

DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-3-43-50

*Траутвайн А.И. *, кандидат технических наук, доцент,
Акимов А.Е., кандидат технических наук,
Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, Россия,
Черногиль В.Б., научный консультант,
ООО «Научно-Производственное Предприятие
«Завод Инновационного Промышленного Оборудования», Россия
Ответственный автор E-mail: trautvain@bk.ru

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ГРУНТА, УКРЕПЛЕННОГО ОТХОДАМИ КЛИНКЕРНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Аннотация: специфика строительства автомобильных дорог заключается в использовании огромного объема различных каменных материалов – песка, щебня и др. Для снижения стоимости дорожных одежд возможна замена каменных материалов местными грунтами. Такие материалы не нужно перевозить автомобильным или железнодорожным транспортом. При этом известно, что большинство грунтов не может использоваться при возведении земляного полотна (супесь и суглинков легкие пылеватые и тяжелые пылеватые, глина пылеватая и жирная), так как их применение приводит к появлению различных деформаций верхних слоев дорожной одежды. Решить эту задачу возможно путем укрепления грунтов различными видами вяжущих, в частности, отходами клинкерного производства. При проведении экспериментальных исследований по оценке эффективности использования отхода клинкерного производства для укрепления грунтов были исследованы следующие составы без использования: грунт и 9% отхода; грунт и 18% отхода; грунт и 27% отхода. В результате исследований выявлены основные зависимости изменения физико-механических показателей грунтобетона от количества вводимого отхода клинкерного производства в состав различных видов грунтов. Было установлено, что применение отхода клинкерного производства для укрепления суглинка позволило получить укрепленный грунт марки М20. Укрепление песка отходом клинкерного производства без добавления цемента нецелесообразно, так как образцы не набирают даже минимальную прочность в течение 180 суток, позволяющие классифицировать их по марке, кроме того такие образцы обладают крайне низкой водостойкостью.

Ключевые слова: отходы клинкерного производства, укрепление, грунт, суглинок, песок, физико-механические характеристики

Введение

Увеличение интенсивности движения и грузоподъемности автотранспорта, расширение дорожных сетей ставят задачи необходимости не только повышения долговечности дорожных конструкций, но и использования при строительстве автомобильных дорог местных материалов и грунтов. Так как большинство регионов испытывают нехватку каменных материалов для возведения оснований, а их транспортировка связана с дополнительными затратами, то необходимость использования в конструкциях дорожных одежд местных грунтов становится очевидной [1-2].

Способы комплексного укрепления грунтов в зависимости от вида вяжущего делятся на основные категории [3-5]:

- укрепление грунтов цементом;
- укрепление грунтов известью;
- шлаковое укрепление;
- комбинированное (комплексное) укрепление.

В результате взаимодействия неорганических вяжущих и коллоидноглинистой составляющей грунты образуют материалы, обладающие более высокой морозостойкостью и долговечностью. В особенности это относится к комплексно укрепленным грунтам [1-2].

В сталеплавильной промышленности в процессе производства образуется до 30% шлака.

В строительстве чаще всего используют доменные шлаки, получаемые при выплавке чугуна. В процессе производства сталеплавильных шлаков образуется меньше, нежели доменных. Сталеплавильные шлаки отличаются способностью к увеличению в размере при гидратации оксидов магния и кальция, которые находятся в составе шлаков. Их использование приводит к появлению в цементном камне внутренних напряжений, из-за чего образуются трещины. Данная особенность не имеет большого значения при строительстве дорожных оснований [6-10].

Укрепление всех видов грунтов гранулированными и молотыми шлаками имеет положительные стороны. Молотый шлак используется как вяжущее, а граншлак - активной составляющей скелета. Комплексная модификация грунта существенным образом меняет процесс структурообразования грунтобетона во времени [10-12].

Таким образом, при укреплении грунтов различными видами вяжущих на основе отходов производства, важным условием является соблюдение дозировки, а также дисперсности, которые оказывают значительное влияние на характеристики и физико-механические свойства грунта.

