

## Микроструктура золошлаковой смеси ТЭЦ, укрепленной портландцементом

Н.А. Слободчикова<sup>1</sup>, С.С. Шабуров<sup>1</sup>, Н.М. Полонов<sup>1</sup>, С.В. Клюев<sup>2, 3</sup>

<sup>1</sup>Иркутский национальный исследовательский технический университет

<sup>2</sup>Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

<sup>3</sup>Российский университет дружбы народов

**Аннотация:** Повторное применение золошлаковых отходов ТЭЦ имеет важное экономическое и экологическое значение. Укрепление золошлаковых смесей портландцементом позволяет повысить физико-механические свойства золошлаковых смесей: прочность, морозостойкость и др. Техническое понимание процессов структурообразования в укрепленных золошлаковых смесях позволяет регулировать конечные свойства и качество слоев автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** золошлаковые смеси, укрепленные грунты, структурообразование укрепленных грунтов, укрепление портландцементом, микроструктура золошлаковой смеси.

**Введение.** Ежегодно в Мире образуется около 1 млрд. т отходов от сжигания угля [1, 2]. Объемы их повторного использования и утилизации отдельных странах Мира отличается и достигают 100 % [1]. В Российской Федерации этот показатель низкий и составляет около 10 %.

Повторное применение золошлаковых отходов имеет важное экономическое и экологическое значение, т. к. накопление их объемов приводит к росту экологической нагрузки на окружающую среду. Одним из наиболее материалоемким направлением повторного использования золошлаковых отходов является строительство автомобильных дорог.

В российской практике дорожного строительства золошлаковые отходы принято подразделять золы-уноса, топливные шлаки и золошлаковые смеси.

В мировой практике дорожного строительства накоплен большой опыт применения этих материалов в конструкциях земляного полотна [3–5] и дорожных одежд [6–8]. Наибольший интерес представляет применение золошлаковых смесей в составах грунтов, укрепленных неорганическими

вяжущими материалами, т.к. именно золошлаковые смеси являются основным видом отходов, накопленным в золоотвалах России [9–11].

Для эффективного применения этих материалов в дорожном строительстве важно понимать особенности структурообразования золошлаковых смесей, укрепленных неорганическими вяжущими.

В связи с чем в работе поставлена цель – исследование структуры золошлаковых смесей, укрепленных цементом.

**Материалы и методы.** При проведении исследования использованы:

- Портландцемент с глиежем ЦЕМ II/A-Г32,5Б по ГОСТ 31108.
- Золошлаковая смесь от сжигания каменного угля ТЭЦ-12 (Иркутская область).

Для определения физико-механических характеристик проб золошлаковой смеси ТЭЦ-12 использованы методы ГОСТ 12536-2014, ГОСТ 25100-2020, ОДМ 218.2.031.

Изготовление образцов производится в соответствии с требованиями ГОСТ Р 70452-2022, ГОСТ Р 70456-2022.

Последовательность изготовления и хранения образцов:

1. Определение значений максимальной плотности и оптимальной влажности.
2. Изготовление образцов на уплотнителе Проктора.
3. Хранение и твердение образцов производится при относительной влажности воздуха  $95 \pm 5 \%$  и температуре  $20 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ .

К качественным характеристикам относятся прочность на сжатие, прочность на растяжение при раскалывании, коэффициент морозостойкости. Определение данных характеристик производится стандартными методами ГОСТ Р 70452-2022 в проектном возрасте 28 сут.

Минеральный состав исследован методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре ДРОН – 3.0. Фазовый состав проб расшифрован с помощью программы поиска фаз (Diffracplus, PDF-2, 2007 г).

Для более детальных исследований проведено изучение микроструктуры на электронном микроскопе GEOL GIB-Z4500.

**Результаты.** По результатам проведенных исследований определены физико-механические характеристики золошлаковой смеси. Золошлаковая смесь классифицирована как техногенный грунт в соответствии с номенклатурой ГОСТ 25100-2020:

- Класс – техногенный грунт.
- Тип – дисперсный несвязный.
- Вид - Отходы производств, бытовые отходы.
- Подвид - Отвалы и гидроотвалы шлаков, золошлаков и шламов.

Гранулометрический состав приведен в таблице №1.

