

Получение экологически безопасных строительных материалов на основе отработанного формовочного песка сталелитейного производства

© 2018. Я. И. Вайсман¹, д. мед. н., профессор,
 К. Г. Пугин^{1,2}, д. т. н., профессор, Л. В. Рудакова¹, д. т. н., профессор,
 И. С. Глушанкова¹, д. т. н., профессор, К. Ю. Тюрюханов¹, аспирант,
¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет,
 614990, Россия, г. Пермь, Комсомольский проспект, 29,
²Пермский государственный аграрно-технологический университет
 им. академика Д.Н. Прянишникова,
 614990, Россия, г. Пермь, ул. Петропавловская, 23,
 e-mail: 123zzz@rambler.ru

Объектом исследования выступал отработанный формовочный песок одного из типичных сталелитейных предприятий. Оценка эмиссии загрязняющих веществ из состава отработанного формовочного песка показала их низкую эмиссионную и биологическую активность, что позволило разработать технологию его утилизации с получением экологически безопасного строительного материала. Проведённые исследования физико-механических свойств отработанного формовочного песка показали, что он пригоден для использования в качестве минерального заполнителя при производстве асфальтобетонных смесей. Исследования образцов асфальтобетона в составе, которого в качестве мелкого минерального заполнителя использован отработанный формовочный песок, показали, что он удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128-2013. Физико-механические показатели асфальтобетонной смеси соответствуют асфальтобетону типа Б I марки. Предлагаемая технология утилизации возможна без значительных капитальных вложений на большинстве сталелитейных предприятий. Реализация данной технологии позволит снизить техногенную нагрузку на окружающую среду в местах размещения сталелитейных предприятий.

Ключевые слова: формовочный песок, утилизация, асфальтобетон, отходы производства, строительные материалы.

Production of environmentally safe building materials on the basis of the waste foundry sand

© 2018. Ya. I. Vaisman¹, K. G. Pugin^{1,2} ORCID: 0000-0002-1768-8177,
 L. V. Rudakova¹, I. S. Glushankova¹ ORCID: 0000-0003-3376-8000,
 K. Y. Tyuryukhanov¹ ORCID: 0000-0001-6417-5481,
¹Perm National Research Polytechnic University (PNRPU),
 29 Komsomolskiy Prospect, Perm, Russia, 614990,
²Perm State Agro-Technological University named after
 Academician D. N. Pryanishnikov,
 23, Petropavlovskaya St., Perm, Russia, 614990,
 123zzz@rambler.ru.

The object of the research was the waste foundry sand of one of the typical steelmaking enterprises. Estimation of pollutant emissions from the composition of waste foundry sand has shown their low emission and biological activity, which allowed to develop a technology for its utilization with obtaining environmentally safe construction material. The granulometric composition of the waste foundry sand was determined with an average grain size of 0.38 mm. Based on the results of the analysis of buffer extracts, the content of heavy metals in the samples of waste foundry sand in mobile form was determined. Heavy metals (lead, zinc, chromium, nickel, manganese), as well as phenol and formaldehyde, were chosen as the indicators. Samples of waste foundry sand contain formaldehyde in mobile form exceeding the limits for soil. It has been proposed to use formaldehyde-containing sand in a dense and hydrophobic structure, such as asphalt concrete, to reduce the formaldehyde emission. Investigations of the physical and mechanical properties of waste foundry sand showed that it is suitable for use as a mineral aggregate in the production of asphalt concrete mixtures. The conducted studies of asphalt concrete samples in the composition, which as a fine mineral filler used waste foundry sand, showed that it meets the requirements of Russian standard GOST 9128-2013. Physico-mechanical characteristics of the asphalt-concrete mixture correspond to asphalt concrete of B type I grade. The proposed recycling technology is possible without significant capital investment in most steel mills. The implementation of this technology will reduce the industrial impact on the environment in the locations of the steel plant.

Keywords: sand waste, recycling, asphalt, industrial waste, construction materials.

