

МИНЕРАЛЬНЫЙ ПОРОШОК НА ОСНОВЕ ТВЕРДЫХ ОТХОДОВ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Енджиевская¹ И.Г., Галкин² М.А., Демина³ А.В., Клиндух⁴ Н.Ю., Гофман⁵ О.В.

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», инженерно-строительный институт,
660041, Красноярск, пр. Свободный, 82,
E-mail: ¹icaend@mail.ru; ²gal.maksim2014@yandex.ru; ³nastia_95@mail.ru; ⁴NKlindukh@sfu-kras.ru;
⁵oksana_slakova@mail.ru

Аннотация. Одним из факторов увеличения негативного воздействия на окружающую среду являются суммарные объемы образования отходов на фоне низкого уровня их переработки. В статье представлены исследования твердого отхода промышленного производства АО «РУСАЛ Красноярск» - лома кирпичной футеровки (ЛКФ) алюминиевых электролизёров, его химического и минералогического составов, с целью использования в производстве дорожно-строительных материалов в качестве минерального порошка. Полученный помол тонкодисперсный порошок ЛКФ изучен на соответствие требованиям ГОСТ по зерновому и химическому составу. Подобрано оптимальное соотношение смеси для марки минерального порошка МП-1 - тонкодисперсного ЛКФ и молотого известняка, соответствующее ГОСТ по полупроцентным окислам. Изучены гранулометрические составы тонкодисперсного отхода ЛКФ в сравнении с традиционным минеральным порошком из молотого известняка. На основе подобранной смеси минерального порошка получена асфальтобетонная смесь с повышенными физико-механическими характеристиками.

Предмет исследования: состав и свойства твердого отхода промышленного производства – лома кирпичной футеровки (ЛКФ) алюминиевых электролизёров АО «РУСАЛ» с целью дальнейшего использования в производстве минерального порошка МП-1 для повышения физико-механических свойств асфальтобетонной смеси и сокращения накопленных объемов твердых отходов промышленности, уменьшения площадей полигонов.

Материалы и методы: исследование выполнено с применением лазерного анализатора, рентгеновского дифрактометра и рентгенофлуоресцентного спектрометра.

Результаты: в ходе исследования были определены химический, гранулометрический и минералогический составы тонкодисперсного ЛКФ – твердого отхода промышленного производства АО «РУСАЛ Красноярск», что позволило усовершенствовать процесс диспергирования отхода в промышленной мельнице с применением интенсификаторов помола. С помощью лазерного анализатора определены гранулометрические составы тонкодисперсного ЛКФ и молотого известняка и проведен сравнительный анализ полидисперсности, который выявил более развитую поверхность минерального порошка на основе отхода промышленности, что очевидно связано с большей твердостью и хрупкостью частиц ЛКФ. Пленка нагара, присутствующая на всех элементах отхода ЛКФ, несколько повышает pH среды минерального порошка на основе тонкодисперсного ЛКФ, который при смешении с нефтяным битумом приводит к образованию прочной пленки на поверхности частиц, как в сухом, так и во влажном состоянии. Физико-механические характеристики уплотненной асфальтобетонной смеси типа Б марки П на основе подобранной смеси минерального порошка не уступают, и даже превосходят, аналогичные характеристики смеси на основе традиционного минерального порошка марки МП-1.

Выводы: Минеральный порошок марки МП-1 на основе твердого отхода промышленного производства АО «РУСАЛ Красноярск» - лома кирпичной футеровки (ЛКФ) алюминиевых электролизёров возможно использовать в производстве асфальтобетона с высокими физико-механическими характеристиками. Применение отходов ЛКФ в производстве дорожно-строительных материалов позволит сократить накопление отходов, уменьшить площади полигонов и улучшить экологическую обстановку города.

Ключевые слова: промышленные отходы, минеральный порошок, асфальтобетон, лом кирпичной футеровки.

ВВЕДЕНИЕ

Динамика основных экологических показателей развития России показывает на увеличение негативного воздействия на окружающую среду. Одним из факторов являются суммарные объемы образования отходов на фоне низкого уровня их переработки. В России на протяжении многих лет формировались экологически неблагоприятные полюса, особенно в регионах с развитой промышленностью, которая влияет на качество жизни людей, их здоровье и продолжительность жизни. К регионам с неблагоприятной экологической обстановкой относится Красноярский край, на территории которого развернуты интересы таких промышленных гигантов как АО «РУСАЛ Красноярск», ПАО «Норникель», АО «Полюс Красноярск». Конкретная деятельность промышленных компаний

в области защиты окружающей среды демонстрирует их ответственность за регион, город, в котором они работают.

Современным направлением в развитии промышленного производства являются безотходные и малоотходные технологии, которые обеспечивают полный жизненный цикл продукции. При наличии потребительских свойств, – возможности дальнейшего использования, – отход может изменять статус и становится материалом либо продукцией. Отходы IV-V класса опасности должны подвергаться необходимой технологической доработке, чтобы приобрести потребительские свойства. Игнорирование подобных мероприятий не позволяет отходу стать стабильным сырьем для повторного использования с возможностью перехода в стадию готовой продукции.

К одному из наиболее накапливаемых твердых отходов в Красноярском крае является лом

кирпичной и угольной футеровки алюминиевых электролизёров, которые занимают большие площади при утилизации. Годовое накопление таких отходов достигает объемов в 15 тыс. тонн в год. При этом наличие значительного количества примесей, образующихся в процессе эксплуатации, затрудняет возможность применения его в цементобетонных строительных материалах, поскольку твердение их связано со сложными процессами гидролиза и гидратации, на которые может негативно повлиять множество факторов.

Наибольшего потребления твердых промышленных отходов можно достичь в дорожно-строительных материалах в качестве дорожных одежд и минеральной части асфальтобетонов.

Поэтому поиск возможности переработки твердых отходов крупных предприятий с дальнейшим их комплексным использованием в производстве дорожно-строительных материалов является весьма актуальной задачей.

АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Индустрия строительных материалов уже сейчас способна использовать различные отходы промышленности, примеры, применения которых в отечественной и зарубежной практике.

В ряде зарубежных трудов применяют такие отходы как разный бытовой мусор, золы, мусор из глубин рек для отсыпки оснований дорог разного назначения, тем самым полностью или частично заменяя природные минеральные заполнители [2, 3, 4].