Таблица №1

Гранулометрический состав золошлаковой смеси

	Размер сит, мм								
	200	10	5	2	1	0,5	0,25	0,1	< 0,1
Полные остатки, %	0	1,72	2,85	4,54	5,83	6,83	16,54	56,30	100,00

Кривые гранулометрического состава в основном имеют крутой наклон, с большим содержанием фракций 0,1–1 мм. Степень неоднородности гранулометрического состава  $C_u=9,4$ .

В соответствии с классификацией ГОСТ 25100-2020 золошлаковые смеси классифицируются как песок пылеватый, неоднородный по гранулометрическому составу. Кумулятивная кривая гранулометрического состава приведена на рис. 1.

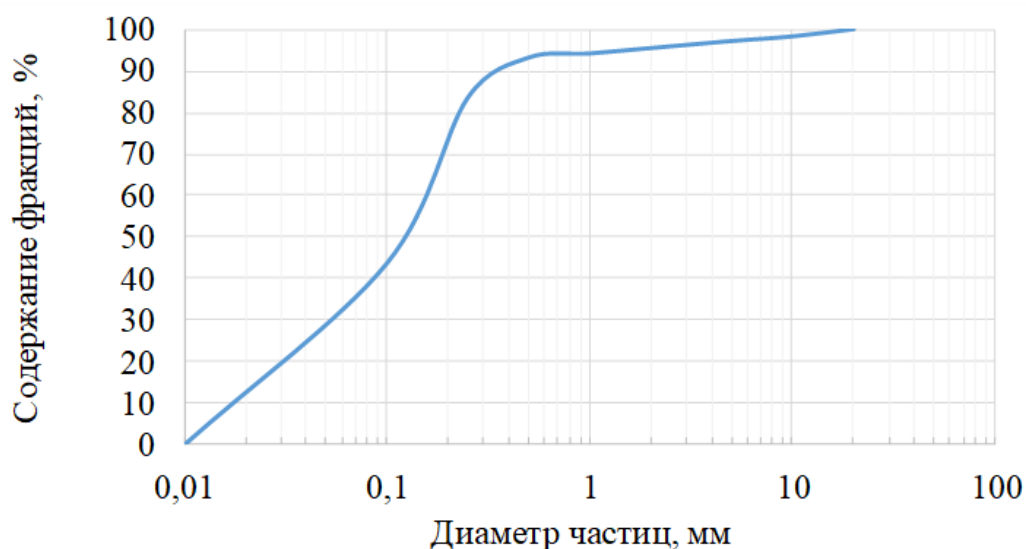


Рис. 1. – Кумулятивная кривая гранулометрического состава золошлаковой смеси

Физико-механические свойства золошлаковой смеси приведены в таблице №2.

Таблица №2

Физико-механические свойства золошлаковой смеси

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Результаты испытаний
1	Естественная влажность грунта	%	35,3
2	Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	4,54
3	Влажность на границе текучести	%	-
4	Влажность на границе раскатывания	%	не раскатывается в жгут диаметром 3 мм
5	Число пластичности	%	-
6	Показатель текучести	д.е.	-
7	Содержание частиц более 0,10 мм, по массе	%	56,30
8	Разновидность грунта	-	песок пылеватый
9	Потеря массы при прокаливании	%	5,76

Химический состав приведен в таблице №3.

По результатам рентгенофазового анализа определен минералогический состав золошлаковой смеси (таблица №4).

Таблица №3

Химический состав золошлаковой смеси  
(по данным ООО «Иркутскзолопродукт»)

№ п/п	Наименование	Содержание, %
1	Оксид алюминия $Al_2O_3$	14
2	Оксид железа $Fe_2O_3$	26
3	Оксид кремния $SiO_2$	48,1
4	Триоксид серы $SO_3$	0,94
5	Оксид титана $TiO_2$	0,35
6	Оксид магния $MgO$	1,5
7	Оксид кальция $CaO$	5,6
8	Оксид калия $K_2O$	1,6
9	Оксид натрия $Na_2O$	0,15

Таблица №4

Количественный фазовый анализ золошлаковой смеси

№ п/п	Фазовый состав	Количество, %
1	Кварц	50±5
2	Муллит	17±5
3	Полевой шпат	13±5
4	Маггемит	8±4
5	Кальцит	5
6	Гетит	5

Данные рентгенографии показывают, что интенсивности кристаллических фаз очень низкие. Основным минералом, присутствующим в золошлаковой смеси исследуемой пробы, является кварц. Другие фазы включают муллит и полевой шпат.

Рентгенограмма приведена на рис. 2.