В настоящее время в России и развитых в промышленном отношении странах уделяется повышенное внимание разработке методов и технологий, позволяющих использовать ресурсный потенциал отходов производства для получения различных целевых продуктов, в том числе строительных материалов. Внедрение таких технологий даёт возможность наряду с экономическими выгодами достигать положительных экологических и социальных эффектов, которые проявляются в уменьшении объёмов не утилизируемых отходов производства, снижении техногенной нагрузки на объекты окружающей среды формируемой не утилизируемыми отходами, создании благоприятной среды для проживания населения [1–4].

В ряде отраслей промышленного производства, в частности, в чёрной металлургии, в результате недостаточного использования ресурсного потенциала сырья и получаемых побочных продуктов образуется значительное количество отходов, которые по своим физико-механическим свойствам не уступают, а в ряде случаев превосходят природное минеральное сырьё, широко используемое для получения ряда строительных материалов с повышенными потребительскими свойствами. В настоящее время известен ряд решений использования крупнотоннажных отходов чёрной металлургии взамен первичного сырья при производстве строительных материалов основанный на родстве свойств с минеральными инертными материалами [5–7].

Вместе с тем, значительное количество отходов чёрной металлургии не вовлекается в ресурсный цикл, а в виде не утилизируемых остатков отходов размещается в окружающей среде, формируя техногенную экологическую нагрузку [8–11].

Одним из таких крупнотоннажных отходов, который в настоящее время не находит должного использования, а депонируется на полигонах промышленных отходов, является отработанный формовочный песок (ОФП). ОФП является отходом сталелитейного производства, образующегося в процессе получения отливок из стали в литевые песчаные формы. В качестве исходного материала для изготовления литевых форм используется кварцевый песок. Объёмы образования ОФП в среднем составляют около одной тонны на тонну готовых отливок. В Российской Федерации (РФ) насчитывается около 1100 действующих предприятий, которые в 2016 г. произвели 3,8 млн тонн отливок. Это определяет актуаль-

ность решения задачи по утилизации ОФП для большого числа предприятий России. Химический состав и физико-механические свойства ОФП постоянны и неизменны при долгосрочном функционировании предприятия, что обусловлено высокими требованиями к технологиям получения отливок высокого качества и является положительным моментом при разработке технологии утилизации ОФП.

Известен ряд зарубежных научных исследований, посвящённых вопросам утилизации ОФП. По данным ассоциации литейщиков Индианы (**The Indiana cast metals association INCMA USA**), ежегодно в штате Индиана США на предприятиях, занятых литьём металлов, образуется около 450 тыс. тонн отработанной формовочной смеси, большая часть которой используется в качестве инертного минерального заполнителя в строительной отрасли. Ряд научных центров США, Индии, Евросоюза предлагают использование ОФП в качестве минерального заполнителя в цементобетонах, строительных растворах, при производстве кирпичей и тротуарной плитки, для укрепления слабых грунтов при дорожном строительстве, выравнивания рельефа местности и др. [12–18]. Однако широкого распространения в РФ данные технологии не получили, так как ОФП относится к четвертому классу опасности из-за наличия в своём составе остатков фурановых (фенолформальдегидных) смол и для его использования взамен природного сырья при производстве строительных материалов требуется обоснование экологической безопасности их применения.

Целью данной работы была разработка технологии получения экологически безопасного строительного материала на основе ОФП сталелитейного производства.

Объекты и методы исследования

Объектом исследования выступала отработанная формовочная смесь одного из типичных сталелитейных предприятий, расположенного в Приволжском федеральном округе. Основу формовочной смеси составляет природный кварцевый песок марки 1К₁О₃ со средним размером зерна 0,38 мм, массовой долей диоксида кремния 99,6% и связующий компонент. При изготовлении литевой формы в качестве связующего используется фенолформальдегидная смола Альфабонд-07, норма расхода которой составляет 126 кг на 1 тонну отливок, и отвердитель Альфабонд, норма расхода которого равна 31,6 кг на 1 тон-

Таблица 1 / Table 1

Усреднённый химический состав ОФП (%)
Averaged chemical composition of WFS (%)

