почти в 9 раз) выше, чем при дроблении каменной фракции.

Таблица 3

Результаты испытания образцов на растяжение при расколе и расчетные значения удельной энергии на разрушение битумных связей Источник: составлено авторами.

Table 3

Samples' tensile testing results during splitting and calculated values of specific energy for the destruction of bitumen bonds Source: compiled by the authors.

Образец	Разрушающая сила, Н	Предельная деформация образца, мм	Работа на разрушение образца, Дж	Удельная работа Дж/ м²
1	18177	1,495	13,59	1269,2
2	18715	1,419	13,28	1240,3
3	18123	1,57	14,23	1328,9
среднее значение	18338	1,494667	13,70	1279,4

Таблица 4

Структура удельных затрат энергии при фрезеровании асфальтобетона Источник: составлено авторами.

Table 4

The structure of specific energy consumption in asphalt concrete milling Source: compiled by the authors.

Удельная энергия,					%
затрачиваемая на рабочий процесс	затрачиваемая на образование новых поверхностей	затрачиваемая на разрушение каменной фракции		0,5526	1,37
фрезерования асфальтобетона в целом		затрачиваемая на разрушение битумных связей	образование гранулята, размером более 4 мм (90% по массе)	4,19	10,3
			образование гранулята, размером менее 4 мм (10% по массе)	21,93	54,4
			сумма	26,1	64,7
		сумма		26,65	66,14
	затрачиваемая на другие процессы				33,86
	суммарная				100

Для усредненного значения толщины срезаемой стружки, значение которого было принято 2,5 мм, приведем сравнительный анализ затрат энергии в процессе фрезерования асфальтобетона (таблица 4).

Ввиду существенной количественной разницы затрачиваемой энергии на разрыв битумных связей при образовании частиц более и менее четырех миллиметров эти затраты приведены отдельно и суммарно.

Энергия, необходимая для образования новых поверхностей в материале, составляет 6,14 % от полных затрат энергии. Эту величину отметим как коэффициент полезного действия, рассчитанный по формуле (1) и выраженный в процентах. Однако еще раз оговоримся, что поскольку для задачи удаления материала не требуется большой степени измельчения, указанное значение коэффициента полезного действия не может в полной мере характеризовать эффективность рабочего процесса фрезерования.

ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Гранулометрическое исследование материала позволило получить ряд относительно



новых и, возможно, неожиданных результатов, которые позволяют рассмотреть рабочий процесс фрезерования асфальтобетона с других позиций и выявить пути совершенствования рабочих органов фрезерных машин. Еще раз отметим, что все результаты исследования относятся только к щебеночно-мастичным асфальтобетонам, имеющим выраженную контактную структуру. Для других типов асфальтобетонов возможно получение иных результатов.

Перечислим некоторые важные выводы:

 каменная фракция асфальтобетона подвергается разрушению в процессе фрезерования;

 в процессе разрушения каменной фракции происходит увеличение содержания частиц щебня, размером от 0,3 до 10 мм за счет разрушения более крупной фракции;

 – разрушение битумных связей при фрезеровании асфальтобетона приводит к образованию асфальтобетонного гранулята, в котором более всего представлены фракции с размерами 4–16 мм;

– удельная энергия на разрушение битумных связей между зернами асфальтобетона существенно выше удельной энергии, необходимой для разрушения каменного наполнителя, несмотря на то, что прочность щебня (особенно применяемого для щебеночно-мастичного асфальтобетона) существенно выше структурной прочности асфальтобетона и тем более битумных пленок. Таким образом, решение задачи обоснования энергетических параметров фрезерных машин не может быть решено только на основе определения прочностных показателей материала;

 доля затрат энергии, направленной на разрушение каменной фракции при фрезеровании материала, относительно не велика, и в данном исследовании составила всего 1,37% от общих затрат энергии;

 наибольшая часть энергии в процессе фрезерования приходится на разрушение битумных связей в асфальтобетоне. В данном исследовании эта часть энергии составляет 64,7% от общих затрат энергии;

