

Рубрика 1. ТЕХНОЛОГИИ И ПРОЕКТЫ

Направление – Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей

УДК [UDC] 693.3:691.335:504.05

DOI 10.17816/transsyst20228228-42

© В.Я. Соловьева, А.С. Сахарова, Е.Г. Еремеев

Петербургский государственный университет путей сообщения

Императора Александра I

(Санкт-Петербург, Россия)

ИННОВАЦИОННЫЕ СПОСОБЫ ПОДГОТОВКИ ОСНОВАНИЯ ТРАНСПОРТНЫХ МАГИСТРАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОГЕННЫХ ОБРАЗОВАНИЙ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ПРОИЗВОДСТВА

Обоснование: Для эффективного укрепления проблемных грунтов на основе глин или мелких пылеватых песков, необходимо производить их предварительную стабилизацию, например, при помощи гранулированного доменного шлака.

Цель: использование многотоннажных шлаков разной природы для высокоэффективной подготовки оснований при создании дорожного покрытия.

Методы: в качестве основного объекта исследований рассматривались грунты природного и техногенного происхождения: глины, пески, асфальтогранулят. Физико-механические исследования грунтов природного происхождения проводились в соответствии с ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик», коэффициент фильтрации определялся по ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации». Физико-механические характеристики асфальтобетона определялись по ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний». Компонентный состав шлака внепечной обработки определялся с помощью рентгенофазового анализа. Испытание затвердевших образцов осуществлялось в водонасыщенном состоянии по ГОСТ 10180-20125 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Определение величины водопоглощения по массе укрепленного грунта производилось по ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Методы определения водопоглощения».

Результаты: укрепление предварительно подготовленных грунтов любой природы эффективно осуществлять при использовании пониженного расхода цемента в сочетании с комплексной химической добавкой «Наноактив-М» и тонкомолотым доменным шлаком.

Выводы: комплексное использование металлургических шлаков различного вида при укреплении грунтов обеспечивает эффективное решение технологической, экономической и экологической проблемы современности.

Ключевые слова: грунты, глины, мелкие пески, техногенные продукты, асфальтобетон, шлаки, укрепление, уплотнение, прочность.

Rubric 1. TECHNOLOGIES AND PROJECTS

Field – Design and Construction of Roads, Subways, Airfields, Bridges and Transport Tunnels

© V.Y. Soloviova, A.S. Sakharova, E.G. Ereemeev

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University
(St. Petersburg, Russia)

INNOVATIVE METHODS FOR PREPARING THE BASE OF TRANSPORT HIGHWAYS OF THE USE OF TECHNOGENIC FORMATIONS OF METALLURGICAL PRODUCTION

Background: In order to effectively reinforcement problem soils based on clay or fine powdery sand, it is necessary to pre-stabilize them, for example, using granulated blast-furnace slag.

Aim: the use of multi-tonnage slags of various nature for highly efficient preparation of bases in the construction of road surfaces.

Methods: soils of natural and technogenic origin were considered as the main object of research: clays, sands, asphalt granulate. Physical and mechanical studies of soils of natural origin were carried out in accordance with GOST 5180-2015 «Soils. Methods for laboratory determination of physical characteristics», the filtration coefficient was determined according to GOST 25584-2016 «Soils. Methods for laboratory determination of the filtration coefficient». The physical and mechanical characteristics of asphalt concrete were determined according to GOST 12801-98 «Materials based on organic binders for road and airfield construction. Test Methods». The component composition of the out-of-furnace slag was determined using X-ray phase analysis. Testing of hardened samples was carried out in a water-saturated state according to GOST 10180-20125 «Concrete. Methods for determining the strength of control samples. The determination of the water absorption value by the mass of the reinforced soil was carried out according to GOST 12730.3-78 «Concrete. Methods for determining water absorption».

Results: reinforcement of pre-prepared soils of any nature is effectively carried out using a reduced consumption of cement in combination with the Nanoaktiv-M complex chemical additive and finely ground blast-furnace slag.

Conclusion: the complex use of various types of metallurgical slags in soil reinforcement provides an effective solution to the technological, economic and environmental problems of our time.

Key words: soils, clays, fine sands, technogenic products, asphalt concrete, slags, reinforcement, compaction, strength.

ВВЕДЕНИЕ

Для создания эффективного дорожного покрытия требуется тщательная подготовка основания. В истории строительных технологий в качестве основания использовались и используются до настоящего времени грунты природного происхождения (пески, супеси, суглинки,

глины, скальные и крупнообломочные породы, и др.), залегающие непосредственно в районе строительства, а также используются техногенные грунты, такие как асфальтогранулят, щебень, искусственные почвосмеси и др.). Однако ни те, ни другие не могут обеспечить необходимую прочность в естественном или первоначальном виде, в котором они находятся. В связи с этим применяют различные способы стабилизации и укрепления грунтов [1–3].