Материалы и методы

Определение гранулометрического состава исходных отходов клинкерного производства осуществляли по ГОСТ 8735-88 «Песок для строительных работ. Методы испытаний». Результаты рентгенодифрактометрических исследований отходов клинкерного производства были получены с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра серии ARL 9900 WorkStation в ЦВТ БГТУ им. В.Г. Шухова.

Измельчение отходов до удельной поверхности равной 300 м²/кг осуществляли в шаровой планетарной мельницы Retsch PM100 лабораторного типа. Определение величины удельной поверхности исследуемого материала проводили на приборе Товарова.

Активность отходов клинкерного производства до и после измельчения исследовали согласно ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний». При этом максимальную плотность теста на основе отходов исследовали до и после измельчения на малом приборе СоюзДорНИИ.

Образцы грунта, укрепленного цементом, готовили согласно ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» (укрепленные грунты).

Определение предела прочности при сжатии осуществляли по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Водонасыщение укрепленных грунтов определяли в соответствии с 4.7.4 ГОСТ 12801-98.

Результаты и обсуждения

Для проведения исследований использовались следующие грунты: суглинок легкий песчаный, песок тонкий, именуемые в дальнейшем суглинок и песок. Классификацию грунтов проводили согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация». Физико-механические характеристики исходных грунтов представлены в табл. 1, гранулометрический состав – в табл. 2. Содержание пылевидных и глинистых частиц в природном песке 4,1%, коэффициент фильтрации 2,3 м/сут.

Таблица 1

Физико-механические характеристики исходных грунтов

Table 1

Physical and mechanical characteristics of the source soil

Наименование показателя	Вид грунта	
	Суглинок твердый	Песок тонкий
Естественная влажность, $W_{ест}$, %	16,5	7,05
Влажность на границе текучести, W_L , %	34,22	-
Влажность на границе раскатывания, W_p , %	26,25	-
Число пластичности, I_L	8,0	-
Максимальная плотность, ρ_{max} , г/см ³	1,70	1,64
Оптимальная влажность, $W_{опт}$, %	24,3	13,2

Таблица 2

Гранулометрический состав грунтов

Table 2

Granulometric composition of soils

Размер сит, мм	1	0,5	0,25	0,1	0,05	<0,05
Суглинок твердый						
Частные остатки, %	0,27	1,0	4,0	22,7	14,9	57,2
Полные остатки, %	0,27	1,2	5,2	27,9	42,8	100,0
Полные проходы, %	99,73	98,8	94,8	72,1	57,2	0,0
Песок тонкий						
Размер сит, мм	0,63	0,315	0,16	0,07	<0,071	0,63
Частные остатки, %	0,1	12,4	76,9	6,5	4,1	0,1
Полные остатки, %	0,10	12,50	89,40	95,90	100	0,10
Полные проходы, %	99,90	87,50	10,60	4,10	0,00	99,90

Для укрепления грунтов использовали отходы клинкерного производства в комплексе с цементом ЦЕМ П/А-Ш 22,5. Минералогический и гранулометрический состав отходов клинкерного производства, именуемого в дальнейшем отход, представлен в табл. 3 и на рис. 1 соответственно, результаты рентгенодифрактометрических исследований представлены на рис. 2.

Таблица 3

Химический состав отходов клинкерного производства

Table 3

The chemical composition of clinker production waste

Наименование основных минералов	Количество, %	Наименование основных минералов	Количество, %	Наименование основных минералов	Количество, %
CaO	49,18000	Cr ₂ O ₃	0,17400	Au	0,01490
Fe ₂ O ₃	22,26000	Rh ₂ O ₃	0,10700	SnO ₂	0,01290
SiO ₂	12,69000	PtO ₂	0,07400	Nb ₂ O ₅	0,01190
MgO	6,53000	RuO ₄	0,04720	Ag ₂ O	0,01180
Al ₂ O ₃	3,85000	K ₂ O	0,02760	Ga ₂ O ₃	0,00810
MnO	2,59000	SrO	0,02490	ZrO ₂	0,00710
P ₂ O ₅	0,95700	TeO ₂	0,02460	ZnO	0,00600
TiO ₂	0,39500	I	0,02290	PbO	0,00540
SO ₃	0,32600	Sb ₂ O ₃	0,02190	Co ₃ O ₄	0,00440
V ₂ O ₅	0,31700	PdO	0,01930	Y ₂ O ₃	0,00190
Na ₂ O	0,25300	ThO ₂	0,01520		