 следует отметить, что более половины всей энергии, затрачиваемой на рабочий процесс фрезерования, приходится на разрушение битумных связей с образованием гранулята размером до 4 мм. При этом его масса не превышает 10% от общей массы гранулята. Существенное повышение эффективности процесса фрезерования возможно при количественном снижении этой фракции; потери энергии на трение, уплотнение, перемещение частиц и других процессов, не связанных с образованием новых поверхностей, являются также значимыми и в данном исследовании составляют 33,86%;

– более 80% от общей энергии, затрачиваемой на процесс фрезерования, затрачивается на процессы чрезмерного измельчения материала и на процессы, не связанные напрямую с измельчением асфальтобетона. Совершенствование конструкций отдельных режущих элементов и рабочих органов дорожных фрез, позволяющее снизить значение этого показателя, имеет существенный экономический, экологический и социальный потенциал.

Гранулометрическое исследование материала как инструмент косвенной оценки эффективности рабочего процесса фрезерования асфальтобетона является перспективным методом. Безусловно, такой анализ требуется провести для оценки эффективности фрезерования других представительных марок асфальтобетона.

Определение энергетической эффективности рабочего процесса фрезерования на основе гранулометрического исследования может послужить дешевым и оперативным методом оценки технического состояния машины в целом, а также методом оценки конструкции рабочего органа и эффективности выбора технологических режимов ее работы.

список источников

1. Сиваченко Л.А., Сиваченко Т.Л. Технологическое машиностроение – инновационный резерв мировой экономики: монография. Могилев: Белорус.-Рос. ун-т, 2017. 254 с.: ил.

2. Власенко Д.А., Левченко Э.П. Математическое моделирование и повышение эффективности ударных роторных дробилок с комбинированным подвесом молотков: монография. Алчевск: ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ», 2020. 143 с.

3. Шевченко А.Ф. Пути интенсификации процесса помола цемента // Вопросы химии и химической технологии. 2008. № 5. С. 129–137.

4. Сиваченко Л.А. Современное технологическое машиностроение: резервы развития // Инженер-механик. 2011. № 1. С. 11–21.

5. Сахапов Р.Л., Махмутов М.М. Влияние исследуемых факторов на мощность фрезерования // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2015.Т. 17, №2 (4). С 896–899.

6. Карошкин А.А., Краснолудский А.В. Определение энергоемкости процесса фрезерования фрезой со сложным движением зуба // Изв. ТулГУ. Подъемно-транспортные машины и оборудование. Тула, 2003. Вып. 4. С.167–173. 7. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive largescale movements in blocky rock systems. In: Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics, v.1, Nancy: France; 1971. Paper No. II–8

8. Liqun Zhou, Yi Liu, Zhennan Wang et al. Numerical analysis of asphalt concrete milling process based on multicomponent modeling, 09 July 2020, PREPRINT (Version 1) available at Research Square [https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-39326/v1].

9. Petrescu MG, Dumitru T, Laudacescu E, Tănase M. Experimental Investigation and Numerical Analysis Regarding the Influence of Cutting Parameters on the Asphalt Milling Process. Materials (Basel). 2024 Jul 13; 17(14): 3475. doi: 10.3390/ma17143475. PMID: 39063767; PMCID: PMC11278129.

10. Dumitru, T.; Petrescu, M.G.; Tănase, M.; Ilincă, C.N. Multi-Response Optimization Analysis of the Milling Process of Asphalt Layer Based on the Numerical Evaluation of Cutting Regime Parameters. Processes 2023, 11, 2401. https://doi.org/10.3390/pr11082401.