Интенсивности кристаллических фаз очень низкие, поэтому чётко и однозначно определяется кварц, остальные минералы «возможны».

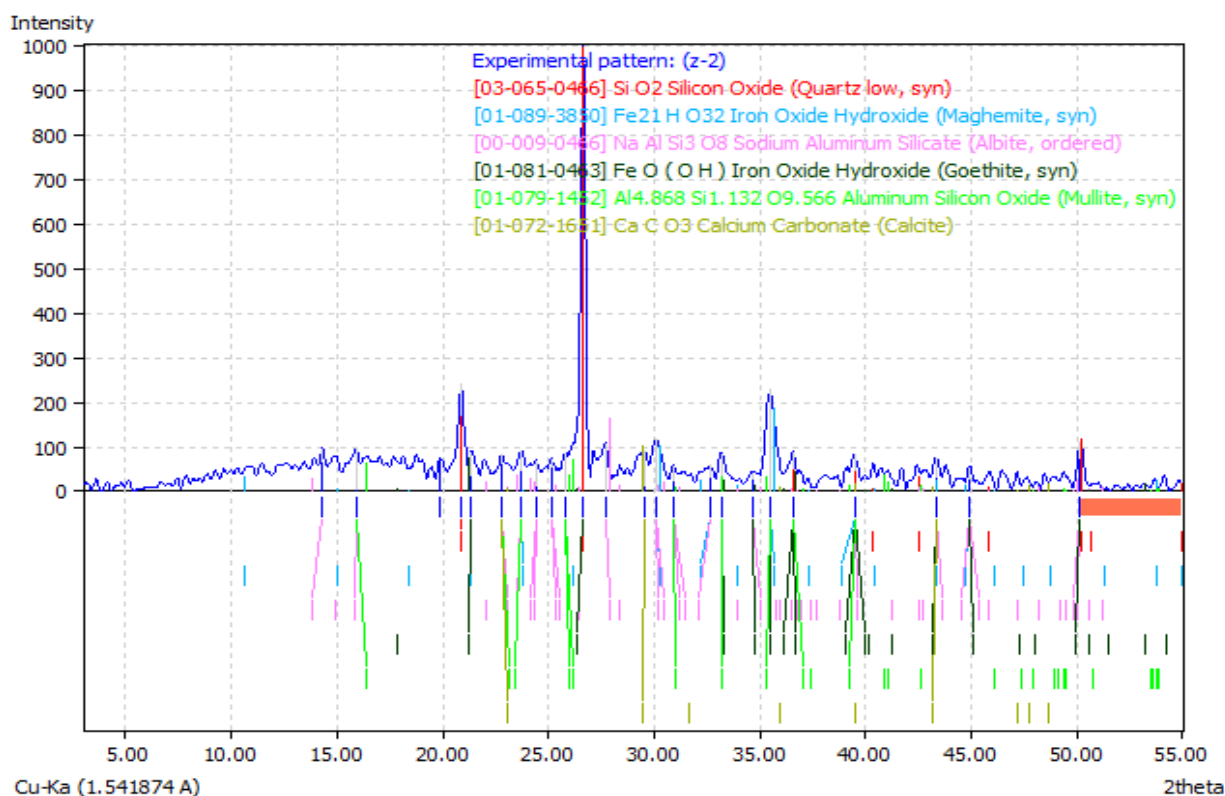


Рис. 2. – Рентгенограмма золошлаковой смеси

По результатам выполненных работ разработан состав золошлаковой смеси ТЭЦ, обработанной цементом. Количественное соотношение компонентов смеси приведено в таблице №5.

Таблица №5

Состав золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом

№ п/п	Материалы	Лабораторный состав, % (вода сверх 100% смеси)
1	Песок пылеватый (золошлаковая смесь)	100
2	Цемент	7
3	Вода	12,8

Выполнены лабораторные испытания образцов-цилиндров золошлаковой смеси ТЭЦ, обработанной цементом. Качественные характеристики приведены в таблице №6.

Таблица №6

Характеристики золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом

№ п/п	Наименование показателей	Требования ГОСТ Р 70452-2022	Фактические данные
1	Прочность на сжатие, МПа: - в возрасте 14 суток - в возрасте 28 суток - в возрасте 90 суток	не менее 0,5 не менее 1,0	0,9 1,1 1,5
2	Прочность на растяжение при раскалывании, МПа: в возрасте 28 суток в возрасте 90 суток	не менее 0,10	0,1 0,16
3	Коэффициент морозостойкости	не менее 0,8	1,0

Как видно из таблицы №9 прирост прочности на растяжение при раскалывании составил 60%, прирост прочности на сжатие 36%. Рентгенограммы в возрасте 14 и 90 сут. приведены на рис. 3, 4.