На сегодняшний день для укрепления грунтов широко применяются различные составы на основе цемента: портландцемента, шлакопортландцемента, известково-шлакового цемента, а также других видов цемента марок не ниже 300 [4, 5]. Недостатком данного способа является высокая стоимость данных материалов. Поэтому особую актуальность приобретает поиск новых материалов, продуктов или отходов, которые позволили бы эффективно повысить прочность оснований природно-техногенных объектов для автомобильных и железных дорог.

Для повышения эколого-экономической эффективности при строительстве транспортных объектов целесообразно использовать различные виды техногенных образований [6–8].

Одним из направлений может быть рассмотрено металлургическое производство, где происходит образование значительного количества отходов, большую часть которых составляют металлургические шлаки, накопленные в отвалах. В Российской Федерации, по некоторым оценкам [9], только сталеплавильных шлаков накоплено свыше 250 миллионов тонн. Они занимают площадь около 1,3 тысяч гектаров. Кроме этого, в отвалы ежегодно сваливается более 5 миллионов тонн шлаков. Подобные отходы представляют собой огромную экологическую проблему, учитывая их химический и минералогический состав, который в большинстве случаев представляет твердый раствор, конечными продуктами которого являются геленит $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ и окерманит $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$. Можно предположить, что данные минералы являются ценным сырьем в области строительства, особенно в области дорожного строительства, при определенной целенаправленной их активации, например, при помощи химических добавок определенной природы.

Целенаправленное использование многотоннажных шлаков разной природы с целью создания эффективных бетонов или высокоэффективной подготовки оснований при создании дорожного покрытия путем высококачественного укрепления грунтов является важной и актуальной задачей настоящего времени [10–13], решение которой представлено в данном научно-экспериментальном исследовании.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве основного объекта исследований рассматривались грунты, которые представлены природными и техногенными материалами:

- 1) глинами;
- 2) песком;
- 3) асфальтогранулятом.

1. Глинистые грунты, как правило, характеризуются слоистой структурой, они хорошо поглощают влагу и достаточно хорошо удерживают ее в своей структуре, т.е. характеризуются пониженным коэффициентом фильтрации. Способность глинистого грунта удерживать влагу в повышенном количестве и достаточно долгое время является негативной характеристикой глинистого грунта, так как в зимний период, при пониженных отрицательных температурах, вода, удержанная глиной, замерзает, превращается в лед и значительно увеличивается в объеме, что приводит к пучению глинистого грунта, и, следовательно, к понижению его устойчивости, что оказывает отрицательное влияние на устойчивость верхнего дорожного покрытия [14, 15].

Основные физико-механические характеристики глинистого грунта, используемого в работе, следующие:

- влажность грунта в естественном состоянии – 21,3 %;
- насыпная плотность грунта в естественном состоянии – 1760 кг/м³;
- насыпная плотность грунта в сухом состоянии – 1367 кг/м³;
- число пластичности, t_p – 14,7;
- максимальная плотность грунта – 1,47 г/м³;
- коэффициент фильтрации – 0,0001 м/сут;
- содержание частиц < 0,005 мм – 73,2 %.

2. В данном научном исследовании рассматриваем грунт на основе песка мелкого, который относится к проблемным в естественном виде и без дополнительной эффективной активации не может быть использован в качестве надежного основания при строительстве транспортных магистралей.

При проведении физико-механических исследований песка по ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»; ГОСТ 25584-2016 «Грунты. Методы лабораторного определения коэффициента фильтрации» установлены следующие физико-механические характеристики:

- модуль крупности, M_k – 0,93;
- полный остаток на сите – 5,7 %;
- содержание пылевидных и глинистых частиц – 4,1 %;
- содержание глины в комках – 0,3%;
- насыпная плотность грунта в состоянии естественной влажности – 1570 кг/м³;

- насыпная плотность грунта в сухом состоянии – 1410 кг/м³;
- естественная влажность грунта – 7,6 %;
- коэффициент фильтрации – 0,03 м/сут.

Данный песок в соответствии с ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» соответствует песку пылеватому.

