



Research Article

Received: January 22, 2024

Accepted: February 7, 2024

Published: February 14, 2024

ISSN 2304-6295

## Selection of a composition of reinforced soils

Slobodchikova, Nadezhda Anatolievna<sup>1\*</sup> Bashkarev, Albert Yakovlevich<sup>2</sup> <sup>1</sup>Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia, [NSlobodchikova@rambler.ru](mailto:NSlobodchikova@rambler.ru) (S.N.A.)<sup>2</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation; [bashkarev@spbstu.ru](mailto:bashkarev@spbstu.ru) (B.A.Y.)Correspondence:\* email [NSlobodchikova@rambler.ru](mailto:NSlobodchikova@rambler.ru); contact phone [+79025771417](tel:+79025771417)

### Keywords:

Reinforced soil; Composition selection; Microwave radiation; Road construction; Ash and slag materials

### Abstract:

**The object of research** is reinforced soils, which are effective materials for the construction of highways. For effective practical application of reinforced soils, it is necessary to correctly select the optimal composition of reinforced soils in laboratory conditions. The qualitative characteristics are determined on reinforced soil samples after their hardening under normal conditions at the design age of 28, 56, 90, or more days. The long work duration on the composition selection makes it difficult to use these materials, especially in conditions of continental and polar climate, when the duration of the construction season is short. **Method.** It is proposed that microwave radiation be used to reduce the time needed to select the composition. The treatment of reinforced soil samples with microwave radiation 2,45 GHz provides strength within one hour. Powerful microwave radiation contributes to the rapid heating and destruction of the reinforced soil sample. Temperature changes and sample size must be considered when processing samples with microwave radiation humidity. Various soils selected on the territory of the Irkutsk region were used for experimental studies. **Results.** Comparative compressive strength tests of reinforced soil samples obtained by hardening under normal conditions and microwave radiation treatment showed similar compressive strength values.

## 1 Introduction

Использование в конструкциях автомобильных дорог грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, взамен высокопрочных каменных материалов позволяет значительно снизить стоимость строительства, реконструкции и капитального ремонта автомобильных дорог [1]. Исследованиям по применению этих материалов посвящены работы различных авторов.

Введение в грунт извести и цемента улучшает физико-механические характеристики грунтов и уменьшает набухание глинистых грунтов [2], улучшает эксплуатационные характеристики слоев земляного полотна [3], повышает прочность слоев [4], улучшает инженерные свойства грунтов [5]. Применение техногенных отходов (зол-уноса, зол рисовой шелухи, сланцевой золы и др.) в составах укрепленных грунтов также улучшает их свойства и способствует сохранению природных ресурсов [6]. В частности можно использовать золы-уноса [7], сланцевые золы [8], золовый осадок биомассы (ВВА) и зола-унос биомассы (ВФА) [9], геополимеры на основе зол-уноса [10], золы рисовой шелухи, золы багассы сахарного тростника и золы коровьего навоза [11], золы бумажного шлама [12], биополимеры целлюлозы [13], золы-уноса в сочетании с полипропиленовыми волокнами [14], доменного шлама и отходов производства извести [15].

Для эффективного практического применения укрепленных грунтов необходимо правильно подбирать их оптимальный состав и проектировать конструкцию дорожной одежды [16], [17]. Суть

Slobodchikova, N.; Bashkarev, A

Selection of a composition of reinforced soils;

2024; Construction of Unique Buildings and Structures; **110** Article No 11006. doi: 10.4123/CUBS.110.6



всех методов подбора состава укрепленных грунтов сводится к определению такого содержания компонентов (грунта, воды, неорганического вяжущего материала, добавок) при котором достигаются необходимые качественные характеристики: плотность, прочность на сжатие, морозостойкость, водостойкость и др. [18]-[20].

Определение качественных характеристик проводится на образцах укрепленного грунта в проектном и промежуточном возрасте после их твердения в нормальных условиях. Проектный возраст зависит от вида вяжущего материала и составляет:

- Для цементов, молотых высокоактивных и активных шлаков черной, цветной металлургии и фосфорных шлаков; строительной извести; активных материалов с удельной поверхностью не менее 150 м<sup>2</sup>/кг проектный возраст составляет 28 сут.
- Для комплексных минеральных вяжущих проектный возраст составляет 56 сут., 90 сут., 180 сут.