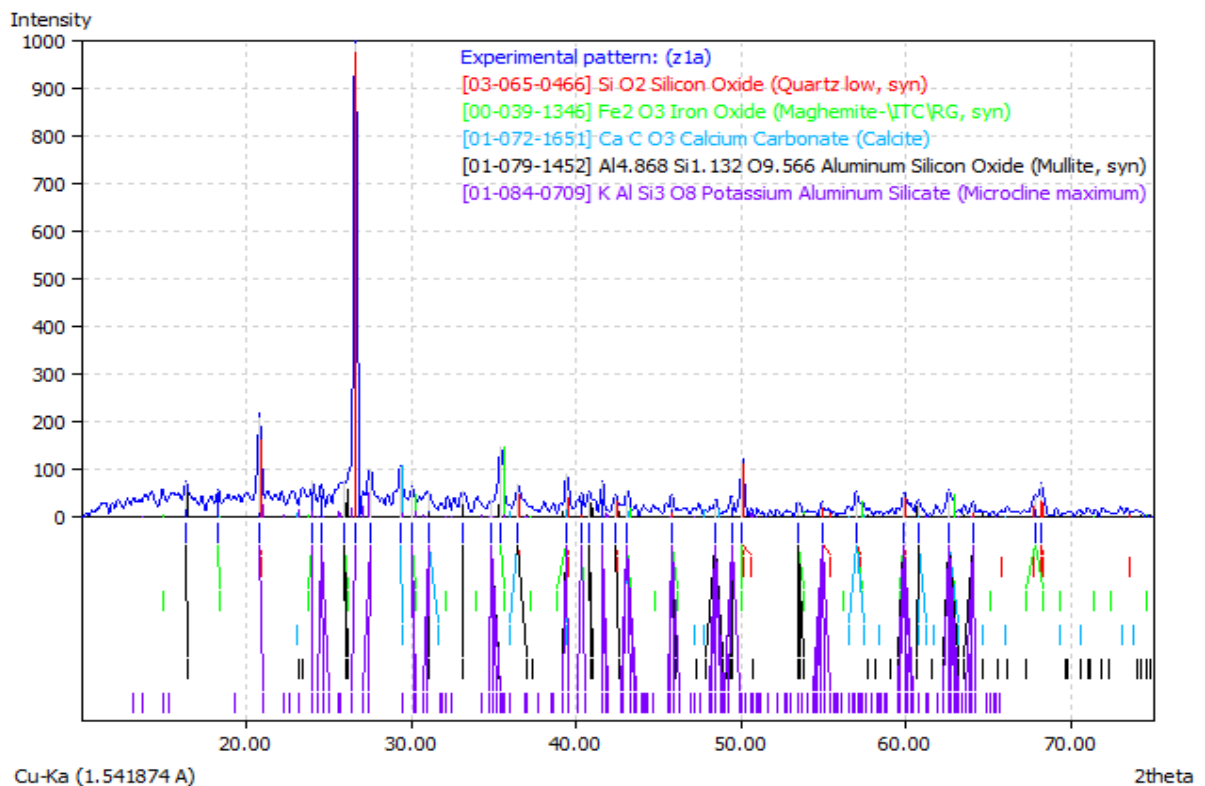


Рис. 3. – Рентгенограмма золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом в возрасте 14 сут.