3. В качестве техногенного грунта рассматривали разрушенное асфальтобетонное покрытие, которое, в большинстве случаев, после эксплуатации измельчается путем фрезерования и используется в качестве эффективного материала при создании надежного основания в процессе строительства транспортных магистралей. При проведении научно-экспериментальных исследований использован асфальтобетон, физико-механические характеристики которого определены по ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний»; ГОСТ 5180-2015 «Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик»: зерновой состав асфальтобетона (представлен в Табл. 1);

Таблица 1. Зерновой состав минеральной части асфальтобетона

Полные остатки на ситах, мас. %	Диаметр отверстий контрольных сит, мм										
	25	20	15	10	5	2,5	1,25	0,65	0,16	0,05	<0,05
	4,6	7,3	11,8	33,7	51,2	65,6	79,6	93,7	98,1	99,3	0,7

Источник: составлено автором по результатам исследований

- коэффициент фильтрации – 3,1 м/сут;
- естественная влажность грунта – 1,7 %;
- содержание пылевидных и глинистых частиц – 3,7 %;
- содержание глины в комках – нет;
- насыпная плотность грунта в состоянии естественной влажности – 1476 кг/м³;
- насыпная плотность грунта в сухом состоянии – 1398 кг/м³.

4. В качестве вяжущего материала для укрепления грунтов разной природы рассматривали минеральное вяжущее – портландцемент ПЦ500-Д20 по ГОСТ 10178-85 со следующими физико-механическими характеристиками:

- нормальная густота цементного теста – 26,5 %;
- начало схватывания, мин. – 160;
- конец схватывания, мин. – 265;
- прочность на сжатие в возрасте 28 сут., МПа – 51,3;
- прочность при изгибе, МПа – 6,4.

5. Дополнительно к минеральному вяжущему для укрепления и уплотнения грунтов разной природы рассматривали побочные продукты металлургического производства.

В зависимости от технологических процессов (извлечение, рафинирование и легирование металлов) образуется несколько видов шлаков: гранулированный доменный шлак, тонкомолотый доменный шлак, а также шлак внепечной обработки стали.

Доменный шлак по своему составу близок к цементу и отличается от состава обыкновенного цемента меньшим содержанием CaO и большим содержанием SiO_2 и Al_2O_3 . Основной фазой доменного шлака является двухкальциевый силикат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, который обладает вяжущими свойствами, но для этого требуется интенсивное энергетическое воздействие [16]. Также в состав шлака входят сложные кристаллогидраты типа геленита $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$, тоже способного проявлять вяжущие свойства [17]. В результате резкого охлаждения (грануляции) жидкого доменного шлака получается гранулированный шлак, который, кроме указанных соединений, входящих в состав кристаллической фазы, содержит алюмосиликатное стекло, обладающее химической активностью.

Кроме доменных металлургических шлаков, гранулированных и тонкомолотых, побочным продуктом при производстве стали является шлак внепечной обработки.

По данным рентгенофазового анализа (Рис.) установлено, что в пробе шлака внепечной обработки присутствует в большом количестве кальциевый алюминат, представленный майенитом, $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ для которого основные дифракционные максимумы обнаружены при $d/n=(4,89; 2,68; 2,45)10^{-10}$ м, в качестве второго компонента обнаружен гамма-двухкальциевый силикат, $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$, для которого $d/n=(3,01; 2,74; 1,91)10^{-10}$ м и в качестве третьего компонента, в наименьшем количестве присутствует оксид железа с примесью лития (Li, Fe) для которого $d/n=(2,54; 2,10)10^{-10}$ м.

Основная фаза шлака внепечной обработки – алюминат кальция $12\text{CaO}\cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ – майенит, в большинстве случаев содержит небольшое количество (0-1) молекул структурной воды. Майенит характеризуется повышенной твердостью, которая имеет значение, равное 5 по шкале Мооса.

При проведении соответствующей активации использование металлургических шлаков позволит одновременно решить две важные задачи: оказать эффективное действие на улучшение параметров качества грунта при его укреплении при одновременной его утилизации в достаточно больших объемах.