В трудах зарубежных исследователей такие отходы как летучая зола, диатомит и красный шлам сравнивают с традиционным известняковым порошком, сравнивая свойства асфальтобетонных смесей [5].

Достаточно широко в дорожно-строительных материалах применяют отходы резины, бытовых отходов, а также золы от сжигания углей [6, 7, 8].

Помимо неорганических отходов, так же набирает обороты применение полимерных отходов, таких как бытовой пластик, который вводят в состав неорганических вяжущих для их модификации [9, 10].

Так же при реконструкциях дорожных сетей старое асфальтобетонное покрытие становится промышленным отходом. Восстановленный асфальтобетон повторно используют в строительных целях [11].

Известны работы, где авторами используют отходы ЗФ ПАО «ГМК «Норильский никель» для улучшения свойств битума путём получения серобитумного вяжущего [12] и применение отвальных хвостов в виде минерального порошка и гранулированного шлака в качестве инертного заполнителя для асфальтобетона [13].

В работе Сомова В.В. исследовались отходы РУСАЛа, такие как угольная футеровка алюминиевых электролизёров, а также приведен обзор способов переработки [14].

Дефицит встречающихся в природе материалов, таких как минеральные компоненты, которые используются для производства асфальтовых бетонов, увеличивает стоимость дорожного строительства, что требует поиска альтернативных и устойчивых материалов [15, 16].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В работе исследовали возможность использования лома кирпичной футеровки (ЛКФ) в качестве минерального порошка (МП). Была получена лабораторная проба тонкодисперсного ЛКФ на лабораторной мельнице дисковой вибрационной для сверхтонкого помола. Затем в промышленных условиях в трапециевидной мельнице «МТМ» из 2-х тонн отхода была получена партия тонкодисперсного ЛКФ.

Для сравнения в работе использовали минеральный порошок на основе тонкодисперсного известняка Мазульского месторождения (традиционно используемый асфальтобетонными заводами г. Красноярска).

Порошковые рентгенограммы лома кирпичной футеровки снимали на рентгеновском дифрактометре D8-ADVANCE (фирма Bruker) при комнатной температуре. Длина волны излучения (CuK_α) равна $1,54\text{Å}$. Идентификация материалов проводилась с использованием информационно-поисковой системы (ИПС ФИ).

Химический состав лома кирпичной футеровки получали на рентгенофлуоресцентном спектрометре ARLOPTIM'X и традиционными нормативными методами.

Термическая устойчивость – определяли методами термогравиметрии и дифференциальной сканирующей калориметрии. Термограмма ЛКФ была получена на приборе синхронного термического анализа Jupiter STA 449 F1 (производитель NETZSCH, Германия). Нагревание проводили в интервале температур от $0(25)^\circ\text{C}$ до 1000°C со скоростью $10^\circ\text{C}/\text{мин}$. Масса исследуемой навески 20 мг.

Анализ примесей выполнялся на приборе спектрального анализа LabCenterXRF1800 (производитель Shimadzu, Япония).

Дисперсность минеральных порошков определяли на лазерном анализаторе «FRITSCH ANALYSETTE 22 MicroTec».

Наличие водорастворимых кислот и щелочей проводили на рН-метре – мод.НІ 8314. Для определения средней плотности, тонкодисперсный ЛКФ уплотняли в форме объемом 100 см^3 под нагрузкой 40 МПа.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ АНАЛИЗ

Одним из эффективных путей превращения твердых отходов в продукцию для расширения возможностей их использования в дорожной отрасли является помол, который переводит лом в

тонкодисперсное состояние с последующей доработкой до готовой продукции в виде минерального порошка (МП). Поскольку поверхность отхода – лома кирпичной футеровки покрыта черной пленкой - наличие примесей, которые накапливаются в значительном количестве на поверхности отработанного кирпича в процессе эксплуатации в виде нагара, могут повлиять на

свойства дорожного органического вяжущего, поэтому проводились исследования порошка ЛКФ, измельченного на лабораторной мельнице без пленки нагара, механически отделенного от поверхности и самой пленки. Результаты исследования нагара приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты спектрального анализа нагара
Table 1. Results of spectral analysis of carbon deposits

Элементы	Результат, %	Элементы	Результат, %	Элементы	Результат, %
Al ₂ O ₃	43,9381	MgO	0,1945	Cl	0,0262
Fe ₂ O ₃	19,0643	K ₂ O	0,1771	P	0,0224
Cr ₂ O ₃	12,1575	NiO	0,0700	BaO	0,0153
SiO ₂	11,7658	Co ₂ O ₃	0,0590	Ga ₂ O ₃	0,0107
C	7,3227	CuO	0,0461	As ₂ O ₃	0,0084
CaO	2,8542	ZnO	0,0416	ZrO ₂	0,0078
S	1,8765	V ₂ O ₅	0,0369	SrO	0,0047
TiO ₂	0,2647	PbO	0,0355		

Как видно из таблицы, в составе пленки присутствуют оксиды CaO 2,85% и MgO 0,19%, которые усиливают щелочную среду и увеличивают общее содержание основных оксидов CaO+MgO – активных соединений, значение которых в ЛКФ составило 0,46, что не превышает 3% по массе и соответствует требованиям ГОСТ. Повышенная

щелочная среда, образуемая присутствием нагара в ЛКФ, позволит обеспечить более прочное сцепление с нефтяным битумом.

Результаты определения химического и фазового состава ЛКФ, представлены в таблице 2 и на рисунке 1.

Таблица 2. Химический состав отхода лома кирпичной футеровки, % масс.
Table 2. Chemical composition of brick lining scrap waste, % mass

Al ₂ O ₃	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Fe ₂ O ₃	NiO	MnO ₂	ZnO	CuO	PbO	F ⁻
24,91	63,48	1,63	0,13	0,08	1,58	6,12	0,0013	0,005	0,005	0,0095	0,0006	2,04

Как видно из результатов таблицы 2, ЛКФ имеет в своём составе большое количество твердых оксидов – кремнезёма и глинозема, что необходимо учитывать при расчете времени помола в промышленной мельнице по отношению к карбонатным породам.

По данным рентгенофазового анализа (РФА) (рисунок 1, таблица 3) ЛКФ состоит в основном из муллита (81,05%), остальную его часть составляют минералы SiO₂ (кristобалит), SiO₂ (кварц), Fe₃O₄ (магнетит).