Определение качественных характеристик образцов в указанные сроки приводит к очень большой продолжительности процедуры подбора состава во времени и как следствие к сложности применения этих материалов в условиях континентального и полярного климата, когда продолжительность строительного сезона может составлять несколько месяцев.

Сокращение сроков подбора состава можно обеспечить способами: использованием методов прогнозирования конечных качественных характеристик [21], обработкой образцов укрепленного грунта паром или микроволновым излучением. Обработка паром и микроволновым излучением широко используется в производстве бетонных и железобетонных изделий и конструкций:

- Для определения водоцементного соотношения с помощью бытовой микроволновой печи [22].
- Для повышения прочности и ускорения твердения [23];
- Для ремонта бетонных конструкций [24];
- Для повышения прочности цементного теста в сочетании с низким давлением [25];
- Для исследования механизма появления трещин [26].

#### **Твердение при обработке паром**

Обработка паром материалов на основе цемента используется несколько десятилетий. При этом прочностные характеристики материалов через 28 суток после обработки паром ниже, чем при твердении в нормальных условиях. Снижение механической прочности объясняется тем, что быстрая ранняя гидратация цемента приводит к образованию тонкого C–S–H-геля, окружающего негидраты, что затрудняет диффузию и дальнейшее развитие механической прочности [27].

Кроме того, в процессе нагрева будет образовываться температурный градиент, приводящий к образованию неравномерного продукта и задержке процесса гидратации в более позднем возрасте [28].

#### **Обработка микроволновым излучением**

В отличие от обработки паром, микроволновое излучение может обеспечить быстрый и равномерный нагрев, а также селективный нагрев. Как и при обработке паром, при твердении в микроволновой печи образуются мелкие продукты, обволакивающие частицы цемента и препятствующие дальнейшей гидратации в более позднем возрасте [28]. При этом ускоряются процессы гидратации и карбонизации, и увеличивается общее количество средних капиллярных пор затвердевшей массы по сравнению с твердением в нормальных условиях и твердением при обработке паром [27]-[29].

Необходимо учитывать, что при микроволновом нагреве возможно разрушение образца, что объясняется теорией давления пара и теорией распределения тепловых напряжений.

Теория давления пара предполагает, что вода в закрытых порах материалов на основе цемента нагревается микроволновой печью и испаряется, что приводит к повышению давления пара, что в итоге вызывает растрескивание или разрыв [26]. Соответственно количество воды будет напрямую влиять на риск разрушения образца.

Теория термических напряжений предполагает, что характеристики избирательного нагрева микроволновой печью и тепловая инерция материалов на основе цемента вызывают неравномерную теплопроводность в материалах, создавая большой температурный градиент и тепловое напряжение, что в конечном итоге приводит к появлению трещин и разрушению [26].

Поэтому важно учитывать мощность обработки в зависимости от количества воды.



Учитывая изложенное выше в работе поставлена цель – исследование возможности эффективного применения микроволнового излучения для ускоренного набора прочности образцов укрепленного грунта в лабораторных условиях.

## 2 Materials and Methods

### 1. Материалы

В исследовании использованы следующие материалы и грунты.

- Портландцемент М400;
- Супесь;
- Суглинок;
- Песок средней крупности;
- Золошлаковые смесь.

Лабораторные пробы грунтов отобраны на территории Иркутской области. Лабораторная проба золошлаковой смеси получена с золоотвала Усть-Илимской ТЭЦ (рисунок 1).

Результаты определения физико-механических характеристик грунтов и золошлаковой смеси приведены в таблицах 1–5.



**Рис. 1 - Отбор проб грунтов и золошлаковой смеси**  
**Fig. 1 - Sampling of soils and ash-slag mixture**

Классификация грунтов и золошлакового отхода проведена в соответствии с российским государственным стандартом ГОСТ 25100 [33].