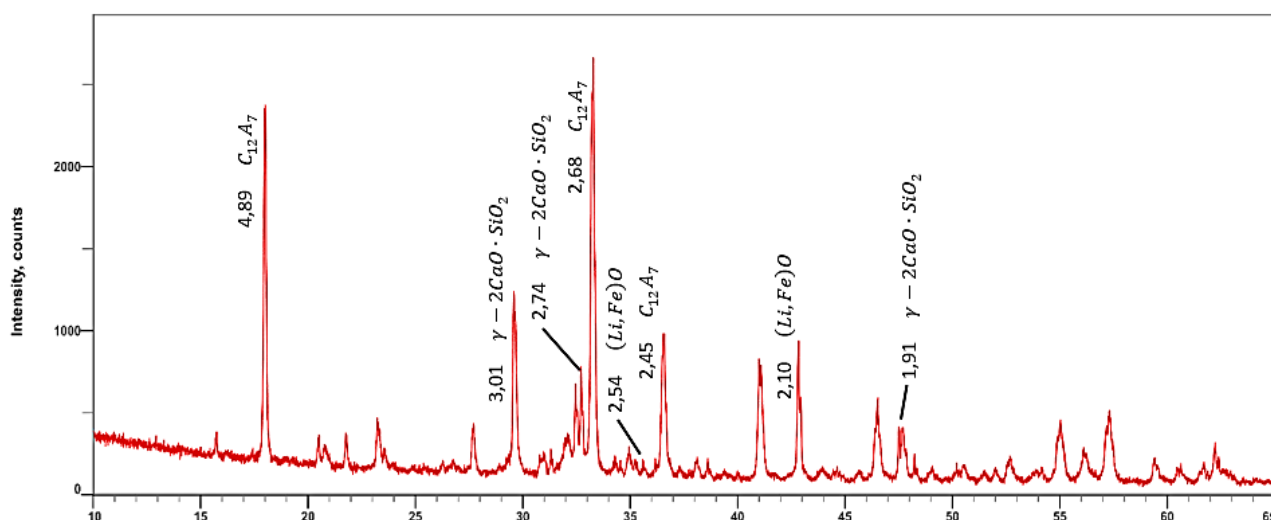


Рис. Рентгенограмма шлака внепечной обработки стали

6. В качестве активатора твердения использовали высокоэффективную комплексную химическую добавку «наноактив-М», которая выпускается по ТУ 5743-009-56147703-2013. Добавка представлена водным раствором поликарбоксилатных полимеров, модифицированных веществами органической и неорганической природы по ГОСТ 24211-2008 «Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия», плотность водного раствора добавки $\rho = 1,035 \text{ г/см}^3$ и значение водородного показателя $\text{pH} = 6,5$.

7. Оценку эффективности укрепления грунта осуществляли по изменению прочности на сжатие и прочности на растяжение при изгибе, а также по изменению степени уплотнения грунта, которое оценивали по величине водопоглощения по массе, W_m , %.

Для этого изготавливали образцы – балочки размером (40×40×160) мм методом прессования под давлением 20 МПа в соответствии с ГОСТ 12801-98 «Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний» и рекомендаций, представленных в документе «Пособие по строительству покрытий и оснований автомобильных дорог и аэродромов из грунтов, укрепленных вяжущими материалами к СНиП 3.06.03-85 и СНиП 3.06-88».

Твердение образцов осуществлялось в нормальных условиях: $t = (20 \pm 2)^\circ\text{C}$ и влажность воздуха $W \geq 95\%$.

Испытание затвердевших образцов осуществлялось в водонасыщенном состоянии по ГОСТ 10180-20125 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Определение величины водопоглощения по массе укрепленного грунта производилось по ГОСТ 12730.3-78 «Бетоны. Методы определения водопоглощения».

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

На первом этапе научно-экспериментального исследования проведено традиционное укрепление грунтов разной природы при помощи портландцемента, количество которого использовали в пределах (6-12) мас.% от массы грунта. Результаты по изменению показателей прочности на сжатие и на растяжение при изгибе и изменения показателей водопоглощения представлены в Табл. 2.

Таблица 2. Оценка эффективности действия портландцемента при укреплении грунтов разной природы

№ п/п	Наименование грунта	Количество портландцемента ПЦ500 Д20, мас.% от массы грунта	Прочность в возрасте 28 суток укрепленного грунта, МПа		Водопоглощение по массе укрепленного грунта, Wm%
			На сжатие	На растяжение при изгибе	
1	2	3	4	5	6
1	Глинистый грунт	3,0	0,9	0,12	11,2
2		6,0	1,6	0,24	10,4
3		9,0	1,6	0,23	10,3
4		12,0	1,3	0,21	10,7
5	Песок пылеватый	3,0	1,10	0,09	10,2
6		6,0	1,74	0,15	9,4
7		9,0	2,13	0,28	8,7
8		12,0	2,81	0,45	7,3
9	Грунт на основе асфальтобетона	3,0	2,78	0,46	4,1
10		6,0	4,76	0,81	3,7
11		9,0	6,83	1,12	3,2
12		12,0	6,96	1,18	3,1

Источник: составлено автором по результатам исследований

Анализ данных представленных в Табл. 2 показывает:

1. Сочетание глинистого грунта с портландцементом является не эффективным. Максимальное количество портландцемента составляет 6,0 мас.% от массы грунта, дальнейшее увеличение портландцемента является нецелесообразным, так как ни один из исследуемых параметров не улучшается. Глинистый грунт в присутствии рационального количества цемента не отличается уплотненной структурой, т.к минимальное значение величины водопоглощения составляет 10,4 % – это достаточно высокое значение. Для укрепления глинистого грунта недостаточно использовать только портландцемент.

2. Пески пылеватые в присутствии портландцемента в количестве 12 мас.% от массы грунта укрепляют грунт до марки М20, но при этом структура грунта также является недостаточно плотной, наименьшее

значение величины водопоглощения, $W_m \geq 7,0 \%$.