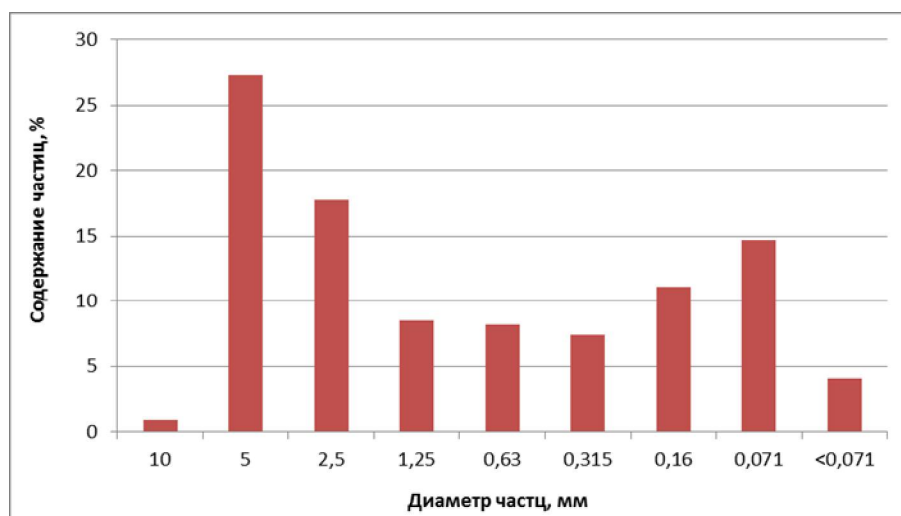


Рис. 1. Гранулометрический состав отходов клинкерного производства
Fig. 1. Granulometric composition of clinker production waste

На основании представленных результатов установлено, что отходы клинкерного производства представлены в основном такими минералами:

- портландит: $\text{Ca}(\text{OH})_2$;
- силикат кальция, магния, железа: $\text{Ca}_2\text{Fe}_{1.2}\text{Mg}_{0.4}\text{O}_5$;
- бремиллерит: оксид кальция, железа, магния, кремния (C_4AF – четырехкальцевый алюмоферрит) - $\text{Ca}_2\text{Fe}_{1.4}\text{Mg}_{0.3}\text{SiO}_5$;
- силикат кальция: Ca_2SiO_4 , Ca_3SiO_5 ;
- сребродолскит: $\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$;
- гидрат силиката кальция: $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$;
- оксид кальция, алюминия, железа: $\text{Ca}_2\text{Al}_{1.38}\text{Fe}_{0.32}\text{O}_5$;
- гидрат сульфата кальция: $\text{Ca}_2\text{SiO}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$;
- оксид марганца: Mn_3O_4 ;
- оксиды железа: вюстит - FeO , магнетит – Fe_3O_4 .

По содержанию основных оксидов отходы клинкерного производства относятся к основному материалу.