Наименование показателя Indicator name	Наименование нормативного документа на метод испытаний Name of the normative document for the test method	Полученные значения при испытаниях The values obtained during the tests
Оксид кремния Silicon oxide	ПНД Ф 16.1.42-04 ERD F 16.1.42-04	93±9
Оксид алюминия Aluminium oxide	ПНД Ф 16.1.42-04 ERD F 16.1.42-04	0,20±0,02
Оксид железа Oxide of iron	ПНД Ф 16.1.42-04 ERD F 16.1.42-04	0,80±0,04
Оксид марганца Manganese oxide	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 ERD F 16.1:2.3:3.11-98	0,060±0,003
Оксид магния Magnesium oxide	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 ERDF 16.1:2.3:3.11-98	0,020±0,001
Оксид кальция Calcium oxide	ПНДФ 16.1:2.3:3.11-98 ERD F 16.1:2.3:3.11-98	1,50±0,08
Оксид титана Titanium oxide	ПНД Ф 16.1:2.3:3.11-98 ERD F 16.1:2.3:3.11-98	1,20±0,06
Фенолформальдегидная смола Phenol-formaldehyde resin	ПНД Ф 16.1:2.3:3.45-05 ERD F 16.1:2.3:3.45-05	3,600±0,018

Таблица 2 / Table 2

Гранулометрический состав ОФП
Granulometric composition of WFS

Содержание пылевидных частиц, % Content of dust particles, %	1,0±0,1									
Модуль крупности / Grain size distribution	1,25									
Гранулометрический состав Granulometric composition										
Размер отверстий сит, мм Size of sieve holes, mm	20	15	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	0,05
Полный остаток, % Full residue %	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,3±0,1	25,5±0,1	98,2±0,1	99,0±0,1

ну отливок. При заливке металла формовочная смесь подвергается воздействию высокой температуры (до 1600 °С).

Для определения возможности использования ОФП был определён усреднённый химический состав отхода по основным компонентам и класс опасности расчётным методом согласно методике утверждённой в СП 2.1.7.1386-03. Содержание ионов металлов в отходе (железа, марганца, титана) определяли методом атомно-абсорбционной спектроскопии (ААС), оксид кремния – гравиметрическим методом, содержание фенолформальдегидной смолы определяли фотометрическим методом на КФК-3. Полученные данные представлены в таблице 1. Проведённые исследования показали, что ОФП относится к четвёртому классу опасности по степени негативного воздействия на окружающую среду,

что позволяет рассматривать его как сырьё для получения строительных материалов.

Гранулометрический состав ОФП определяли по методике ГОСТ 12536-2014 с использованием стандартного набора лабораторных сит. Полученные данные представлены в таблице 2.

Анализ данных по гранулометрическому составу ОФП показал, что по модулю крупности он соответствует очень мелкому песку. Содержание пылевидных и глинистых частиц составляет 1,0%, что соответствует требованиям ГОСТ 8736-2014 для очень мелкого песка II класса (не более 5,0%).

ОФП, используемый в качестве форм для литья, может содержать тяжёлые металлы (ТМ), поглощаемые формой при литье, а также может содержать продукты разложения связующих компонентов – фенол и формаль-

дегид. При этом основная часть ТМ содержится в ОФП в виде силикатов, практически нерастворимых в воде и сильных кислотах, другая часть – в виде карбонатов и сульфатов, которые могут подвергаться медленному растворению в воде и кислых средах.

Одним из основных критериев возможности использования отходов в качестве сырья при получении строительных материалов является безопасность для объектов окружающей среды и здоровья человека. В этой связи для определения направления утилизации отходов в первую очередь необходимо оценить формируемую ими эмиссию загрязняющих веществ.

Исследования эмиссий загрязняющих веществ в водные среды проводили в соответствии с требованиями МУ 2.1.674-97 «Санитарно-гигиеническая оценка стройматериалов с добавлением промтоходов». Для оценки эмиссий были подготовлены водные и буферные (ацетатно-аммиачные) вытяжки из образцов ОФП при соотношении образцов: раствор равном 1:10, контролировали процесс по содержанию в вытяжках следующих компонентов: ионов свинца, цинка, хрома (общего), никеля и марганца; фенола и формальдегида, как наиболее опасных и присутствующих в составе ОФП. При анализе полученных данных проводили сравнение со значениями ПДК этих ТМ для воды водоёмов рыбохозяйственного назначения и с ПДК в почве (ПДК для ТМ подвижных форм).