11. Wu, J., Zhang, B., Wu, C., Shu, Z., Li, S. et al. (2021). Discrete element simulation of asphalt pavement milling process to improve the utilization of milled old mixture. Journal of Renewable Materials, 9(5), 993–1011. https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014304

12. Griffith A.A. The theory of rupture. Proc. Ict. Int. Congr. Appl. Mech // Delft. 1924. p. 55–63.

13. Orowan E. Fracture and strength of solids. Repts. Progn. Phis., 1948. 49. № 12. p. 185–232.

14. Irwin G.R. Analysis of stresses and straines near the end of crack travers-ing a plate // J. Appl. Mech. 1957. Vol. 24. № 3. 1957. P. 361–364.

15. Романюк В.Н. Эксергия асфальтобетонной смеси. Энергетика // Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2003; (4): 69–76. https://doi.org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76

16. Симонов П.С. Экспериментальное исследование дробления горной породы единичным ударом // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2020. № 1. С. 71–79. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.

17. Голик В.И. [и др.]. Исследование свойств горных пород при дроблении и измельчении в механических мельницах // Известия УГГУ. 2021. Вып. 2 (62). С. 81–87. DOI 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87

18. Винников В.А., Павлов И.А. Изменение коэффициента трещиностойкости горных пород при умеренном тепловом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2024. № 3. С. 5–16. DOI: 10.25018/0236-1493-2024-3-0-5.

19. Фурманов Д.В., Чижов В.С., Лысаков Н.Э. Экспериментальное определение сил сопротивления резанию при разрушении асфальтобетона единичным режущим элементом // Вестник СибАДИ. 2020; 17(2): 196–207. https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207

20. Фурманов Д.В., Лысаков Н.Э., Шамахов Л.М. Экспериментально-аналитическое обоснование процесса резания асфальтобетонов рабочим оборудованием дорожной фрезы // Вестник СибАДИ. 2022; 19(2): 170–182. https://doi. org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182

REFERENCES

1. Sivachenko L.A., Sivachenko T.L. *Technological mechanical engineering – the innovative reserve of the world economy: monograph*. Mogilev: Belarusian. Russian University, 2017: 254. (Russ.)

2. Vlasenko D.A., Levchenko E.P. Mathematical modeling and increasing the efficiency of impact rotary crushers with combined suspension of hammers: monograph. Alchevsk: State Educational Institution of the LPR "DonGTU", 2020: 143. (Russ.)

3. Shevchenko A.F. Ways to intensify the cement grinding process. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2008; 5: 129–137. (Russ.)

4. Sivachenko L.A. Modern technological engineering: reserves of development. *Mechanical engineer*. 2011; 1: 11–21. (Russ.)

5. Sakhapov R.L., Makhmutov M.M. Influence of the studied factors on milling power. *Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2015; Volume 17, No. 2(4): 896–899. (Russ.)

6. Karoshkin A.A., Krasnoludsky A.B. Determination of the energy intensity of the milling process with a milling cutter with a complex tooth movement. *Izvestiya Tula State University (Izvestiya TulGU) Lifting and transport machinery and equipment.* Tula. 2003; Issue 4: 167–173. (Russ.)

7. Cundall P.A. A computer model for simulating progressive largescale movements in blocky rock systems. In: *Proceedings of the Symposium of International Society of Rock Mechanics*, v.1, Nancy: France; 1971. Paper No. II–8

8. Liqun Zhou, Yi Liu, Zhennan Wang et al. Numerical analysis of asphalt concrete milling process based on multicomponent modeling, 09 July 2020, PREPRINT (Version 1) available at Research Square. DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-39326/v1.

9. Petrescu MG, Dumitru T, Laudacescu E, Tănase M. Experimental Investigation and Numerical Analysis Regarding the Influence of Cutting Parameters on the Asphalt Milling Process. Materials (Basel). 2024 Jul 13; 17(14): 3475. doi: 10.3390/ma17143475. PMID: 39063767; PMCID: PMC11278129.

10. Dumitru, T.; Petrescu, M.G.; Tănase, M.; Ilincă, C.N. Multi-Response Optimization Analysis of the Milling Process of Asphalt Layer Based on the Numerical Evaluation of Cutting Regime Parameters. Processes 2023, 11, 2401. https://doi.org/10.3390/pr11082401.