3. Наилучшие результаты по всем показателям достигаются при укреплении техногенного грунта на основе асфальтобетона. При максимальном расходе цемента, равном 12 мас.% от массы грунта, укрепленный грунт соответствует М60, но при этом укрепленный грунт по-прежнему обладает повышенной величиной водопоглощения, $W_m=3,1 \%$, что не обеспечит грунту достаточную морозостойкость и долговечность.

Для эффективного уплотнения структуры укрепляемого грунта рассматривали его предварительную стабилизацию при помощи доменного гранулированного шлака с последующим укреплением грунта при помощи тонкомолотого шлака в сочетании с портландцементом, комплексной химической добавкой, а также дополнительным использованием шлака внепечной обработки стали.

Результаты по стабилизации и укреплению грунта на основе глины представлены в Табл. 3. Анализ данных, представленных в Табл. 3 показывает, что для укрепления глинистого грунта принципиальное значение имеет его стабилизация при помощи гранулированного доменного шлака, что обеспечивает значительное уплотнение глины, до величины водопоглощения, $W_m=8,8 \%$. Рациональное количество гранулированного шлака составляет 25 % от массы грунта, дальнейшее увеличение шлака не улучшает характеристики грунта на основе глины.

По предварительным исследованиям (Табл. 2) установлено, что портландцемент в небольшом количестве ≈ 6 мас.% от массы грунта оказывает положительное влияние на свойства глинистого грунта, а в сочетании с гранулированным доменным шлаком, комплексной химической добавкой «Наноактив-М» и портландцементом, в том же рациональном количестве 6 мас.% от массы грунта, обеспечивает достаточно эффективное укрепление глинистого грунта [18]. По полученным показателям прочности и в соответствии с ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия» комплексно укрепленный грунт на основе глины соответствует \approx марке М40.

Предварительными экспериментальными исследованиями установлено, что шлак внепечной обработки стали (ВОС), абсолютно, не совместим с портландцементом, поэтому использование шлака ВОС рассматривали взамен использования портландцемента, также в сочетании с тонкомолотым доменным шлаком в сочетании с комплексной химической добавкой.

Полученные результаты, представленные в Табл. 3, показали, что шлак ВОС, в сочетании с указанными компонентами, по эффективности действия является аналогичным портландцементу, а также обеспечивает

получение укрепленного грунта М40 с величиной водопоглощения $W_m=3,6\%$.

Таблица 3. Физико-механические характеристики стабилизированного и укрепленного грунта на основе глины.

№ п/п	Наименование активатора					Прочность в возрасте 28 суток укрепленного грунта, МПа		Водопоглощение по массе укрепленного грунта, $W_m, \%$
	Гранулированный доменный шлак, мас. % от массы грунта	ПЩ 500 Д20, мас. % от массы грунта	Комплексная химическая добавка «Наноактив-М» мас. % от массы цемента	Тонкомолотый доменный шлак, мас. % от массы грунта	Шлак внепечной обработки стали, (ВОС), мас. % от массы грунта	На сжатие	На растяжение при изгибе	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	15	–	–	–	–	0,8	0,11	9,2
2	20	–	–	–	–	1,0	0,19	8,9
3	25	–	–	–	–	1,3	0,23	8,8
4	30	–	–	–	–	1,2	0,21	9,0
5	25	6,0	0,8	–	–	3,8	0,69	4,4
6	25	6,0	1,0	–	–	4,0	0,73	4,3
7	25	6,0	1,2	–	–	3,9	0,71	4,4
8	25	6,0	1,0	5,0	–	4,1	0,76	4,2
9	25	6,0	1,0	10,0	–	4,3	0,81	4,1
10	25	6,0	1,0	15,0	–	4,6	0,92	3,9
11	25	6,0	1,0	20,0	–	4,5	0,91	3,9
12	25	–	1,0	15,0	5,0	3,9	0,88	3,8
13	25	–	1,0	15,0	10,0	4,1	0,95	3,8
14	25	–	1,0	15,0	15,0	4,4	0,98	3,7
15	25	–	1,0	15,0	20,0	4,8	1,10	3,6
16	25	-	1,0	15,0	25,0	4,7	1,05	3,6

Источник: составлено автором по результатам исследований

Для улучшения параметров укрепленного грунта на основе песка пылеватого в соответствии с его природной тонкостью и формирующейся структурой рассмотрели его предварительную стабилизацию при помощи гранулированного доменного шлака и дополнительную активацию при помощи комплексной химической добавки и тонкомолотого доменного шлака. Полученные результаты представлены в Табл. 4.