Измерение содержания ТМ в пробах проводили методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой с применением масс-спектрометра Agilent-7500сх (производство Agilent Technologies Inc, США).

Определение формальдегида в водных растворах проводили методом жидкостной хроматографии на хроматографе с диодно-матричным детектором (производство Agilent Technologies Inc, США). Анализ проводили в соответствии с ПНД Ф 14.2:4.227-2006 «Методика измерений массовых концентраций альдегидов в питьевых и природных водах методом высокоэффективной жидкостной хроматографии».

Измерения массовой концентрации фенола проводили методом газовой хроматографии на хроматографе Кристалл 5000.2 (производство ЗАО СКБ Хроматэк, Россия) в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.225-06 «Методика выполнения измерений массовой концентрации фенола и фенолпроизводных в пробах питьевых, природных и сточных вод газохроматографическим методом».

Анализ полученных данных проводили в сравнении со значениями ПДК этих ТМ для воды водоёмов рыбохозяйственного назначения, и с ПДК в почве (ПДК для ТМ подвижных форм).

Результаты и обсуждение

Результаты определения концентрации анализируемых веществ в водной вытяжке из ОФП представлены в таблице 3.

Как видно из представленных данных, содержание ТМ в водных вытяжках образцов отхода значительно ниже значений ПДК водоёмов рыбохозяйственного назначения, что свидетельствует о низкой миграционной и биологической активности загрязняющих компонентов, входящих в состав ОФП.

В водных вытяжках ОФП содержится формальдегид, в количествах значительно пре-

Таблица 3 / Table 3
Концентрация веществ в водной вытяжке ОФП при pH = 7, мг/дм³
Concentration of substances in the aqueous extract of WFS at pH = 7, mg/dm³

Компонент / Component	Отработанный формовочный песок Waste foundry sand	ПДК для водоёмов рыбохозяйственного назначения MPC for fish reservoirs
Свинец / Plumbum	0,0013±0,0003	0,03
Цинк / Zinc	0,0030±0,0006	0,1
Хром / Chromium	0,0052±0,0009	0,05
Никель / Nickel	0,0027±0,0005	0,01
Марганец / Manganese	0,0085±0,0016	0,1
Формальдегид / Formaldehyde	3,8±0,9	0,25
Фенол / Phenol	0,0020±0,0010	0,001

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.
Note: values in bold are higher than MPC.

Таблица 4 / Table 4

Содержание тяжёлых металлов в подвижной форме в образцах ОФП при рН= 4,8, мг/кг
The content of heavy metals in mobile form in samples of WFS at pH = 4.8, mg/kg

Компонент / Component	Отработанный формовочный песок Waste foundry sand	ПДК почве MPC in soil
Свинец / Plumbum	0,086±0,018	6
Цинк / Zinc	0,760±0,014	23
Хром / Chromium	0,17±0,03	6
Никель / Nickel	0,094±0,016	4
Марганец / Manganese	0,70±0,013	60–80
Формальдегид / Formaldehyde	38±9	7
Фенол / Phenol	0,020±0,010	не установлена not assigned

Примечание: жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК.
Note: values in bold are higher than MPC.

Таблица 5 / Table 5

Физико-механические характеристики образцов асфальтобетона
Physical and mechanical properties of asphalt concrete samples

Показатели Indicator	Требование ГОСТ 9128-2013 The requirement of GOST 9128-2013	ОФП с битумом 5,3% WFS with bitumen 5.3%	ОФП с битумом 5,6% WFS with bitumen 5.6%
Средняя плотность, т/м ³ Average density, t/m ³	не установлена not assigned	2,44±0,01	2,43±0,01
Пористость минеральной части, % Porosity of the mineral part, %	14–19	15,02±0,02	15,75±0,02
Остаточная пористость, % Residual porosity, %	2,5–5,0	2,79±0,01	2,80±0,01
Предел прочности при сжатии, МПа Compressivestrength, MPa:			
20 °С, не менее / 20 °С, not less than	2,5	3,61±0,01	3,48±0,01
50 °С, не менее / 50 °С, not less than	1,2	1,69±0,01	1,50±0,01
0 °С, не более / 0 °С, not more than	11,0	8,37±0,01	7,18±0,01
Водостойкость, не менее Water resistance, not less than	0,90	1,00±0,01	1,00±0,01

вышающих ПДК (15 ПДК), и фенол (2 ПДК), что необходимо учитывать при разработке технологий его утилизации.