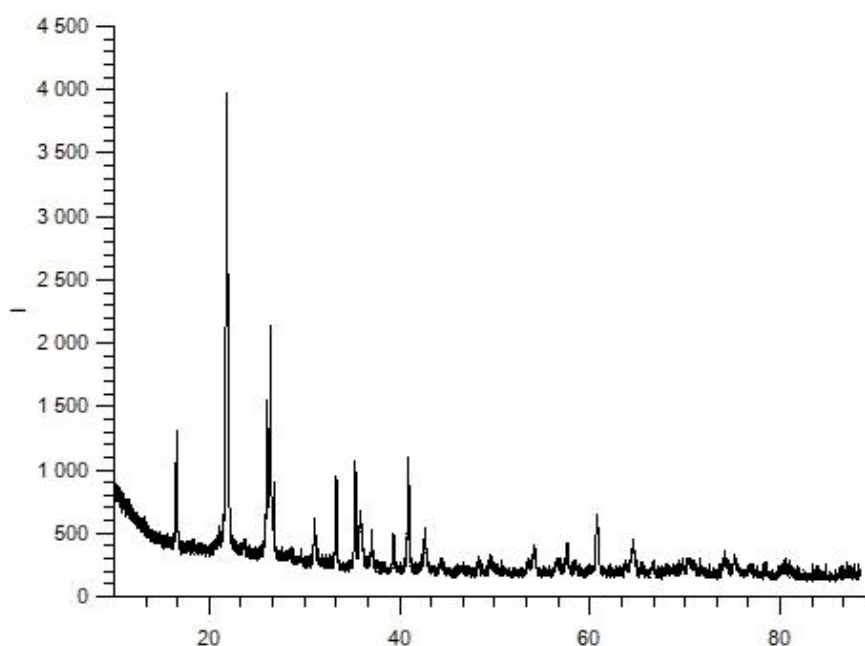


Рис. 1. Дифрактограмма ЛКФ
Fig. 1. Diffractogram of BLS

Таблица 3. Результаты рентгенофазового анализа
Table 3. X-ray phase analysis results

Формула	Название минерала	% масс.
SiO ₂	Кристобалит	4,95%
Al _{4,857} O _{9,571} Si _{1,143}	Муллит	81,05%
SiO ₂	Кварц	10,76%
Fe ₃ O ₄	Магнетит	3,24%

Для проведения дальнейших исследований лом кирпичной футеровки в количестве 2-х тонн измельчали до тонкодисперсного состояния в промышленной мельнице на предприятии по изготовлению минерального порошка. Время помола задавали определением дисперсности по проходу через сито 0,063 на соответствие требованиям ГОСТ. Процесс диспергирования лома кирпичной футеровки более продолжительный по времени, чем при помоле карбонатных горных пород, поэтому для оптимизации процесса,

сохранности оборудования и уменьшения затрат при помоле использовали интенсификатор процесса помола «MC-GrindingPro 01» производства компании MC-Bauchemie, который позволил сократить время помола на 10 минут. Продукт помола гидрофобизировали, используя олеиновую кислоту, которую вводили в процессе помола.

У измельченного материала определяли зерновой состав на соответствие требованиям ГОСТ 32761-2014, который представлен в таблице 4.

Таблица 4. Зерновой состав измельченного материала, % масс.
Table 4. Grain composition of the crushed material, % wt.

№ сита, мм	2,00	0,125	0,063
Фактические показатели, % по массе	100	94	85
Требуемые ГОСТ для МП-3, % по массе, не менее	100	75	60

Термограмма продукта помола приведена на рисунке 2. Потеря массы в интервале температур 30-150 °С связана с удалением адсорбированной влаги, что также подтверждается эндоэффектом при 93,4 °С. Эндоэффект при 577,3 °С соответствует

полиморфному превращению кварца, при 657,4 °С - переходу Fe₃O₄ в FeO. Экзотермический эффект в интервале 300-400 °С скорее всего связан с выгоранием чёрной плёнки, отработанного кирпича.

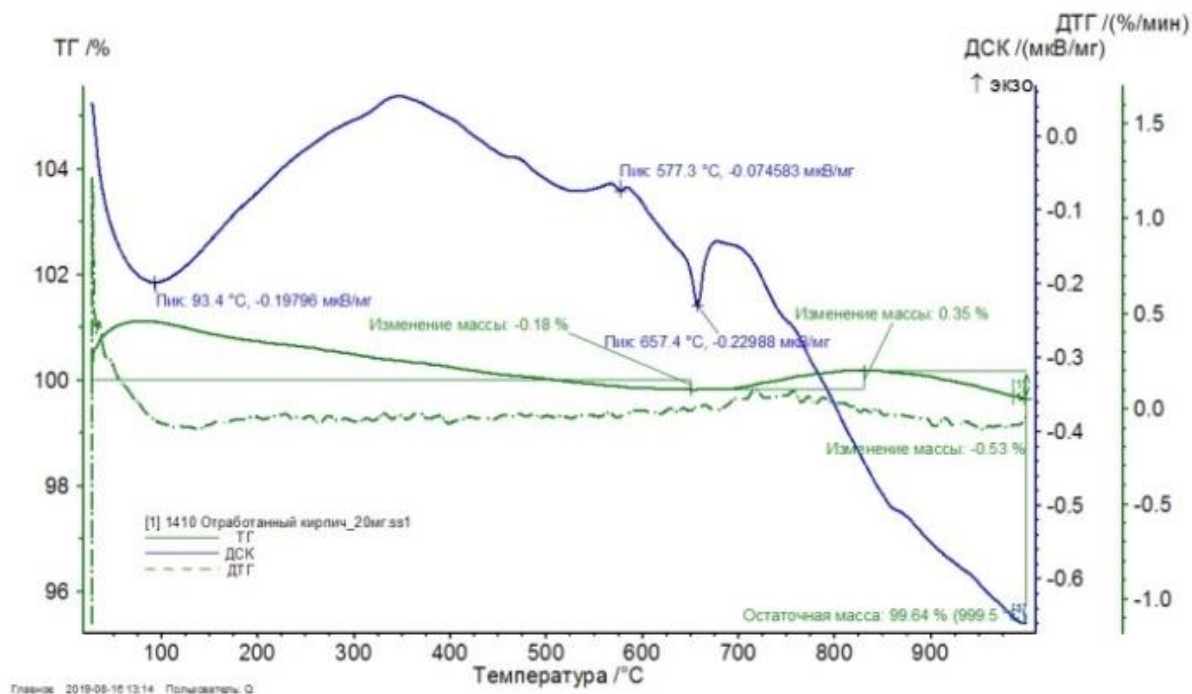


Рис. 2. Термограмма тонкодисперсного ЛКФ, изготовленного помоллом в промышленной мельнице
Fig. 2. Thermogram of finely dispersed BLS made by grinding in an industrial mill