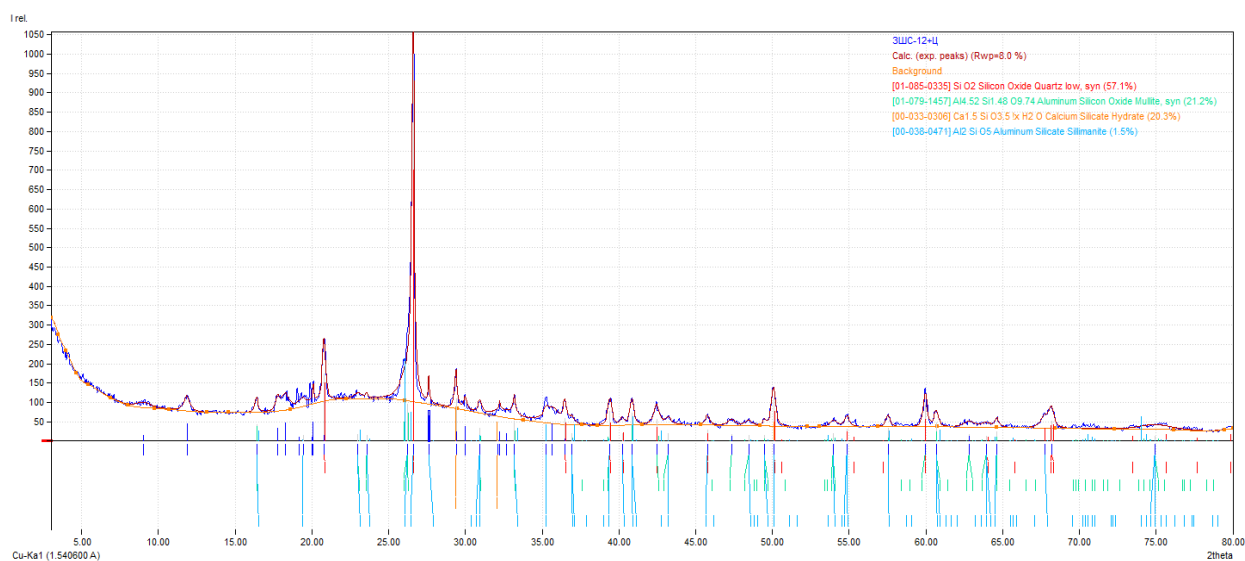


Рис. 4. – Рентгенограмма золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом в возрасте 90 сут.

Фазовый состав приведен в таблице №7.

Таблица №7

Количественный фазовый анализ золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом

№ п/п	Наименование	Количество, %	
		14 сут.	90 сут.
1	Кварц	48	57,1
2	Муллит	13	21,2
3	Полевой шпат	15	–
4	Кальцит CaCO <sub>3</sub>	6	–
5	Гидрат силиката кальция	–	20,3
6	Силикат алюминия	–	1,5
7	Маггемит	18	–
8	другое	–	6,2

## 2. Результаты изучения микроструктуры

Проба золошлаковой смеси представлена частицами неправильной формы и частицами сферической формы (рис. 5а). Частицы неправильной формы имеют пористую структуру (рис. 5б).



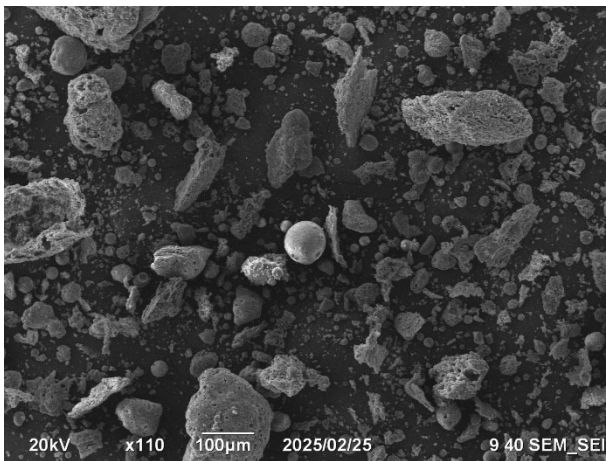


Рис. 5а. – Структура золошлаковой смеси

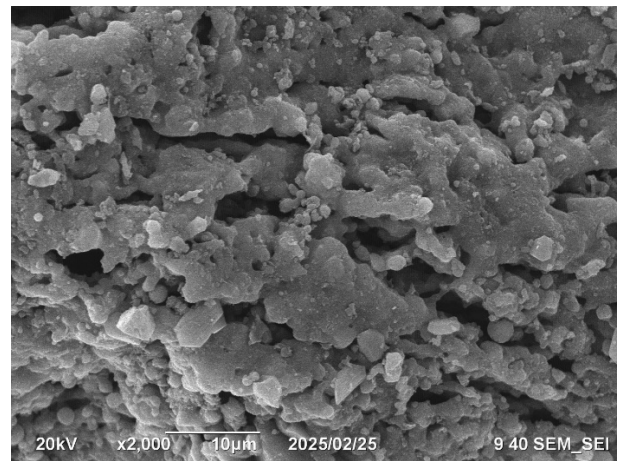


Рис. 5б. – Структура крупных агломератов неправильной формы

Частицы сферической формы составляют в среднем около 25% общего объема золошлаковой смеси и имеют пористые стенки переменной толщины и пористые внутри (рис. 6а, 6б).