Таблица 4. Физико-механические характеристики стабилизированного и укрепленного грунта на основе песка пылеватого

№ п/п	Наименование активатора				Прочность в возрасте 28 суток укрепленного грунта, МПа		Водопоглощение по массе укрепленного грунта, W_m , %
	Гранулированный доменный шлак, мас. % от массы грунта	ПЦ 500 Д20, мас. % от массы грунта	Комплексная химическая добавка «Наноактив-М» мас. % от массы цемента	Тонкомолотый доменный шлак, мас. % от массы грунта	На сжатие	На растяжение при изгибе	
1	2	3	4	5	7	8	9
1	15	–	–	–	1,54	0,26	6,9
2	20	–	–	–	1,71	0,28	6,4
3	25	–	–	–	1,96	0,35	6,2
4	30	–	–	–	1,95	0,34	6,3
5	25	7	1,0	–	6,64	1,26	3,1
6	25	9	1,0	–	7,86	1,49	2,9
7	25	7	1,0	15	7,92	1,61	2,8
8	25	9	1,0	15	9,41	1,98	2,6

Источник: составлено автором по результатам исследований

Анализ данных, представленных в Табл. 4, показывает очевидную эффективность стабилизации пылеватого песка гранулированным доменным шлаком с последующей его активацией при помощи портландцемента, комплексной химической добавки «Наноактив-М» и дополнительного использования тонкомолотого доменного шлака. Результаты, представленные в Табл. 4, показывают, что грунт на основе мелкого пылеватого песка может быть укреплен до показателей прочности, которые подтверждают образование основания М75 с величиной водопоглощения $W_m=2,8$ % при использовании портландцемента в количестве 7,0 мас. % от массы грунта в сочетании с комплексной химической добавкой и тонкомолотым доменным шлаком.

Наилучшие результаты по укреплению исследуемых грунтов получены при использовании техногенного асфальтобетонного материала. Для улучшения достигнутых характеристик рассмотрели дополнительное использование комплексной химической добавки «Наноактив-М» и тонкомолотого доменного шлака. Использовать гранулированный доменный шлак не целесообразно, т.к. зерна асфальтобетона имеют размер

от 5 до 25 мм. Результаты проведенных исследований представлены в Табл. 5.

Таблица 5. Физико-механические характеристики укрепленного грунта на основе техногенного асфальтобетонного материала

№ п/п	Наименование активатора			Прочность в возрасте 28 суток укрепленного грунта, МПа		Водопоглощение по массе укрепленного грунта, $W_m, \%$
	ИПЦ 500 Д20, мас. % от массы грунта	Комплексная химическая добавка «Наноактив-М» мас. % от массы цемента	Тонкомолотый доменный шлак, мас. % от массы грунта	На сжатие	На растяжение при изгибе	
1	2	3	4	5	6	7
1	6,0	–	–	4,76	0,81	3,7
2	9,0	–	–	6,83	1,12	3,2
3	6,0	1,0	–	6,0	1,16	2,7
4	9,0	1,0	–	8,6	1,64	2,3
5	6,0	1,0	15	7,6	1,57	1,4
6	9,0	1,0	15	11,0	2,31	1,1

Источник: составлено автором по результатам исследований

При проведении комплексной модификации техногенного асфальтобетонного материала обеспечивается создание достаточно плотного грунта с повышенной прочностью на сжатие и на растяжение при изгибе при пониженном расходе цемента. При расходе цемента, равного 6,0 мас. % от массы грунта, формируется грунт М75, а при расходе цемента в количестве 9,0 мас. % от массы грунта, укрепленный грунт соответствует М100.

С достигнутыми показателями по прочности укрепленные грунты могут быть рекомендованы для устройства надежного дорожного покрытия федерального значения.

ВЫВОДЫ

1. Научно-экспериментальные исследования показали, что проблемные глинистые грунты и грунты на основе мелкого пылеватого песка способны формировать прочную и плотную структуру в результате их эффективной стабилизации гранулированным доменным шлаком с последующей активацией портландцементом в сочетании с комплексной

химической добавкой «Наноактив-М» и тонкомолотым доменным шлаком.

2. Комплексная стабилизация и последующая модификация обеспечивает создание грунта на основе глины М40, а на основе мелкого пылеватого песка – М75.

3. Техногенный асфальтобетонный грунт при пониженном расходе цемента (6–9) мас.% от массы грунта в присутствии комплексной химической добавки «Наноактив-М» и тонкомолотого доменного шлака формирует прочное основание М75 и М100, соответственно.

4. Установлено, что использование металлургических шлаков различного вида эффективно с технологической, экономической и экологической точек зрения:

- уменьшается расход дорогостоящего портландцемента;
- повышается эффективность укрепления проблемных грунтов;
- осуществляется целенаправленная утилизация больших объемов техногенного продукта металлургического производства.