Далее продукт помола лома кирпичной футеровки испытывали как минеральный порошок на соответствие требованиям ГОСТ. Одним из основных требований является содержание полуторных окислов Al₂O₃+Fe₂O₃, в промышленных

отходах производства, используемых при приготовлении минеральных порошков, которое для активированных не должно превышать 7 % по массе. Суммарное содержание полуторных окислов в продукте помола ЛКФ - 9,2% по массе. Поэтому,

для обеспечения возможности применения лома кирпичной футеровки при приготовлении минеральных порошков составляли смеси его с материалом, полученным помолом известняка

Мазульского месторождения, в различном процентном соотношении, и определяли суммарное содержание Al_2O_3 и Fe_2O_3 (таблица 5).

Таблица 5. Суммарное содержание полуторных окислов в зависимости от соотношения тонкодисперсного ЛКФ и известнякового минерального порошка

Table 5. The total content of sesquioxides depending on the ratio of finely dispersed BLS and limestone mineral powder

Соотношение ЛКФ/известняк, масс., %	Суммарное содержание Al_2O_3 и Fe_2O_3
50/50	8,1
40/60	7,8
30/70	6,6

Как видно из таблицы 5 оптимальный состав смеси ЛКФ/ тонкодисперсный известняк = 30/70% при содержании полуторных окислов в комплексном минеральном порошке МП-1 - 6,6%.

Поскольку нефтяные битумы содержат основные поверхностно-активные вещества, необходимо определить водородный показатель тонкодисперсного ЛКФ, так как минеральные порошки не должны быть кислыми, иначе на поверхности частиц образуется неустойчивая плёнка, способная легко вытесняться водой [17]. Определяли рН среды проб тонкодисперсных порошков ЛКФ, - измельченного на лабораторной мельнице без пленки нагара, механически отделенного от поверхности, и на промышленной – с нагаром, которые оказались щелочными при рН=7,5 и 7,7, соответственно.

Из полученных результатов видно, что тонкодисперсный лом кирпичной футеровки может при смешении с нефтяным битумом образовывать прочную пленку на поверхности, которая будет удерживаться в сухом и влажном состоянии.

Пикнометрическим методом определили истинную плотность тонкодисперсного комплексного минерального порошка, величина которой - 2,15 г/см³, рассчитали среднюю

плотность, которая составила 1,39 г/см³ и пористость - 35 %, в сравнении с традиционным известняковым - 32 %.

Асфальтовые бетоны, являются гетерогенной дисперсной системой, устойчивость структуры которой основным обусловлена внутренними силами, сосредоточенными на поверхностях раздела различных контактируемых тел, и поэтому важным фактором является форма, размер и рельеф частиц минерального порошка, так как от этих параметров зависит прочность сцепления - адгезия с вяжущим [17, 18, 19]. В этой системе основным назначением минерального порошка является повышение вязкости и прочности битума путём перевода его из объёмного в плёночное состояние, а также заполнение пор и пространства между более крупными частицами заполнителя в асфальтобетоне.

Определялась гранулометрия продукта помола ЛКФ в промышленной мельнице в сравнении с минеральным порошком на основе Мазульского известняка. На рисунке 3 представлены результаты определения гранулометрического состава ЛКФ в виде интегральных кривых и дифференциальных распределений.

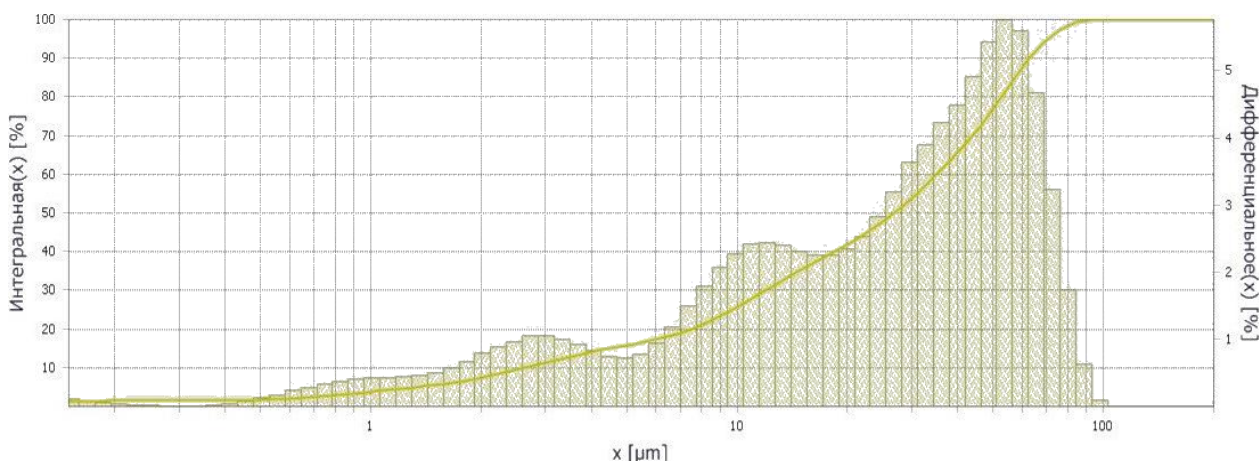


Рис. 3. Интегральные кривые распределения частиц ЛКФ и гистограммы дифференциального распределения фракций по размерам

Fig. 3. Integral curves of the BLS particle distribution and histograms of the differential distribution of fractions by size

Как видно из интегральной кривой распределения частиц, продукт помола ЛКФ в промышленной мельнице представляет собой полидисперсную смесь частиц с размерами от 0,4 до

100 мкм и преобладанием частиц размером 50 мкм. В таблице 6 приведены средние значения размеров исследуемых частиц и их поверхности, на рисунке 6 накопленная доля порошка по размерам частиц.