**Таблица. 1 Результаты испытаний физико-механических свойств золошлаковых смесей**  
**Table 1 Results of tests of physical and mechanical properties of ash and slag mixtures**

Наименование показателя	Един. изм.	Разновидность грунта			
		суглинок легкий песчанистый и твердый	супесь песчанистая твердая	песок средней крупности	Золошлаковая смесь (песок гравелистый)
Естественная влажность грунта	%	1.71	1.31	1.93	6.95
Содержание частиц более 2 мм, по массе	%	21.29	3.25	8.49	30.28
Влажность на границе текучести	%	25.78	19.75	-	
Влажность на границе раскатывания	%	16.43	14.32	не раскатывается в жгут диаметром 3 мм	не раскатывается в жгут диаметром 3 мм
Число пластичности	%	9.35	5.43	-	-
Показатель текучести	д.е.	-1.4	-2.40	-	-
Содержание песчаных частиц (2-0.05 мм), по массе	%	66.52	82.20	64.29	69.72
Максимальная плотность	г/см <sup>3</sup>	1.99	1.83	1.83	1.88
Оптимальная влажность	%	11.13	13.35	11.41	11.97
Оптимальная влажность (с учётом крупных частиц)	%	9.83	-	-	10.25
Величина относительной деформации морозного пучения)	д.е.	0.0303	-	-	0.0015
Набухание	д.е.	-	-	-	
pH	-	6.90	8.53	-	9.71
Потеря массы при прокаливании	%	-	-	-	1.13

Гранулометрический состав приведен в Таблицах 2–4.

**Таблица. 2. Зерновой (гранулометрический) состав золошлаковой смеси**  
**Table 2. Grain (granulometric) composition of the ash and slag mixture**

Размер сит, мм	40	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	< 0.1
Частные остатки, г	0.00	0.00	110.40	168.95	326.32	550.58	204.62	103.86	194.49	341.31
Частные остатки, %	0.00	0.00	5.52	8.45	16.31	27.52	10.23	5.19	9.72	17.06
Полные остатки, %	0.00	0.00	5.52	13.96	30.28	57.80	68.03	73.22	82.94	100.00
Полные проходы, %	100.00	100.00	94.48	86.04	69.72	42.20	31.97	26.78	17.06	0.00

**Таблица 3. Зерновой (гранулометрический) состав суглинка**  
**Table 3. Grain (granulometric) composition of loam**

Размер сит, мм	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	< 0.1
Частные остатки, г	0.00	500.46	850.20	945.11	959.79	1347.52	1461.89	1558.37	3157.54
Частные остатки, %	0.00	4.64	7.89	8.77	8.90	12.50	13.56	14.45	29.29
Полные остатки, %	0.00	4.64	12.53	21.29	30.20	42.70	56.26	70.71	100.00
Полные проходы, %	100.00	95.36	87.47	78.71	69.80	57.30	43.74	29.29	0.00

**Таблица 4. Зерновой (гранулометрический) состав песка**  
**Table 4. Grain (granulometric) composition of sand**

Размер сит, мм	40	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	< 0.1
Частные остатки, г	0.00	0.00	0.00	0.00	217.70	112.07	228.50	1090.23	675.82	239.92
Частные остатки, %	0.00	0.00	0.00	0.00	8.49	4.37	8.91	42.52	26.36	9.36
Полные остатки, %	0.00	0.00	0.00	0.00	8.49	12.86	21.77	64.29	90.64	100.00
Полные проходы, %	100.00	100.00	100.00	100.00	91.51	87.14	78.23	35.71	9.36	0.00

**Таблица 5. Зерновой (гранулометрический) состав супеси**  
**Table 5. Grain (granulometric) composition of sandy loam**

Размер сит, мм	40	20	10	5	2	1	0.5	0.25	0.1	< 0.1
Частные остатки, г	0.00	0.00	0.00	0.00	16.24	13.11	28.21	192.69	163.69	86.10
Частные остатки, %	0.00	0.00	0.00	0.00	3.25	2.62	5.64	38.53	32.74	17.22
Полные остатки, %	0.00	0.00	0.00	0.00	3.25	5.87	11.51	50.05	82.78	100.00
Полные проходы, %	100.00	100.00	100.00	100.00	96.75	94.13	88.49	49.95	17.22	0.00

Графики зависимости плотности грунта от влажности приведены на рисунках 2–5.