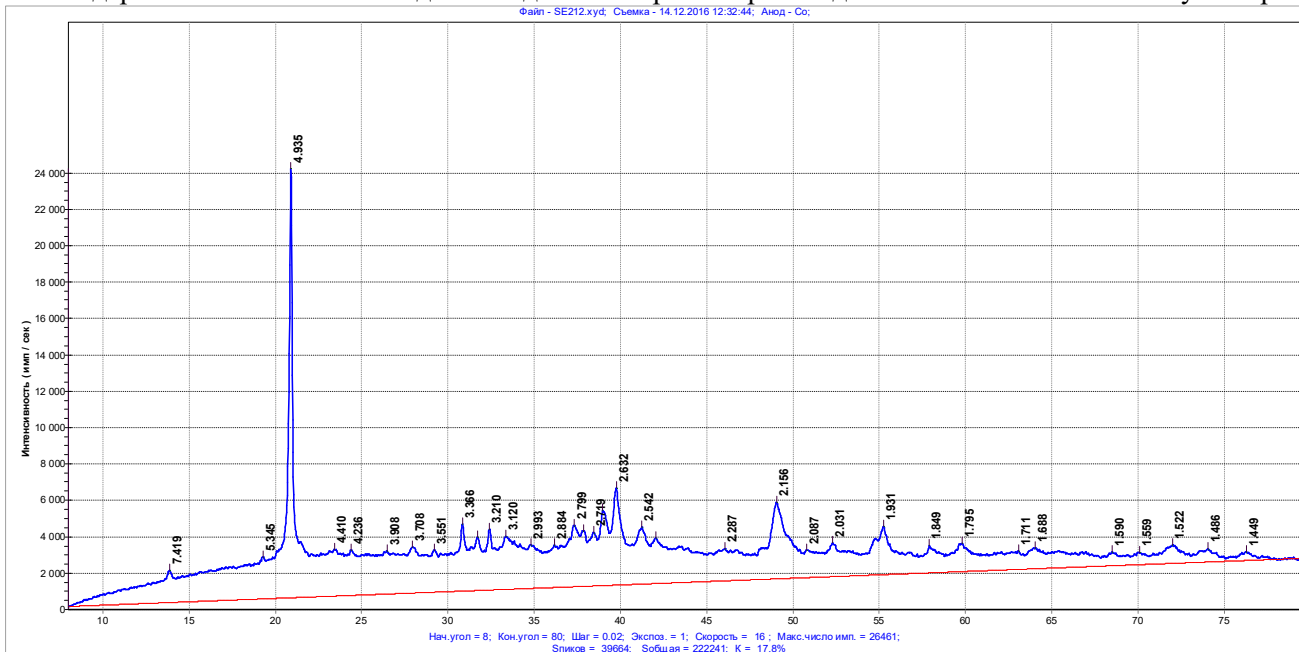


Рис. 2. Результаты рентгенодифрактометрических исследований отходов клинкерного производства
Fig. 2. X-ray diffractometric studies results of clinker production wastes

При проведении экспериментальных исследований по оценке эффективности использования отхода клинкерного производства для укрепления грунтов были исследованы следующие составы без использования цемента (составы определены техническим заданием заказчика):

- грунт и 9% отхода;
- грунт и 18% отхода;
- грунт и 27% отхода.

Принимая во внимание тот факт, что введение отхода клинкерного производства совместно с цементом или без него изменит гранулометрический состав грунта, а, следовательно, его максимальную плотность и оптимальную влажность, были проведены испытания по определению максимальной плотности и оптимальной влажности смесей грунта и отхода клинкерного производства по методу стандартного уплотнения. Результаты приведены на рис. 3-4.

Как видно из приведенных данных, введение отхода клинкерного производства существенно увеличивает оптимальную влажность и максимальную плотность грунта вследствие большого удельного веса отхода и высокого содержания мелких фракций. Максимальная плотность песка без введения отхода составила $1,65 \text{ г/см}^3$, песка с 9% отхода – $1,72 \text{ г/см}^3$, с 18% – $1,74 \text{ г/см}^3$, с 27% – $1,75 \text{ г/см}^3$. При этом, оптимальная влажность составила 8,18; 8,21, 11,4 и 13,8% соответственно.

Иная тенденция наблюдается при введении отхода клинкерного производства в суглинок. Изначально высокая максимальная плотность грунта незначительно снижается при добавлении 27% отхода клинкерного производства по причине изменения его гранулометрического состава, в частности, уменьшения относительного содержания пылеватых частиц. Также наблюдается незначительное снижение оптимальной влаж-

ности. Добавление меньшего количества отхода клинкерного производства не изменяет значение максимальной плотности.

По полученным данным максимальной плотности и оптимальной влажности были изготовлены образцы для определения основных физико-механических характеристик. Образцы грунтобетона на основе песка с 9% отхода показали прочность при сжатии менее 0,05 МПа, и все образцы грунтобетона на основе песка показали прочность на растяжение при расколе менее 0,01 МПа, поэтому эти данные в табл. 4 не внесены.