Таблица 6. Средние значения размеров исследуемых частиц и их поверхности
Table 6. Average values of the sizes of the investigated particles and their surface

Вид пробы	Размах величины фракционного состава (%), со средним размером частиц (мкм)							
	≤5	5-10	10-25	25-50	50-75	75-90	90-95	95-99
Продукт помола ЛКФ в промышленной мельнице	1,31	2,64	9,70	26,79	48,22	62,86	70,40	82,74

Из таблицы 6 видно, что наибольший фракционный размах >50% имеют частицы размером от 26,79 мкм до 82,74 мкм, а наименьший <50% от 1,31 до 9,70.

Из рисунка 4 видно, что наибольшая накопленная доля >50% частиц по размерам составляет от 30 мкм до 100 мкм.

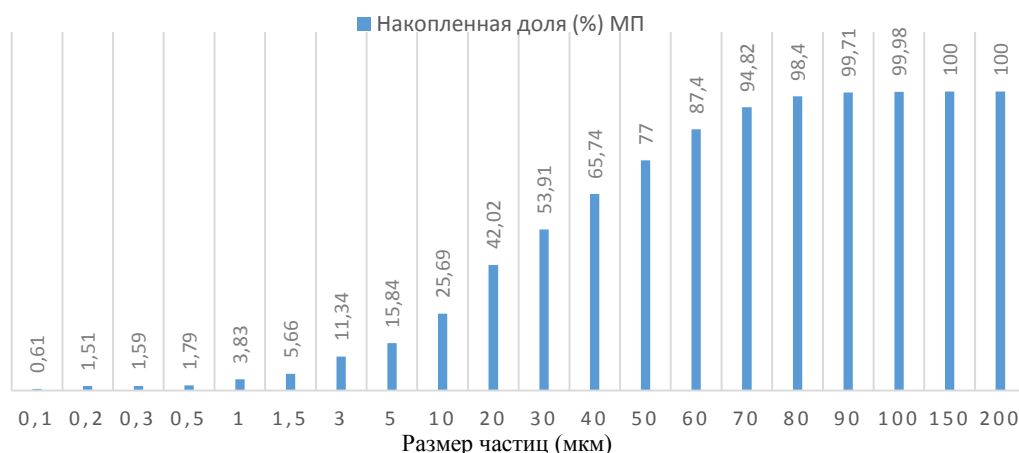


Рис. 4. Накопленная доля, % и статистика данных гранулометрического состава ЛКФ
Fig. 4. Accumulated share, % and Data Statistics on granulometric composition of BLS

Из статистики данных гранулометрического состава в таблице 7 видно, что среднеарифметический диаметр частиц порошка

равен 30 мкм, а средний геометрический диаметр составляет 17,81.

Таблица 7. Статистики данных гранулометрического состава ЛКФ
Table 7. Data Statistics on granulometric composition of BLS

Арифметический ср. диаметр (мкм)	30,099
Геометрический ср. диаметр (мкм)	17,810
Квадратичный ср. диаметр (мкм)	37,727
Гармонический ср. диаметр (мкм)	3,755
Модальная величина (мкм)	55,801
Средний (мкм)	26,807
Средний коэф.	1,123
Расхождение (мкм ²)	522,615
Среднеквадратичное отклонение (μm)	22,861
Среднее отклонение (μm)	19,594
Коэф. расхождение (%)	76,0
Асимметрия	0,457
Экссесс	-0,910
Диапазон	2,244
Монотонность	0,726
Специфическая площадь поверхности (см ² /см ³)	15980,512

На рисунке 5 представлен анализ дисперсности минерального порошка на основе Мазульского известняка. Как видно из кривых, его дисперсность

не настолько развита, – это полидисперсная смесь частиц с размерами от 0,1 до 35 мкм с преобладанием частиц размером 20 мкм.

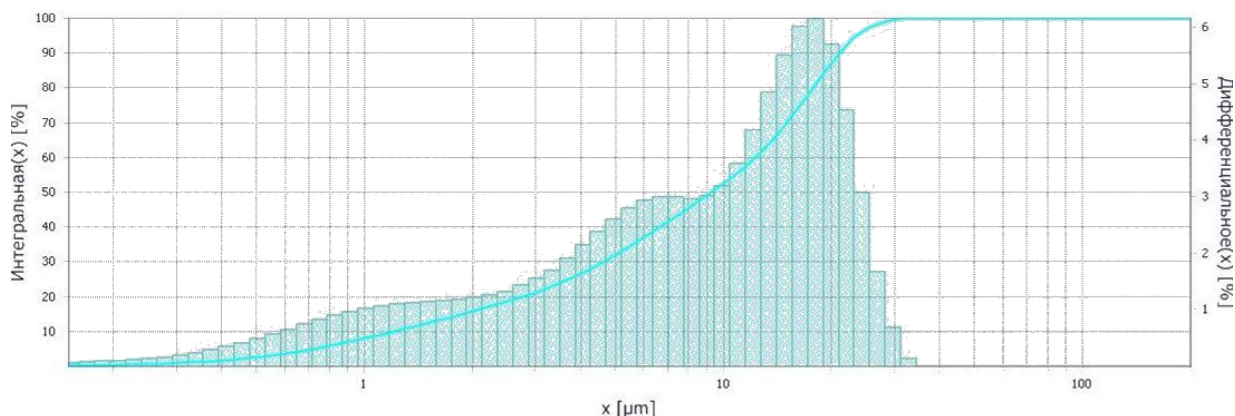


Рис. 5. Интегральные кривые распределения частиц и гистограммы дифференциального распределения фракций минерального порошка из известняка по размерам

Fig. 5. Integral distribution curves of particles and histograms of differential distribution of mineral powder fractions from limestone by size

В таблице 8 представлены средние значения размеров частиц минерального порошка из известняка и размах величины фракционного состава, где более 50% имеют частицы размером от 9,24 мкм до 27,89 мкм.

Таблица 8. Средние значения размеров исследуемых частиц и их поверхности
Table 8. Average values of the sizes of the investigated particles and their surface

Вид пробы	Размах величины фракционного состава (%), со средним размером частиц (мкм)							
	≤5	5-10	10-25	25-50	50-75	75-90	90-95	95-99
Молотый известняк	0,72	1,20	3,70	9,24	16,32	20,96	23,54	27,89

Из рисунка 6 видно, что наибольшая накопленная доля >50% частиц по размерам составляет от 10 мкм до 100 мкм.