На основании результатов анализа буферных вытяжек было определено содержание ТМ в образцах отходов в подвижной форме. Полученные результаты представлены в таблице 4. В данной таблице приведены ПДК ТМ в подвижной форме для дерново-подзолистых и суглинистых почв в соответствии с гигиеническими нормативами ГН 2.1.7.2041-06 «Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве».

Образцы ОФП содержат формальдегид в концентрациях значительно превышающих норматив (5,4 ПДК), что необходимо учитывать при разработке технологии его утилиза-

ции. Для фенола ПДК в почве в настоящее время не установлена.

Эмиссионную активность фенола и формальдегида из ОФП можно снизить за счёт размещения ОФП в гидрофобной или плотной среде, в качестве которой может выступать сама структура строительного материала (например, асфальтобетона), в которой он используется как один из компонентов [19, 20]. На основе анализа физико-механических и химических свойств ОФП и возможности снижения эмиссионной активности загрязняющих веществ из ОФП при его размещении в гидрофобной и более плотной среде, было обосновано использование ОФП в составе асфальтобетона. При этом снижение эмиссионной активности загрязняющих веществ,

содержащихся в ОФП, достигается за счёт его размещения в гидрофобной среде, которая образуется при использовании битума в составе асфальтобетона.

Проведённые исследования показали, что по своим физико-механическим и гранулометрическим показателям ОФП пригоден для использования в качестве минерального заполнителя при производстве асфальтобетонных смесей.

Был выполнен подбор составов асфальтобетонной смеси в соответствии с ГОСТ 8267-93, ГОСТ 9128-2013, ГОСТ Р 52129-2003, ГОСТ 22245-90 при 12% содержании ОФП в минеральной части асфальтобетонной смеси. Проведённые лабораторные исследования позволили определить оптимальное содержание битума в составе асфальтобетонной смеси при использовании ОФП, которое составляет от 5,3 до 5,7% сверх 100% минеральной части.

Полученные образцы асфальтобетона, в состав которого в качестве мелкого заполнителя использован ОФП, прошли испытания на соответствие требованиям ГОСТ 9128-2013, который устанавливает требования к изготовлению асфальтобетонных смесей и асфальтобетона, с применением битумных вяжущих и полимерасфальтобетона из этих смесей. Испытания асфальтобетонных образцов, в состав которых входил ОФП, были проведены в аккредитованной лаборатории по испытанию дорожных материалов Пермского национального исследовательского политехнического университета. Основные физико-механические показатели асфальтобетонных образцов представлены в таблице 5.

Заключение

Проведённые исследования асфальтобетона, в состав которого в качестве мелкого минерального заполнителя использован ОФП, показали, что он удовлетворяет требованиям ГОСТ 9128-2013. Физико-механические показатели асфальтобетонной смеси соответствуют асфальтобетону типа Б I марки. Это позволяет сделать вывод о возможности использования технологии утилизации ОФП для производства асфальтобетона с замещением части природных минеральных сырьевых компонентов отходами сталелитейного производства.

ОФП сталелитейного производства характеризуется большим объёмом образования, однородной структурой, постоянством химических и физико-механических свойств, что указывает на возможность использования

предлагаемой технологии без значительных капитальных вложений на большинстве сталелитейных предприятий.