Авторы заявляют, что:

1. У них нет конфликта интересов.
2. Настоящая статья не содержит каких-либо исследований с участием людей в качестве объектов исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК / References

1. Кушхов Р.Б., Семен А.Э., Турдаков С.В. Современные методы укрепления слабых грунтов и повышения устойчивости земляного полотна на слабом основании / Сборник научных трудов по материалам III Международной научно-практической конференции «Современные тенденции в науке, технике, образовании». В 2-х частях. 31 марта 2018 года, Смоленск. Смоленск: ООО «НОВАЛЕНСО», 2018. – С. 54–56. [Kushhov RB, Semen AJe, Turdakov SV. Sovremennye metody ukreplenija slabых gruntov i povыshenija ustojchivosti zemljanogo polotna na slabom osnovanii. In Sbornik nauchnyh trudov po materialam III Mezhdunarodnoj nauchno-prakticheskoj konferencii “Sovremennye tendencii v nauke, tehnike, obrazovanii”. V 2-h chastjah. 31 marta 2018 goda, Smolensk. Smolensk: NOVALENZO, 2018. p. 54-56. (In Russ.)]. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=32861684&selid=32861712> Ссылка активна на 14.02.2022.
2. Золотухин С.Н., Чигарев А.Г., Ларионов С.Г. Совершенствование технологии укрепления грунтов с одновременным проведением инженерно-геологических изысканий // Инновационные, информационные и коммуникационные технологии. – 2019. – № 1. – С. 511–515. [Zolotuhin SN, Chigarev AG, Larionov SG. Sovershenstvovanie tehnologii ukreplenija gruntov s odnovremennym provedeniem inzhenerno-geologicheskikh izyskanij. *Innovacionnye, informacionnye i kommunikacionnye tehnologii*. 2019,1:511-515 (In Russ.)]. Доступно по: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41480234_62841164.pdf Ссылка активна на: 14.02.2022.
3. Евсеев А.В. Причины, обуславливающие необходимость укрепления грунтов при подземном строительстве // Инновации и инвестиции. – 2018. – № 5. – С. 379–380. [Evseev AV. Prichiny, obuslavlivajushhie neobhodimost' ukreplenija gruntov pri

- podzemnom stroitel'stve. *Innovacii i investicii*. 2018,5:379-380 (In Russ.)). Ссылка активна на: 14.02.2022. Доступно по: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41495869>
4. Сычева А.М., Соломахин А.С., Яснова Н.С. и др. Применение полимерцементного пенобетона для повышения срока службы железнодорожного полотна. Транспортное строительство. – 2017. – № 6. – С. 21–23. [Sycheva AM, Solomahin AS, Jasnova NS, et al. Primenenie polimercementnogo penobetona dlja povyshenija sroka sluzhby zheleznodorozhnogo polotna. *Transportnoe stroitel'stvo*. 2017(6):21-23 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 16.02.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=30048658>
 5. Malchevskaya K, Sakharova A, Kabanov A. Soil Reinforcement and Detoxication by Means of Mineral Binder Systems. *Procedia Engineering*. 2017;189:582–586. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.092
 6. Shershneva M, Kozlov I, Pankrateva G, et al. Geocoprotective building structures for transport construction using mineral technogenic silicates and their properties. In: Petriaev A, Konon A, editors. *Lecture Notes in Civil Engineering. Proceedings of 4th International Scientific Conference on Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD)*, 2019 May 20-23; St. Petersburg, Russia. Singapore: Springer; 2020. p. 319-327. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9_33
 7. Shershneva MV, Makarova EI, Efimova NN. Minimization of negative impact from solid waste landfills with use of mineral geoantidotes. *Procedia Engineering*. 2017;189:315-319. doi: 10.1016/j.proeng.2017.05.050
 8. Svatovskaya L, Sychev M, Drobyshev I. Geosphere Protection on the Base of Foam Building Systems. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;272(2):022161. doi: 10.1088/1755-1315/272/2/022161
 9. Shahbazi M; Rowshanzamir M, Abtahi SM, et al. Optimization of carpet waste fibers and steel slag particles to reinforce expansive soil using response surface methodology. *Applied clay science*. 2017;142:185-192. doi: 10.1016/j.clay.2016.11.027
 10. Zurinskas D, Vaiciukyniene D, Stelmokaitis G, et al. Clayey Soil Strength Improvement by Using Alkali Activated Slag Reinforcing. 2020,10 (12) doi: 10.3390/min10121076
 11. Yang CJ, Bae JS, Byun HS, et al. Analysis of Mechanical Properties of Solidified soil using Pig Iron Slag. *Journal of the korean geosynthetic society*. 2018,17(1):1-10. doi: 10.12814/jkgss.2018.17.1.001
 12. Maslennikova LL, Babak NA, Naginskii IA. Modern building materials using waste from the dismantling of buildings and structures. *Materials Science Forum*. 2018,945 MSF:1016-1023. doi: 10.4028/www.scientific.net/MSF.945.1016
 13. Козлов И.С., Ли Р. Геоэкологическое решение укрепления строительного грунта с использованием кремнезоля. Естественные и технические науки. – 2018. – № 12(126). – С. 233–236. [Kozlov IS, Li R. Geoecological solution of strengthening construction soil with using silica sol. *Natural and technical sciences*. 2018,12(126):233-236. (In Russ.)]. Ссылка активна на: 16.02.2022. Доступно по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=36760457>
 14. Abu-Khasan M, Egorov V. The Influence of Different Types of Reinforcement on the Deformation Characteristics of Clay Soil in the Conditions of Seasonal Freezing and Thawing. *IOP Conference Series: materials science and engineering*. 2020: 022041. doi: 10.1088/1757-899X/753/4/042083
 15. Юшков Б.С., Дегтярь А.А. Укрепление слабых пучинистых грунтов в дорожном строительстве методом устройства двухконусных пустотелых свай. Дороги и мосты. – 2015. – № 1(33). – С. 45–66. [Jushkov BS, Degtjar AA. Ukreplenie slabyh puchinistykh gruntov v dorozhnom stroitel'stve metodom ustrojstva dvuhkonusnykh pustotelykh svaj. *Dorogi i mosty*. 2015,1(33):45-66 (In Russ.)]. Ссылка активна на: 16.02.2022. Доступно