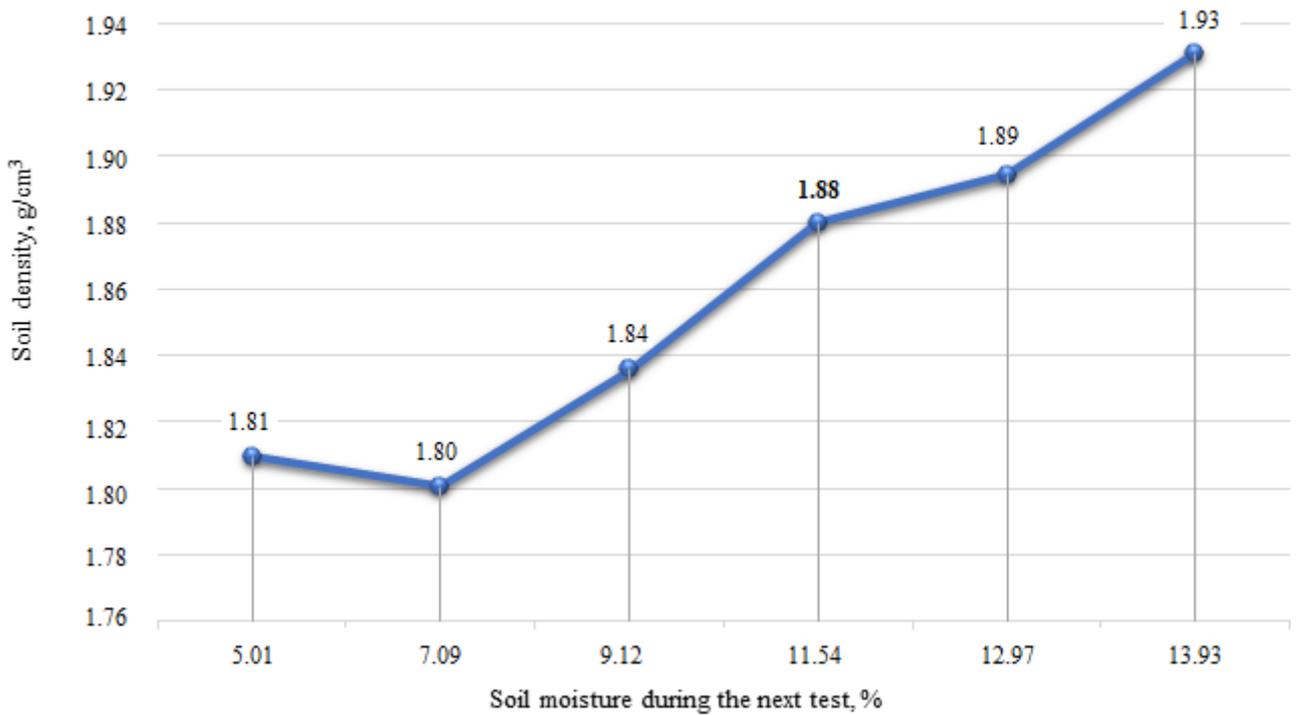


Рис. 2 - График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности золошлаковой смеси

Fig. 2 - Graph of the dependence of the dry soil density values on the moisture content of the ash and slag mixture