Литература

1. Ватин Н.И., Петросов Д.В., Калачев А.И., Лахтинен П. Применение зол и золошлаковых отходов в строительстве // Инженерно-строительный журнал. 2011. № 4. С. 16–21.
2. Быков Д.Е., Чертез К.Л., Тупицына О.В., Щербина Е.В., Савельев А.А. Обеспечение геэкологической устойчивости массивов коммунальных отходов для их строительного-хозяйственного освоения требует реконструкции существующих полигонов в комплексы // Экология и промышленность России. 2016. № 8. С. 4–11.
3. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Траутвайн А.И., Нефедов А.В. Использование микроцеллюлозы в составе щебеночно-мастичного асфальтобетона // Промышленное и гражданское строительство. 2014. № 8. С. 38–42.
4. Ядыкина В.В., Гридчин А.М., Тоболенко С.С. Стабилизирующая добавка для щебеночно-мастичного асфальтобетона из отходов промышленности // Строительные материалы. 2012. № 8. С. 64–66.
5. Глаголев С.Н., Севостьянов В.С., Гридчин А.М., Уральский В.И., Севостьянов М.В., Ядыкина В.В. Ресурсо-энергосберегающие модули для комплексной утилизации техногенных материалов // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2013. № 6. С. 102–106.
6. Brunner P. The need for final sinks // From Sanitary to Sustainable Landfilling: why, how, and when?: Proc. 1st int. conf. on final sinks / Ed. J. Fellner. Vienna University of Technology, Institute for Water Quality, Waste and Resources Management. TU Vienna, 2010. P. 1–3.
7. Mastellone M.L., Brunner P.H., Arena U. Scenarios of waste management for a waste emergency area // Journal of Industrial Ecology Special Issue: Applications of Material Flow Analysis. 2009. V. 13. No. 5. P. 735–757.
8. Кадыров А.С., Кунаев В.А., Георгиади И.В. Отходы чёрной металлургии и отработанные технические жидкости для получения материала дорожных оснований // Экология и промышленность России. 2017. № 12. С. 44–48.
9. Свергузова С.В., Суханов Е.В., Ипанов Д.Ю. Коагуляция тонкодисперсных систем с помощью пыли электросталеплавильного производства // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2015. № 1. С. 186–191.
10. Song H.-Y., Niu J.-G., Cui B.-X. Comprehensive evaluation of solid waste utilization benefit in iron and steel industry // Iron and Steel. 2017. No. 2. P. 85–90.
11. Smol M. Towards zero waste in steel industry: polish case study // J. Steel Struct Constr. 2015. V. 1. doi:10.4172/2472-0437.1000102.
12. Siddique R., Schutter G., Noumowe A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete // Construction and Building Materials. 2009. V. 23. No. 2. P. 976–980.

13. Guney Y., Dursun Sari Y., Yalcin M., Tuncan A., Donmez S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. // *Waste Management*. 2010. V. 30. No. 8–9. P. 1705–1713.

14. Siddique R., Singh G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing // *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. V. 55. No. 11. P. 885–892.

15. Mehrara A., Khodaii A. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 38. P. 423–442.

16. Menapace I., Garcia Cucalon L., Kaseer F., Arám-bula-Mercado E., Epps Martin A., Masad E., King G. Effect of recycling agents in recycled asphalt binders observed with microstructural and rheological tests // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 158. P. 61–74.

17. Hung A., Goodwin A., Fini E. Effects of water exposure on bitumen surface microstructure // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 135. P. 682–688.

18. Fischer H., Dillingh E., Hermse C. On the interfacial interaction between bituminous binders and mineral surfaces as present in asphalt mixtures // *Applied Surface Science*. 2013. V. 265. P. 495–499.

19. Пугин К.Г. Вопросы экологии использования твердых отходов черной металлургии в строительных материалах // *Строительные материалы*. 2012. № 8. С. 54–56.

20. Пугин К.Г. Научные основы минимизации негативных воздействий на геосферу при использовании отходов производства в строительстве: Дисс. ... доктора техн. наук. Пермь: ПНИПУ. 2016. 261 с.

References

1. Vatin N.I., Petrosov D.V., Kalachev A.I., Lakhtinen P. Use of ashes and ash-and-slag wastes in construction // *Inzhenerno-stroitelnyy zhurnal*. 2011. No. 4. P. 16–21 (in Russian).