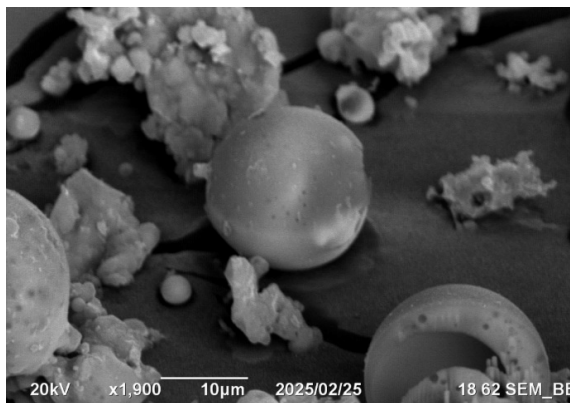


Рис. 6а – Частицы сферической формы

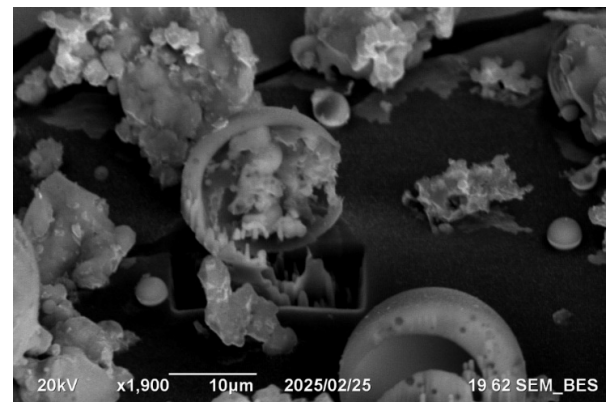


Рис. 6б. – Структура частицы сферической формы

Структура золошлаковой смеси, укрепленной портландцементом, приведена на рис. 7. Структура изучаемого образца является пористой, размер пор в пределах 1-4 мкм.

Микропоры, видимые на этом участке, заполнены игольчатыми кристаллами. Диаметр кристаллов в пределах 0,5 мкм нанометров.

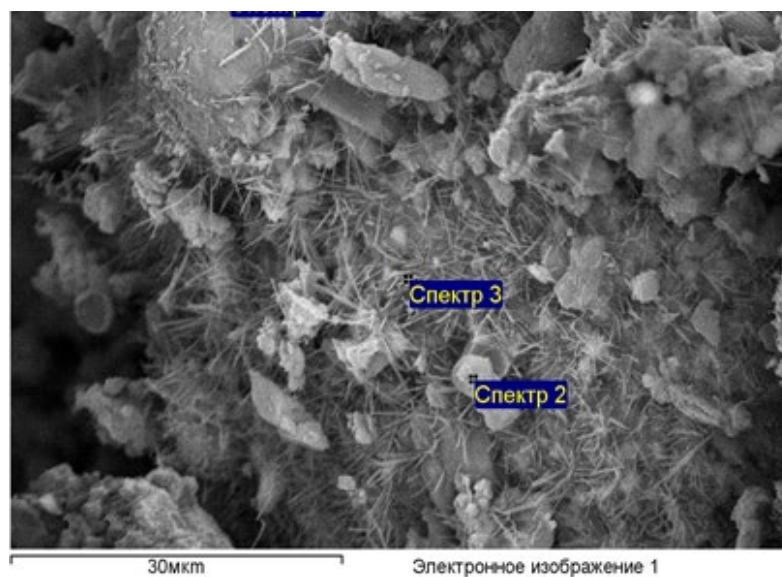


Рис. 7. – Микроструктура укрепленной золошлаковой смеси

**Заключение.** Для эффективного применения золошлаковых смесей ТЭЦ, укрепленных неорганическими вяжущими, в дорожном строительстве важно понимать особенности структурообразования этих материалов.

Проба золошлаковой смеси представлена частицами неправильной формы и частицами сферической формы. Частицы неправильной формы имеют пористую структуру. Частицы сферической формы составляют в среднем около 25% общего объема золошлаковой смеси и имеют пористые стенки переменной толщины и внутреннюю пористую структуру.