Полученные при испытаниях данные представлены в табл. 4 и 5.

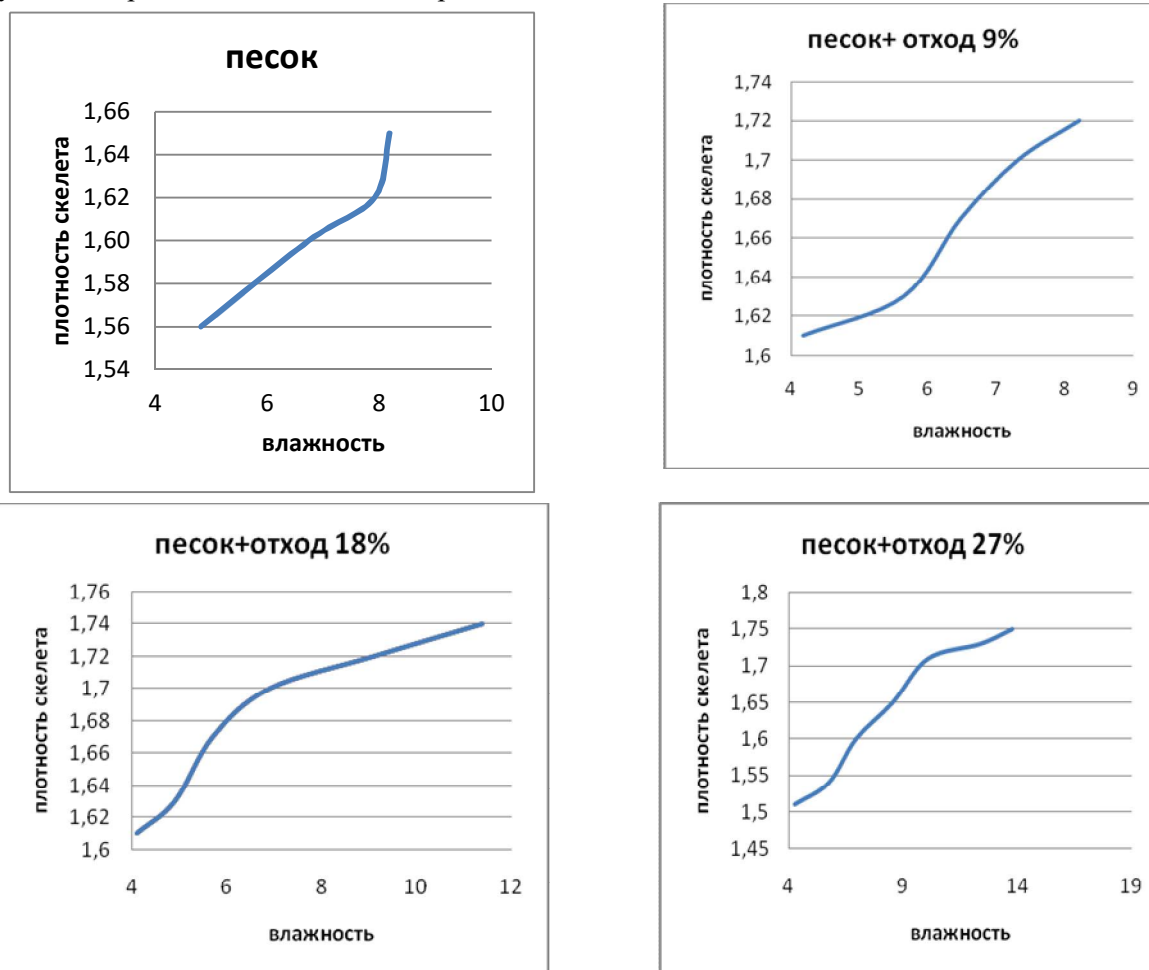


Рис. 3. Зависимость плотности от влажности для состава "песок-отход"
Fig. 3. The density dependence on humidity for the composition "sand-waste"