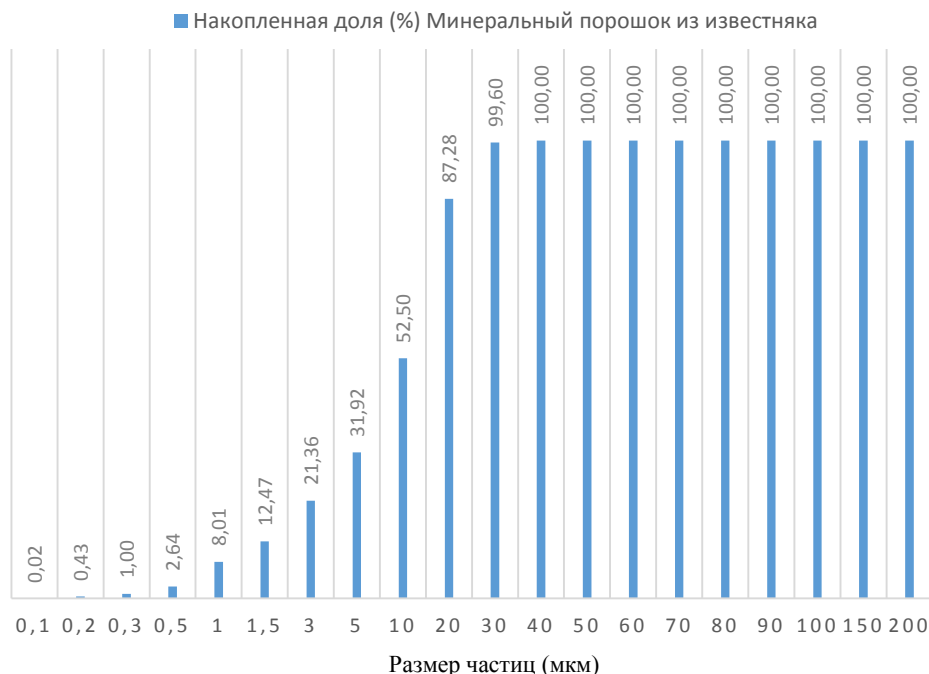


Рис. 6. Накопленная доля, % и Статистики данных гранулометрического состава минерального порошка из известняка

Fig. 6. Accumulated fraction, % and Data Statistics on granulometric composition of mineral powder from limestone

Из статистики данных гранулометрического состава в таблице 9 видно, что среднеарифметический диаметр частиц порошка равен 10,3 мкм, а средний геометрический диаметр составляет 6,7.

Таблица. 9. Статистики данных гранулометрического состава минерального порошка
Table. 9. Data statistics on granulometric composition of mineral powder

Арифметический ср. диаметр (мкм)	10,379
Геометрический ср. диаметр (мкм)	6,777
Квадратичный ср. диаметр (мкм)	12,803
Гармонический ср. диаметр (мкм)	3,009
Модальная величина (мкм)	17,903
Средний (мкм)	9,235
Средний коэф.	1,124
Расхождение (мкм ²)	56,773
Среднеквадратичное отклонение (μm)	7,535
Среднее отклонение (μm)	6,468
Коэф. расхождение (%)	72,6
Асимметрия	0,437
Экссесс	-0,880
Диапазон	2,139
Монотонность	0,696
Специфическая площадь поверхности (см ² /см ³)	19940,576

Таким образом, продукт помола ЛКФ в промышленной мельнице имеет более широкий диапазон размеров частиц по сравнению с минеральным порошком на основе известняка, что позволит получить более плотную и прочную структуру. Степень полидисперсности составляет 63,16, в сравнении с 38,73 для минерального порошка на основе известняка.

На основе комплексного минерального порошка марки МП-1 оптимального состава была изготовлена асфальтобетонная смесь типа Б марки II и отформованы образцы-цилиндры, которые исследовали на соответствие требованиям ГОСТ. Полученные физико-механические характеристики уплотненной асфальтобетонной смеси представлены в таблице 10.

Таблица. 10. Физико-механические характеристики уплотненной асфальтобетонной смеси
Table. 9. Physical and mechanical characteristics of the compacted asphalt concrete mixture

Показатель	Фактические результаты определения показателей асфальтобетонной смеси на основе		Требования ГОСТ 9128-2013
	МП-1	Известнякового минерального порошка	
Средняя плотность асфальтобетона, гр/см ³	2,37	2,37	Не нормируется
Водонасыщение, %	2,45	2,54	От 1,5 до 4,0
Предел прочности при сжатии, МПа, при:			
50°C	1,35	1,37	не менее 0,9
20°C	2,81	2,78	не менее 2,2
0°C	6,92	6,45	не более 10
Коэффициент водостойкости	0,96	0,95	не менее 0,90
Коэффициент водостойкости при длительном водонасыщении	0,92	0,91	не менее 0,85
Предел прочности на растяжение при расколе при 0°C, МПа	4,6	4,4	не менее 2,5 не более 6

Таким образом из полученных данных видно, что уплотненная асфальтобетонная смесь типа Б марки II соответствует требованиям ГОСТ.

ВЫВОДЫ

Таким образом, в ходе исследования были определены химический, гранулометрический и минералогический составы лома кирпичной футеровки (ЛКФ) алюминиевых электролизёров производства АО «РУСАЛ Красноярск». Усовершенствован процесс диспергирования его в промышленной мельнице с применением интенсификаторов помола. С помощью лазерного анализатора определены гранулометрические составы тонкодисперсного отхода ЛКФ и молотого

известняка и проведен сравнительный анализ полидисперсности, который выявил более развитую поверхность минерального порошка на основе отхода промышленности, что очевидно связано с большей твердостью и хрупкостью материала ЛКФ. Нагар, покрывающий поверхность частиц отхода ЛКФ, несколько повышает pH среды комплексного минерального порошка марки МП-1, что даёт при смешении с нефтяным битумом образование прочной пленки на поверхности, которая будет удерживаться в сухом и влажном состоянии.