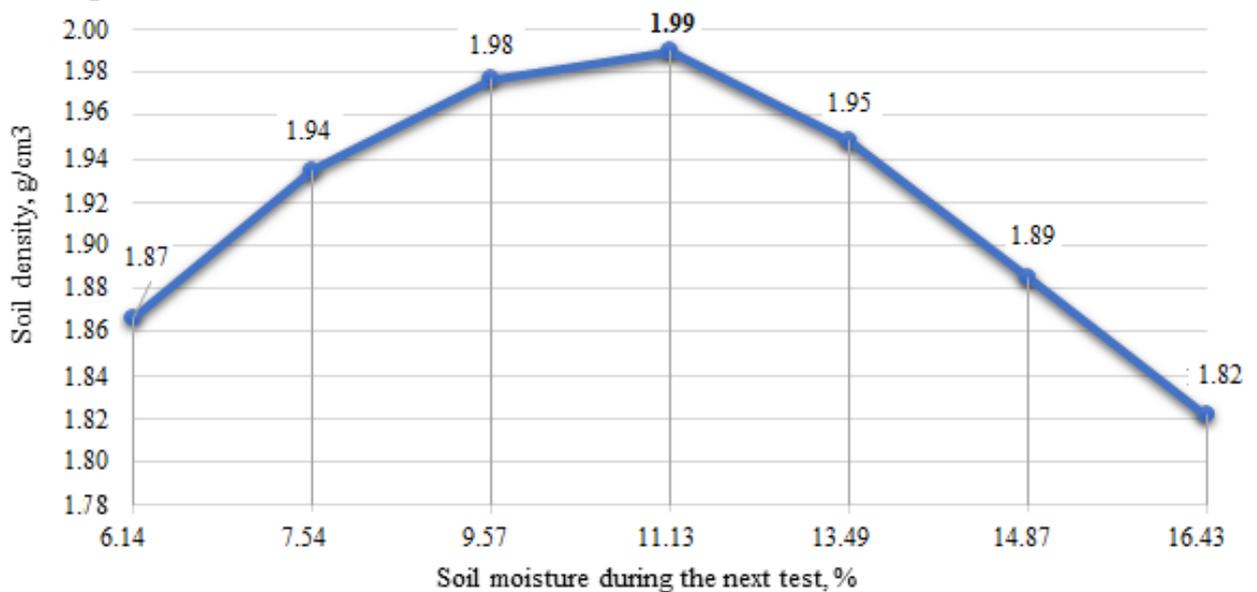


Рис. 3 - График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности суглинка

Fig. 3 - Graph of dependence of dry soil density values on loam moisture

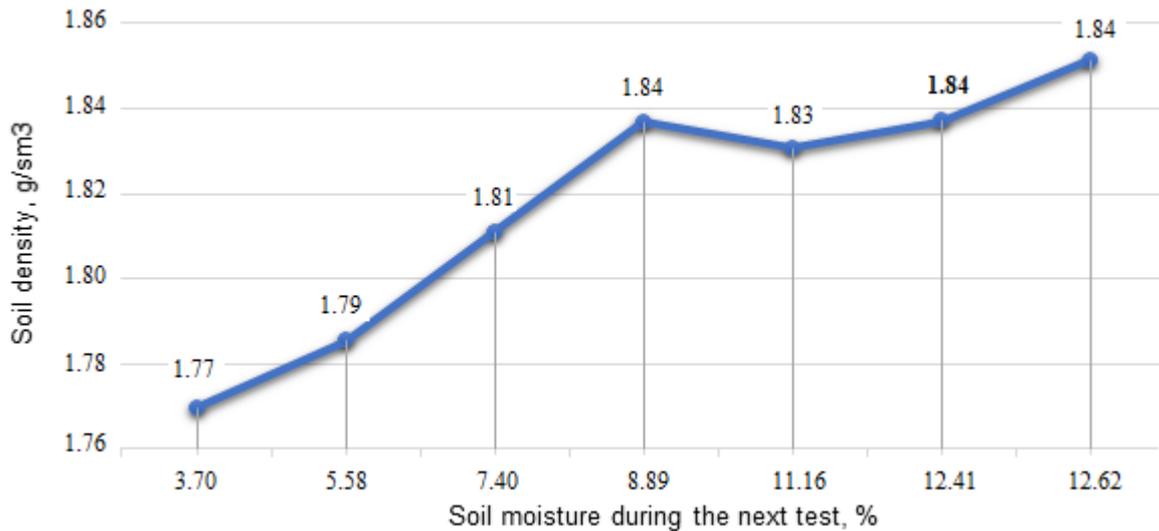


Рис. 4 - График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности пробы песка  
 Fig. 4 - Graph of the dependence of the dry soil density values on the moisture content of the sand sample