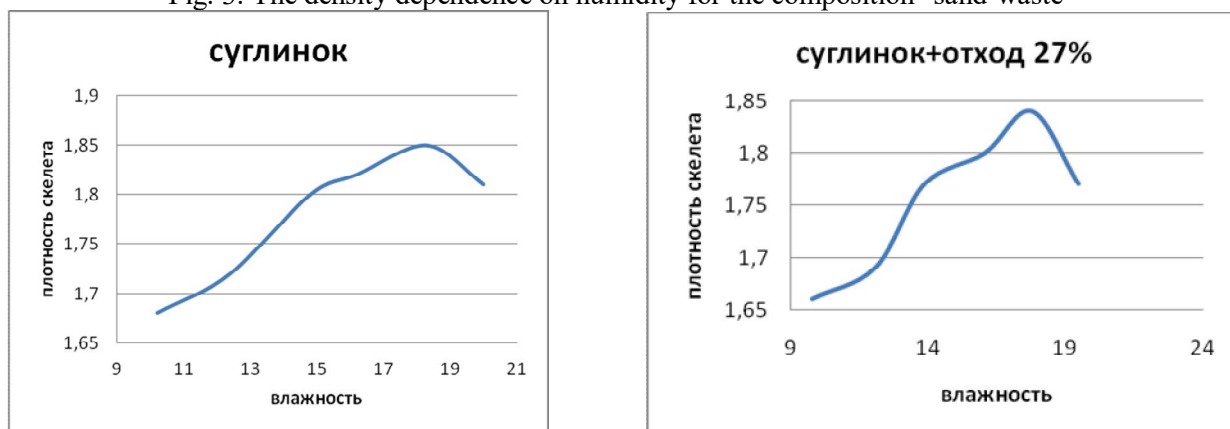


Рис. 4. Зависимость плотности от влажности для состава "суглинок-отход"
Fig. 4. The density dependence on humidity for the composition "loam-waste"

Испытание образцов на прочность при сжатии и на прочность при растяжении при расколе определялась после капиллярного водонасыщения в течении 72 часов. Образцы грунтобетона на основе песка частично разрушились в процессе водонасыщения, поэтому результаты испытаний грунтобетона на основе песка не внесены в табл. 5.

Водонасыщение и набухание образцов грунта, укрепленного отходами клинкерного производства, определялась по ГОСТ 12801. При этом, укрепленный грунт на основе суглинка подвергался полному водонасыщению в течение 48 часов.

Таблица 4

Прочностные характеристики образцов грунта, укрепленного отходом клинкерного производства

Table 4

Strength characteristics of soil samples reinforced by clinker production waste

Состав	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при растяжении при расколе МПа	Прочность при одноосном сжатии после полного водонасыщения, МПа
Суглинок+9% отхода	2,00	0,28	0,26
Суглинок+18% отхода	2,53	0,50	1,31
Суглинок+27% отхода	3,15	0,64	1,91
Песок+9% отхода	-	-	-
Песок+18% отхода	0,28	-	-
Песок+27% отхода	0,35	0,09	-

Таблица 5

Водонасыщение и набухание образцов грунта, укрепленного отходом клинкерного производства

Table 5

Water saturation and swelling of soil samples reinforced by clinker production waste

Состав	Водонасыщение, %	Набухание, %
Суглинок+9% отхода	2,81	16,08
Суглинок+18% отхода	1,68	14,49
Суглинок+27% отхода	1,30	9,57

Выводы

В ходе выполнения работы были проведены предварительные исследования использования нетрадиционного вида вяжущего при укреплении грунтов для дорожного строительства.

По результатам испытаний установлены следующие зависимости:

- укрепление песка отходом клинкерного производства без добавления цемента нецелесообразно, так как образцы не набирают даже минимальную прочность в течение 180 суток, позволяющие классифицировать их по марке, кроме того такие образцы обладают крайне низкой водостойкостью;
- применение отхода клинкерного производства для укрепления суглинка позволило получить укрепленный грунт марки М20;
- увеличение содержания отхода клинкерного производства с 9 до 18 и 27% позволило снизить водонасыщение с 2,81 до 1,30% и набухание с 14,49 до 9,57% соответственно.
- соотношение прочностей образцов грунтобетона после капиллярного и полного водонасыщения составило: 0,13 для суглинка с 9% отхода клинкерного производства, 0,52 для суглинка с 18% отхода и 0,61 для суглинка с 27% отхода.