2. Bykov D., Chertes K., Tupicyna O., Scherbina E., Savelyev A. Providing stability of municipal waste landfill's for their construction development // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2016. No. 8. P. 4–11 (in Russian).

3. Yadykina V., Gridchin A., Trautvain A., Nefedov A. The use of micro-cellulose in structure of stone-mastic asphalt concrete // *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo*. 2014. No. 8. P. 38–42 (in Russian).

4. Yadykina V., Gridchin A., Tobolenko S. Stabilizing additive for macadam-mastic asphalt concrete from the waste industry // *Stroitelnye materialy*. 2012. No. 8. P. 64–66 (in Russian).

5. Glagolev S., Sevostyanov V., Gridchin A., Uralskiy V., Sevostyanov M., Yadykina V. Resource-saving modules for complex utilization of man-caused materials // *Vestnik BGTU im V. G. Shukhova*. 2013. No. 6. P. 102–106 (in Russian).

6. Brunner P. The need for final sinks // From Sanitary to Sustainable Landfilling: why, how, and when?: Proc. 1st int. conf. on final sinks / Ed. J. Fellner. Vienna University of Technology, Institute for Water Quality, Waste and Resources Management. TU Vienna, 2010. P. 1–3.

7. Mastellone M.L., Brunner P.H., Arena U. Scenarios of waste management for a waste emergency area // *Journal of Industrial Ecology Special Issue: Applications of Material Flow Analysis*. 2009. V. 13. No. 5. P. 735–757.

8. Kadyrov A., Kunaev V., Georgiadi I. Ferrous metallurgy waste and waste technical fluids for obtaining the material of road bases // *Ekologiya i promyshlennost Rossii*. 2017. No. 12. P. 44–48 (in Russian).

9. Sverguzova S.V., Sukhanov E.V., Ipanov D.Yu. Finesystems coagulation using electric steel production-dust // *Vestnik BGTU im. V.G. Shukhova*. 2015. No. 1. P. 186–191 (in Russian).

10. Song H.-Y., Niu J.-G., Cui B.-X. Comprehensive evaluation of solid waste utilization benefit in iron and steel industry // *Iron and Steel*. 2017. No. 2. P. 85–90.

11. Smol M. Towards zero waste in steel industry: polish case study // *J. Steel Struct Constr*. 2015. V. 1. doi:10.4172/2472-0437.1000102.

12. Siddique R., Schutter G., Noumowe A. Effect of used-foundry sand on the mechanical properties of concrete // *Construction and Building Materials*. 2009. V. 23. No. 2. P. 976–980.

13. Guney Y., Dursun Sari Y., Yalcin M., Tuncan A., Donmez S. Re-usage of waste foundry sand in high-strength concrete. // *Waste Management*. 2010. V. 30. No. 8–9. P. 1705–1713.

14. Siddique R., Singh G. Utilization of waste foundry sand (WFS) in concrete manufacturing // *Resources, Conservation and Recycling*. 2011. V. 55. No. 11. P. 885–892.

15. Mehrara A., Khodaii A. A review of state of the art on stripping phenomenon in asphalt concrete // *Construction and Building Materials*. 2013. V. 38. P. 423–442.

16. Menapace I., Garcia Cucalon L., Kaseer F., Arám-bula-Mercado E., Epps Martin A., Masad E., King G. Effect of recycling agents in recycled asphalt binders observed with microstructural and rheological tests // *Construction and Building Materials*. 2018. V. 158. P. 61–74.

17. Hung A., Goodwin A., Fini E. Effects of water exposure on bitumen surface microstructure // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 135. P. 682–688.

18. Fischer H., Dillingh E., Hermse C. On the interfacial interaction between bituminous binders and mineral surfaces as present in asphalt mixtures // *Applied Surface Science*. 2013. V. 265. P. 495–499.

19. Pugin K.G. Issues of the ecology of the use of solid wastes of ferrous metallurgy in building materials // *Stroitelnye materialy*. 2012. No. 8. P. 54–56 (in Russian).

20. Pugin K.G. Scientific basis for minimization of negative impacts on the geosphere when using industrial waste in construction: Diss. ... doktora tekhn. nauk. Perm: PNIPU. 2016. 261 p. (in Russian).