Составлена оптимальная смесь тонкодисперсных ЛКФ и известняка Мазульского месторождения для получения комплексного минерального порошка марки МП-1. Физико-механические характеристики уплотненной

асфальтобетонной смеси типа Б марки II на основе комплексного минерального порошка не уступают, и даже превосходят, аналогичные характеристики смеси на основе традиционного известнякового.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1 Федосов, С.В. Вторичные материальные ресурсы для строительной индустрии / С.В. Федосов, Ю.А. Щепочкина, В.Е. Румянцева, В.С. Коновалова. – Иваново: ИВГПУ, 2017. – 188 с.

2 Mkahal Z., Mamindy-Pajany Y., Maherzii W., Abriak NE. Recycling of Mineral Solid Wastes in Backfill Road Materials: Technical and Environmental Investigations // Waste and Biomass Valorization. 2021.

3 Rodrigues R., Kozusny-Andreani DI., Frias DFR. Use of waste from civil construction in repairs of rural roads // revista eletrônica em gestao educacao e tecnologia ambiental. 2019. V.23. – Pp. 01-10.

4 Townsend SW., Spreadbury CJ., Laux SJ., Ferraro CC., Kari PER., Townsend TG., Blending as a Strategy for Reusing Municipal Solid Waste Incinerator Ash in Road-Base Construction // Journal of environmental engineering. 2020. V.146. 04020106.

5 Tian Y., Sun LJ., Li H., Zhang HJ., Harvey J., Yang B., Zhu YT., Yu B., Fu KM. Laboratory investigation on effects of solid waste filler on mechanical properties of porous asphalt mixture // Construction and building materials. 2021. V.279. 122436.

6 Romeo E., Mantovani L., Tribaudino M., Montepara, A, Reuse of Stabilized Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash in Asphalt Mixtures // Journal of Materials in Civil Engineering. 2018. V.30(8).

7 Ding, Z (Ding Zhan), Li, PL (Li Pei-long), Yao, YL (Yao Yi-liang) Environmental Impact Analysis and Comprehensive Utilization of Waste Rubber and Old Asphalt Mixture // Applied Mechanics and Materials. V. 34-35. 2010. – Pp. 1526-1531.

8 Xue, YJ (Xue, Yongjie), Hou, HB (Hou, Haobo), Zhu, SJ (Zhu, Shujing), Zha, J (Zha, Jin) Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact // Construction and Building Materials. V. 23 (2). – Pp. 989-996.

9 Dalhat, MA (Dalhat, M. A.), Al-Abdul Wahhab, HI (Al-Abdul Wahhab, H. I.) Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia // International journal of pavement engineering. 2017. V. 18 (4). – Pp. 349-357.

10 Mahmuda, Sumiati, Flaviana TL. Asphalt Modified Plastic Waste To Defend Damage In Asphalt Concrete (Ac-Wc) // 2nd forum in research, science, and technology. 2019. – Pp. 1-9.

11 Pokorny J., Sevcik R., Sal J. The Design and Material Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement Enriched Concrete for Construction Purposes // Materials. 2020. V. 13 (21).

12 Васильевская Г.В., Назиров Д.Р. Сераасфальтобетон // Журнал Сибирского

федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2011. Т. 4. № 6. – С. 696-703.

13 Васильевская Г.В., Шевченко В.А., Киселёв В.П. Применение отходов промышленности ГМК «Норильский никель» в производстве дорожного асфальтобетона // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 3 (98). – С. 130-134.

14 Сомов В.В., Немчинова Н.В., Пьявкина А.А. О способах утилизации отработанной футеровки электролизёров алюминиевого производства // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. № 5 (100). – С. 155-161.

15 Olugbenga, Oyedepo J. Utilization of Industrial Waste Products in the Production of Asphalt Concrete for Road Construction // Slovak Journal of Civil Engineering. 2019. V. 27. No. 4. – Pp. 11-17.

16 Din IMU., Mohammad SM. Study of warm mix asphalt using reclaimed asphalt pavement and copper slag: a review // Canadian Journal of Civil Engineering. 2020. V. 47(4). – Pp. 355-362.

17 Рыбьев, И.А. Асфальтовые бетоны. Учеб. пособие для строительных ВУЗов. Москва: «Высшая школа». 1969. – 399 с.

18 Васильевская Г.В., Назиров Д. Р. Применение отходов промышленности в качестве минерального порошка в асфальтобетоне // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2013. № 10 (81). – С. 153-157.

19 Li F., Yuyou Y. Understanding the temperature and loading frequency effects on physicochemical interaction ability between mineral filler and asphalt binder using molecular dynamic simulation and rheological experiments // Construction and Building Materials. 2020. V. 244. 118311.

REFERENCES

1 Fedosov, S.V. Secondary material resources for the construction industry / S.V. Fedosov, Yu.A. Shchepochkina, V.E. Rummyantsev, V.S. Kononov. - Ivanovo: IVGPU, 2017. – 188 p.

2 Mkahal Z., Mamindy-Pajany Y., Maherzii W., Abriak NE. Recycling of Mineral Solid Wastes in Backfill Road Materials: Technical and Environmental Investigations // Waste and Biomass Valorization. 2021.

3 Rodrigues R., Kozusny-Andreani D.I., Frias DFR. Use of waste from civil construction in repairs of rural roads // revista eletrônica em gestao educacao e tecnologia ambiental. 2019.V.23. – Pp. 01-10.

4 Townsend SW., Spreadbury CJ., Laux SJ., Ferraro CC., Kari PER., Townsend TG., Blending as a Strategy for Reusing Municipal Solid Waste Incinerator Ash in Road-Base Construction // Journal of environmental engineering. 2020. V.146. 04020106.

5 Tian Y., Sun LJ., Li H., Zhang HJ., Harvey J., Yang B., Zhu YT., Yu B., Fu KM. Laboratory investigation on effects of solid waste filler on mechanical properties of porous asphalt mixture // Construction and building materials. 2021. V.279. 122436.