Благодарность

Работа выполнена в рамках программы развития опорного университета на базе БГТУ им. В.Г. Шухова

Литература

1. Фомин А.П., Никанычева Е.В., Пудиков П.Н. Укрепление слабых грунтов // Автомобильные дороги. 2014. №8. С. 81 – 85.
2. Вдовин Е.А., Мавлиев Л.Ф., Строганов В.Ф. Пути повышения эффективности укрепления грунтов для строительства дорожных одежд // Вестник Сибирской государственной автомобильно-дорожной академии. 2013. №1 (29). С. 52 – 58.

3. Дмитриева Т.В., Строкова В.В., Безродных А.А. Влияние генетических особенностей грунтов на свойства грунтобетонов на их основе // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Т. 1. № 1. С. 69 – 77.
4. Панкова Т.А., Дасаева З.З. Применение гранулированных шлаков при получении строительных материалов // *Ответственный редактор*. 2015. С. 154.
5. Хаматова А.Р., Хохлаков О.В. Электросталеплавильный шлак ОАО «Ижсталь» для цементов низкой водопотребности и бетонов на их основе // *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2016. №2. С. 221 – 227.
6. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В., Павлова Л.Н. и др. Использование сталеплавильных шлаков в производстве материалов для дорожного строительства // *Экологический вестник России*. 2015. №6. С. 47 – 53.
7. Погромский А.С., Аниканова Т.В. Влияние длительного хранения электросталеплавильных шлаков в отвалах на их свойства // *Строительные материалы и изделия*. 2018. Т. 1. № 1. С. 32 – 39.
8. Kambole C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa // *Construction and Building Materials*. 2017. V. 148. P. 618 – 631.
9. Асмагулаев Б.А., Асмагулаев Р.Б., Езмахунови Р.Р. и др. Перспективы использования доменных гранулированных шлаков в дорожном строительстве Казахстана // В сборнике: *Архитектура. Строительство. Транспорт. Технологии. Инновации Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ»*. 2013. С. 254 – 262.
10. Oluwasola E. A., Hainin M. R., Aziz M. M. A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction // *Transportation Geotechnics*. 2015. V. 2. P. 47 – 55.
11. Ferreira V. J. et al. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment // *Journal of Cleaner Production*. 2016. V. 130. P. 175 – 186.
12. Maghool F. et al. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017. V. 19. Issue 4. P. 949 – 958.