Экспериментальные исследования в возрасте 28 сут. и 90 сут. показали, что прирост прочности на растяжение при раскалывании составил 36%, прирост прочности на сжатие 60%.

Сформированная структура является пористой, поры заполнены связующим веществом в виде игольчатых кристаллов цемента. Несмотря на пористую структуру коэффициент морозостойкости составил 1,0, что превышает нормативные требования.

#### ***Сведения о финансировании***

*Исследования выполнены по заказу ООО «Иркутскзолопродукт».*

## Литература

1. Putilova I.V., Current state of the coal ash handling problem in Russia and abroad, aspects of the coal ash applications in hydrogen economy // International Journal of Hydrogen Energy, 2023. pp. 31040-31048.
2. Золотова И.Ю. Бенчмаркинг зарубежного опыта утилизации продуктов сжигания твердого топлива угольных ТЭС // Инновации и инвестиции. 2020. №7. URL: [cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes](http://cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes).
3. Ibragimov R.A., Shakirzyanov F.R., Kayumov R.A., Korolev E.V. Evaluation of the influence of an aggressive environment on the durability of the cement stone. Construction Materials and Products. 2024. 7 (2). P. 4.
4. Курочка П.Н., Гаврилов А.В. Соотношение размера частиц в полидисперсных структурах как первый шаг к оптимизации составов композиционных вяжущих // Инженерный вестник Дона. 2013. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596).
5. Хмелевцов А.А. Формирование структурных связей в аргиллитоподобных глинах сочинской свиты в г. Сочи // Инженерный вестник Дона. 2013. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037).
6. Dmitrieva T.V., Strokova V.V., Bezrodnykh A.A. Influence of the genetic features of soils on the properties of soil-concretes on their basis. Construction Materials and Products. 2018. 1 (1). pp. 69 – 77.
7. Sinitsin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E., Kayumova E.I., Nedoseko I.V. Study of the characteristics of pavement elements made of rein-forced soil with the use of secondary resources. Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). URL: [bstu-journals.ru/archives/11767](http://bstu-journals.ru/archives/11767).

8. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Utilization of waste materials in the stabilization of expansive pavement subgrade: An extensive review // Construction and Building Materials, 2023. P. 398.

9. Лофлер М., Слободчикова Н.А., Плюта К.В. Получение неорганического вяжущего на основе отходов промышленного производства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость, 2017. №2 (21). С. 62-67.

10. Лофлер М., Слободчикова Н.А. Методики подбора составов грунтов, укрепленных известью, для дорожного строительства // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость, 2018. №2 (25). С. 141-147.

11. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads. Construction Materials and Products. 2024. 7 (6). P. 3.

### References

1. Putilova I.V. International Journal of Hydrogen Energy, 2023. pp. 31040-31048.

2. Zolotova I.Yu. Innovacii i investicii. 2020. №7. URL: [cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes](http://cyberleninka.ru/article/n/benchmarking-zarubezhnogo-opyta-utilizatsii-produktov-szhiganiya-tverdogo-topliva-ugolnyh-tes).

3. Ibragimov R.A., Shakirzyanov F.R., Kayumov R.A., Korolev E.V. Construction Materials and Products. 2024. 7 (2). P. 4.

4. Kurochka P.N., Gavrilov A.V. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2013/1596).

5. Hmelevcov A.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2013. №4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2037).

6. Dmitrieva T.V., Strokova V.V., Bezrodnykh A.A. Construction Materials and Products. 2018. 1 (1). pp. 69 – 77.



7. Sinitsin D.A., Elrefaei A.E.M.M., Glazachev A.O., Kuznetsov D.V., Parfenova A.A., Volokitina I.E., Kayumova E.I., Nedoseko I.V. Construction Materials and Products. 2023. 6 (6). URL: [bstu-journals.ru/archives/11767](http://bstu-journals.ru/archives/11767).
8. Tanyıldızı M., Uz V.E., Gökalp İ. Construction and Building Materials, 2023. P. 398.
9. Lofler M., Slobodchikova N.A., Pljuta K.V. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. 2017. №2 (21). pp. 62-67.
10. Lofler M., Slobodchikova N.A. Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitelstvo. Nedvizhimost. 2018. №2 (25). pp. 141-147.
11. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhidov D.A., Khezhev T.A. Construction Materials and Products. 2024. 7 (6). P. 3.

**Дата поступления: 18.02.2025**

**Дата публикации: 25.04.2025**