11. Wu, J., Zhang, B., Wu, C., Shu, Z., Li, S. et al. (2021). Discrete element simulation of asphalt pavement milling process to improve the utilization of milled old mixture. Journal of Renewable Materials, 9(5), 993–1011. https://doi.org/10.32604/jrm.2021.014304

12. Griffith A. A. The theory of rupture. Proc. Ict. Int. Congr. Appl. Mech. *Delft*. 1924: 55–63.

13. Orowan E. Fracture and strength of solids. Repts. Progn. Phis., 1948; 49, № 12: 185–232.

14. Irwin G.R. Analysis of stresses and straines near the end of crack travers-ing a plate. *Mech.* 1957; Vol. 24. No 3: 361–364.



РАЗДЕЛ І ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

15. Romaniuk V.N. Exergy of Asphalt Concrete Mix. *ENERGETIKA*. *Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations*. 2003; (4): 69–76. (In Russ.) https://doi. org/10.21122/1029-7448-2003-0-4-69-76

16. Simonov P.S. Single-impact rock crushing experiment. MIAB. Mining Inf. Anal. Bull. 2020; (1): 71-79. ([In Russ). DOI: 10.25018/0236-1493-2020-1-0-71-79.

17. Golik V.I.et al. Research of the properties of rocks during fragmenting and crushing in mechanical mills. *News of the Ural State Mining University*. 2021; Issue 2(62): 81–87 (in Russ.) DOI 10.21440/2307-2091-2021-2-81-87

18. Vinnikov V. A., Pavlov I. A. Change in fracture toughness of rocks under moderate thermal effect. MIAB. *Mining Inf. Anal. Bull.* 2024; (3): 5–16. [In Russ]. DOI: 10.25018/ 0236-1493-2024-3-0-5

19. Furmanov D.V., Chizhov V.S., Lysakov N.E. Experimental determination of cutting resistance forces during destruction of asphalt concrete by a single cutting element. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2020; 17(2): 196–207. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2020-17-2-196-207

20. Furmanov D.V., Lysakov N.E., Shamakhov L.M. Experimental and analytical justification of the asphalt concrete cutting process by road milling machines working equipment. The Russian Automobile and Highway Industry Journal. 2022; 19(2): 170–182. (In Russ.) https://doi.org/10.26518/2071-7296-2022-19-2-170-182

ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ

Фурманов Д.В. Организация работы авторского коллектива, формирование направления и проблемы исследования, постановка задач и методики проведения исследования, подготовка материала статьи.

Буданова Е.С. Обзор предшествующих исследований, подготовка и проведение экспериментальных исследований, обработка полученных результатов, подготовка отдельных материалов для статьи.

COAUTHORS' CONTRIBUTION

Furmanov D.V. Organization of the author's team work, formulation of the research problem, the direction of study, tasks' setting, selection of the research methodology, preparing of the article material.

Budanova E.S. Review of previous surveys, preparation and conduction of experimental studies, processing of the obtained data, getting individual results for the article.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Фурманов Денис Владимирович – канд. техн. наук, доц. кафедры «Строительные и дорожные машины» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6932-6477, SPIN-код: 6237-2284.

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Буданова Екатерина Сергеевна — старший преподаватель кафедры «Инфраструктура и транспорт» Ярославского государственного технического университета (150023, г. Ярославль, Московский пр., 88).

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7962-0203, SPIN-код: 7600-9464.

INFORMATION ABOUT AUTHORS

Furmanov Denis V. – Cand. of Sci. (Eng.), Associate Professor of the Department of Construction and Road Machinery Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: https://orcid.org/0000-0002-6932-6477, **SPIN-code:** 6237-2284,

e-mail: denis_furmanov@mail.ru

Budanova Ekaterina S. – Senior Lecturer at the Department of Infrastructure and Transport Yaroslavl State Technical University (88, Moskovskii Proezd, Yaroslavl, 150023).

ORCID: https://orcid.org/0009-0006-7962-0203, **SPIN-code:** 7600-9464.