References

1. Fomin A.P., Nikanycheva E.V., Pudikov P.N. Ukreplenie slabyyh gruntov. *Avtomobil'nye dorogi*. 2014. 8. P. 81 – 85. (rus.)
2. Vdovin E.A., Mavliev L.F., Stroganov V.F. Puti povysheniya ehffektivnosti ukrepleniya gruntov dlya stroitel'stva dorozhnyh odezhd. *Vestnik Sibirskoy gosudarstvennoy avtomobil'no-dorozhnoy akademii*. 2013. 1 (29). P. 52 – 58. (rus.)
3. Dmitrieva T.V., Strokovaya V.V., Bezrodnykh A.A. Vliyaniye geneticheskikh osobennostey gruntov na svoystva gruntobetonov na ih osnove. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2018. 1 (1). P. 69 – 77. (rus.)
4. Pankova T.A., Dasaeva Z.Z. Primeneniye granulirovannykh shlakov pri poluchenii stroitel'nykh materialov // *Otvetstvennyy redaktor*. 2015. P. 154. (rus.)
5. Hamatova A.R., Hohryakov O.V. EHlektrostaleplavil'nyj shlak ОАО «Izhstal'» dlya cementov nizkoj vodopotrebnosti i betonov na ih osnove. *Izvestiya Kazanskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta*. 2016. 2. P. 221 – 227. (rus.)
6. Buravchuk N.I., Gur'yanova O.V., Pavlova L.N. i dr. Ispol'zovaniye staleplavil'nykh shlakov v proizvodstve materialov dlya dorozhnogo stroitel'stva. *EHkologicheskij vestnik Rossii*. 2015. 6. P. 47 – 53. (rus.)
7. Pogromskiy A.S., Anikanova T.V. Vliyaniye dlitel'nogo hraneniya ehlektrostaleplavil'nykh shlakov v otvalah na ih svoystva. *Stroitel'nye materialy i izdeliya*. 2018. 1 (1). P. 32 – 39. (rus.)
8. Kambole C. et al. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials*. 2017. 148. P. 618 – 631.
9. Asmatulaev B.A., Asmatulaev R.B., Ezmahunovi R.R. i dr. Perspektivy ispol'zovaniya domennykh granulirovannykh shlakov v dorozhnom stroitel'stve Kazahstana. V sbornike: *Arhitektura. Stroitel'stvo. Transport. Tekhnologii. Innovacii Materialy Mezhdunarodnogo kongressa FGBOU VPO «SibADI»*. 2013. P. 254 – 262. (rus.)
10. Oluwasola E. A., Hainin M. R., Aziz M. M. A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015. 2. P. 47 – 55.
11. Ferreira V. J. et al. Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment. *Journal of Cleaner Production*. 2016. 130. P. 175 – 186.
12. Maghool F. et al. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials // *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017. 19. Issue 4. P. 949 – 958.

*Trautvain A.I. *, Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.), Associate Professor,
Akimov A.E., Candidate of Engineering Sciences (Ph.D.),
Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Russia,
Chernogil V.B., Scientific Consultant,
LLC "Research and Production Enterprise
"Plant of Innovative Industrial Equipment", Russia
Corresponding author E-mail: trautvain@bk.ru

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF VARIOUS TYPES OF SOIL STRENGTHENED BY CLINKER WASTE

Abstract: the specificity of the construction of roads is the use of a huge amount of various stone materials - sand, gravel, etc. To reduce the cost of road pavements, it is possible to replace stone materials with local soils. Such materials do not need to be transported by road or rail. It is known that most soils cannot be used in the construction of the road bed (sandy loam and loam are light dusty and heavy dusty, clay dusty and oily), as their use leads to the appearance of various deformations of the upper layers of road pavement. This problem can be solved by strengthening the soil with various types of binders, in particular, clinker waste. When conducting experimental studies to assess the effectiveness of the use of waste clinker production to strengthen the soil the following compositions without using: soil and 9% waste; soil and 18% waste; soil and 27% waste were investigated. As a result of the research, the main dependences of the changes in the physical and mechanical parameters of the soil concrete on the amount of waste clinker production introduced into the composition of various types of soils were identified. It was found that the use of waste clinker production to strengthen the loam allowed to obtain a reinforced soil brand M20. Strengthening sand with clinker production without the addition of cement is not practical, as the samples do not gain even minimal strength for 180 days, which allows them to be classified by brand, in addition, such samples have extremely low resistance.

Keywords: clinker production, fortification, soil, loam, sand, physical and mechanical characteristics

Для цитирования: Траутвайн А.И., Акимов А.Е., Черногиль В.Б. Изучение физико-механических характеристик различных видов грунта, укрепленного отходами клинкерного производства // Строительные материалы и изделия. 2018. Том 1. №3. С. 43 – 50. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-3-43-50

For citation: Trautvain A.I., Akimov A.E., Chernogil V.B. Study of physical and mechanical characteristics of various types of soil strengthened by clinker waste. Construction Materials and Products. 2018. 1 (3). P. 43 – 50. DOI: 10.34031/2618-7183-2018-1-3-43-50

*Поступила в редакцию 20 января 2018 г.
Принята в доработанном виде 19 марта 2018 г.
Одобрена для публикации 2 июля 2018 г.*

*Received: January 20, 2018.
Revised: March 19, 2018.
Accepted: July 2, 2018.*