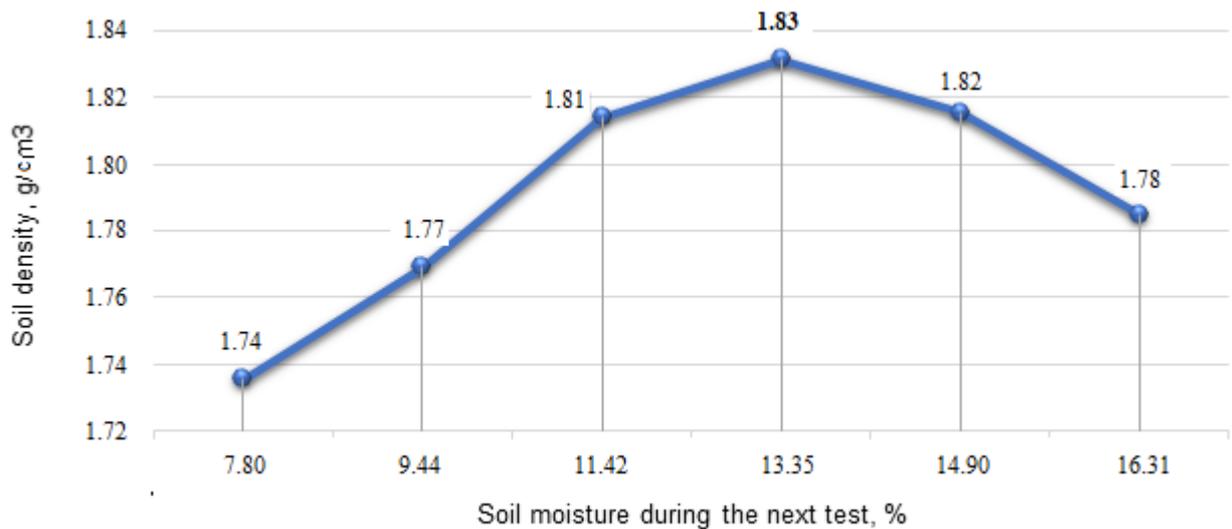


Рис. 5 - График зависимости значений плотности сухого грунта от влажности супеси  
 Fig. 5 - Graph of the dependence of the values of the density of dry soil on the moisture content of sandy loam

## 2. Подготовка образцов, режимы твердения и определение качественных характеристик

Для приготовления смеси укрепленного грунта в сухой грунт добавлялось неорганическое вяжущее, после тщательного перемешивания добавлялась вода для обеспечения влажности смеси, соответствующей значению оптимальной влажности, и опять проводилось перемешивание.

Изготовление образцов проводилось в цилиндрических формах путем прессования до достижения значений максимальной плотности. Размеры образцов составили: диаметр  $d=70.4$  мм, высота  $h=70.4$  мм.

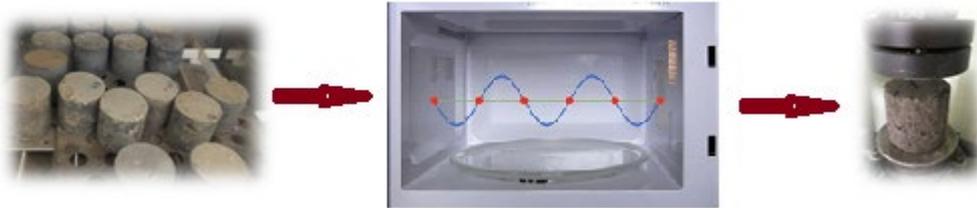
Твердение изготовленных образцов в нормальных условиях осуществлялось при температуре  $20 \pm 2$  °С и относительной влажности воздуха  $95 \pm 5$  %.

Для обработки образцов микроволновым излучением использована обычная микроволновая печь. Частота электромагнитного излучения в печи составляет 2.45 ГГц, что является оптимальной частотой для потерь в молекуле воды [27].

Свойства укрепленного грунта будут изменяться в зависимости от температуры: по мере нагревания смеси увеличивается ее диэлектрическая проницаемость, а также увеличиваются диэлектрические потери. Следует отметить, что даже после почти полного высыхания образца температура образца может быть очень высокой, что приводит к снижению массы материала из-

за потери карбонатов или сульфатов и как следствие к снижению точности измерения [27]. Поэтому в ходе проведения исследования обработка образцов укрепленного грунта проводилась многократными циклами продолжительностью 2–10 мин., включающих воздействие электромагнитного поля и остывание образцов. Обработка микроволновым излучением проводилась сразу после изготовления образцов.