по: <https://elibrary.ru/item.asp?id=24862013>

16. Shershneva MV, Chernakov VA, Bobrovnik AB. Features of geoeoprotective properties' manifestation of some silicate-containing waste products. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2019;022025. doi: 10.1088/1755-1315/272/2/022025
17. Кнатько В.М., Кнатько М.В., Щербакова Е.В., Лаздовская М.А. Оперативная оценка эффективности химических реагентов при укреплении дисперсных грунтов путем синтеза неорганических вяжущих веществ // Грунтоведение. – 2013. – № 1. – С. 56–59. [Knat'ko VM, Knat'ko MV, Shherbakova EV, Lazdovskaja MA. Operativnaja ocenka jeffektivnosti himicheskikh reagentov pri ukreplenii dispersnyh gruntov putem sinteza neorganicheskikh vjazhushhih veshhestv. *Gruntovedenie*. 2013,1:56-59(In Russ.)]. Ссылка активна на: 16.02.2022. Доступно по: <https://okhotin-grunt.ru/arhiv2/2013.pdf>
18. Solovieva V, Stepanova I, Soloviev D, et al. Increasing the level of properties of composite materials for civil engineering geoconstruction with the use of new generation additives. In: Petriaev A, Konon A, editors. *Lecture Notes in Civil Engineering*. Proceedings of 4th International Scientific Conference on Transportation Soil Engineering in Cold Regions (TRANSOILCOLD), 2019 May 20-23; St. Petersburg, Russia. Singapore: Springer; 2020. p. 387-393. doi: 10.1007/978-981-15-0454-9_40

Сведения об авторах:

Соловьева Валентина Яковлевна, д.т.н., профессор;
eLibrary SPIN: 1571-2027; ORCID: 0000-0002-2468-2128;
E-mail: 9046185117@mail.ru

Сахарова Антонина Сергеевна, к.т.н.,
eLibrary SPIN: 9047-0013; ORCID: 0000-0002-0735-1271;
E-mail: assakharova@list.ru

Еремеев Егор Георгиевич,
eLibrary SPIN: 5926-5905; ORCID: 0000-0002-1713-7973;
E-mail: eremeevigor@yandex.ru

Information about the authors:

Valentina Y. Solovieva, Doctor of Technical Sciences, Professor;
eLibrary SPIN: 1571-2027; ORCID: 0000-0002-2468-2128;
E-mail: 9046185117@mail.ru

Antonina S. Sakharova, candidate of technical sciences (PhD);
eLibrary SPIN: 9047-0013; ORCID: 0000-0002-0735-1271;
E-mail: assakharova@list.ru

Egor G. Eremeev;
eLibrary SPIN: 5926-5905; ORCID: 0000-0002-1713-7973;
E-mail: eremeevigor@yandex.ru

Цитировать:

Соловьева В.Я., Сахарова А.С., Еремеев Е.Г. Инновационные способы подготовки основания транспортных магистралей с использованием техногенных образований металлургического производства // Инновационные транспортные системы и технологии. – 2022. – Т. 8. – № 2. – С. 28–42. doi: 10.17816/transsyst20228228-42

To cite this article:

Solovieva VY, Sakharova AS, Eremeev EG. Innovative methods for preparing the base of transport highways of the use of technogenic formations of metallurgical production. *Modern Transportation Systems and Technologies*. 2022;8(2):28-42. doi:10.17816/transsyst20228228-42