- 6 Romeo E., Mantovani L., Tribaudino M., Montepara, A. Reuse of Stabilized Municipal Solid Waste Incinerator Fly Ash in Asphalt Mixtures // *Journal of Materials in Civil Engineering*. 2018. V.30(8).
- 7 Ding, Z (Ding Zhan), Li, PL (Li Pei-long), Yao, YL (Yao Yi-liang) Environmental Impact Analysis and Comprehensive Utilization of Waste Rubber and Old Asphalt Mixture // *Applied Mechanics and Materials*. V. 34-35. 2010. – Pp. 1526-1531.
- 8 Xue, YJ (Xue, Yongjie), Hou, HB (Hou, Haobo), Zhu, SJ (Zhu, Shujing), Zha, J (Zha, Jin) Utilization of municipal solid waste incineration ash in stone mastic asphalt mixture: Pavement performance and environmental impact // *Construction and Building Materials*. v. 23(2). – Pp. 989-996.
- 9 Dalhat, MA (Dalhat, M. A.), Al-Abdul Wahhab, HI (Al-Abdul Wahhab, H. I.) Performance of recycled plastic waste modified asphalt binder in Saudi Arabia // *International journal of pavement engineering*. 2017. V. 18(4). – Pp. 349-357.
- 10 Mahmuda, Sumiati, Flaviana TL. Asphalt Modified Plastic Waste To Defend Damage In Asphalt Concrete (Ac-Wc) // 2nd forum in research, science, and technology. 2019. – Pp. 1-9.
- 11 Pokorny J., Sevcik R., Sal J. The Design and Material Characterization of Reclaimed Asphalt Pavement Enriched Concrete for Construction Purposes // *Materials*. 2020. V. 13(21).
- 12 Vasilovskaya G.V., Nazirov D.R. Sulfur asphalt concrete // *Journal of the Siberian Federal University. Series: Technics and technologies*. 2011. V. 4. No. 6. – Pp. 696-703.
- 13 Vasilovskaya G.V. Shevchenko V.A., Kiselev V.P. Application of industrial wastes of MMC "Norilsk Nickel" in the production of road asphalt concrete // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2015. No. 3 (98). – Pp. 130-134.
- 14 Somov V.V. Nemchinova N.V., Piavkina A.A. On the methods of utilization of the spent lining of aluminum production electrolyzers // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2015. No. 5 (100). – Pp. 155-161.
- 15 Olugbenga, Oyedepo J. Utilization of Industrial Waste Products in the Production of Asphalt Concrete for Road Construction // *Slovak Journal of Civil Engineering*. 2019. V. 27. No. 4. – Pp. 11-17.
- 16 Din IMU., Mohammad SM. Study of warm mix asphalt using reclaimed asphalt pavement and copper slag: a review // *Canadian Journal of Civil Engineering*. 2020. V. 47(4). – Pp. 355-362.
- 17 Rybiev, I.A. asphalt concrete. Proc. allowance for construction universities. Moscow: "High School". 1969. - 399 p.
- 18 Vasilovskaya G.V., Nazirov D.R. Application of industrial waste as a mineral powder in asphalt concrete // *Bulletin of the Irkutsk State Technical University*. 2013. No. 10 (81). – Pp. 153-157.
- 19 Li F., Yuyou Y. Understanding the temperature and loading frequency effects on physicochemical interaction ability between mineral filler and asphalt binder using molecular dynamic simulation and rheological experiments // *Construction and Building Materials*. 2020. V. 244. 118311.

MINERAL POWDER BASED ON INDUSTRY SOLID WASTE

Endzhievskaya¹ I.G., Galkin² M.A., Demina³ A.V., Klindukh⁴ N.Yu.,
Gofman⁵ O.V.

FSAEI of HE «Siberian Federal University», Civil Engineering Institute,
660041, Krasnoyarsk, pr. Svobodny, 82,

E-mail: ¹licaend@mail.ru; ²gal.makcim2014@yandex.ru; ³nastia_95@mail.ru; ⁴NKlindukh@sfu-kras.ru;
⁵oksana_slakova@mail.ru

Abstract. One of the factors increasing the negative impact on the environment is the total volume of waste generation against the background of a low level of their recycling. The article presents studies of solid waste industrial production of JSC "RUSAL Krasnoyarsk" - brick lining scrap (BLS) of aluminum electrolyzers, its chemical and mineralogical compositions, with the aim of using it in the production of road building materials as a mineral powder. The finely dispersed BLS powder obtained by grinding was studied for compliance with the requirements of GOST in terms of grain and chemical composition. The optimal ratio of the mixture for the brand of mineral powder MP-1 - finely dispersed BLS and ground limestone, corresponding to GOST for sesquioxides, was selected. The granulometric compositions of the finely dispersed BLS waste were studied in comparison with the traditional mineral powder from ground limestone. Based on the selected mixture of mineral powder, an asphalt concrete mixture with improved physical and mechanical characteristics was obtained.

Subject of research: composition and properties of industrial solid waste - brick lining scrap (BLS) of aluminum electrolytic cells of RUSAL JSC for the purpose of further use in the production of mineral powder MP-1 to improve the physical and mechanical properties of the asphalt concrete mixture and reduce the accumulated volumes of industrial solid waste as well as the area of landfills

Materials and methods: the study was performed using a laser analyzer, X-ray diffractometer and X-ray fluorescence spectrometer.

Results: in the course of the study, the chemical, granulometric and mineralogical compositions of finely dispersed BLS, a solid industrial waste produced by RUSAL Krasnoyarsk JSC, were determined, which made it possible to improve the process of waste dispersion in an industrial mill using grinding intensifiers.

Using a laser analyzer, the granulometric compositions of finely dispersed BLS and ground limestone were determined, and a comparative analysis of polydispersity was carried out, which revealed a more developed surface of the mineral powder based on industrial waste, which is obviously associated with greater hardness and brittleness of the BLS particles. The soot film present on all BLS waste elements somewhat increases the pH of the mineral powder environment based on finely dispersed BLS, which, when mixed with petroleum bitumen, leads to the formation of a strong film on the particle surface, both in dry and wet states. The physical and mechanical characteristics of the type B grade II compacted asphalt concrete mixture based on a selected mixture of mineral powder are not inferior and even superior to similar characteristics of a mixture based on a traditional MP-1 mineral powder.

Conclusions: mineral powder grade MP-1 based on industrial solid waste produced by RUSAL Krasnoyarsk JSC - brick lining scrap (BLS) of aluminum electrolyzers can be used in the production of asphalt concrete with high physical and mechanical characteristics. The use of BLS waste in the production of road construction materials will reduce the accumulation of waste, reduce the area of landfill, and improve the ecological situation in the city.

Key words: industrial waste, mineral powder, asphalt concrete, brick lining scrap.