Для анализа результатов набора прочности в нормальных условиях и в условиях обработки микроволновым излучением использована качественная характеристика укрепленного грунта - прочность на сжатие образцов в сухом и водонасыщенном состоянии.



**Рис. 6 - Испытание образцов укрепленного грунта**  
**Fig. 6 - Testing of reinforced soil samples**

Определение прочности на сжатие проведено на гидравлическом прессе. Образцы нагружались до разрушения при постоянной скорости нарастания нагрузки 0.6 МПа/с.

### 3 Results and Discussion

В Таблице 6 приведены результаты определения прочности на сжатие грунтов, укрепленных различными неорганическими вяжущими материалами, после обработки микроволновым излучением и после твердения в нормальных условиях.

**Таблица 6. Результаты определения прочности на сжатие грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими, после обработки микроволновым излучением**  
**Table 6. Results of determining the compressive strength of soils reinforced with inorganic binders after treatment with microwave radiation**

Наименование грунта	Вяжущее	Содержание вяжущего, %	Предел прочности на сжатие после обработки образцов микроволновым излучением, МПа	Предел прочности на сжатие, МПа		
				В возрасте 28 сут.		В возрасте 90 сут.
				В сухом состоянии	В водонасыщенном состоянии	В водонасыщенном состоянии
Супесь	Известково-зольное	10	0.47	1.97	1.28	-
Суглинок	Известково-зольное	20	2.21	2.95	-	3.5
Суглинок	Известь	6	4.06	3.90	2.71	3.89
Супесь	Цемент	6	3.26	4.76	3.85	-
Песок средней крупности	Цементозольное	8	0.70	2.12	-	-
Суглинок	Цемент	4	4.69	9.05	4.58	-

Прочность на сжатие образцов укрепленного грунта после обработки их микроволновым излучением близка к прочности на сжатие в сухом состоянии в проектном возрасте.

Путем оптимизации параметров микроволнового излучения и времени обработки в зависимости от влажности, содержания крупных частиц и размера образца, можно обеспечить



лучшую сходимость результатов твердения при обработке микроволновым излучением и при твердении в нормальных условиях.

Обработка образцов укрепленного грунта микроволновым излучением обеспечивает набор прочности в течение одного часа. Использование микроволнового излучения для подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет значительно сократить сроки и трудоемкость работ в дорожно-строительных лабораториях.

Мощное микроволновое излучение способствует быстрому нагреву, разрушению образца укрепленного грунта и снижению точности полученных результатов. Поэтому при использовании микроволнового излучения необходимо учитывать такие факторы как влажность и изменение температуры образцов укрепленного грунта.

Прочность на сжатие образцов укрепленного грунта, полученных путем твердения в нормальных условиях, близка к значениям прочности на сжатие образцов укрепленного грунта, полученных путем обработки микроволновым излучением.

## 4 Conclusions

В работе были получены следующие результаты:

1. Обработка образцов укрепленного грунта микроволновым излучением в лабораторных условиях обеспечивает набор прочности образцов в течение одного часа.
2. Прочность на сжатие образцов укрепленного грунта, полученных путем твердения в нормальных условиях, близка к значениям прочности на сжатие образцов укрепленного грунта, полученных путем обработки микроволновым излучением.
3. Использование микроволнового излучения для подбора состава грунтов, укрепленных неорганическими вяжущими материалами, позволяет значительно сократить сроки и трудоемкость работ в дорожно-строительных лабораториях.

## 5 Conflict of Interests

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

## References

1. Rios, S., Ramos, C., Fonseca, A.V., Cruz, N., Rodrigues, C. (2016) Colombian Soil Stabilized with Geopolymers for Low Cost Roads. *Procedia Engineering*, 143, 1392-1400. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.164>.
2. Bakaiyang, L., Madjadoumbaye, J., Boussafir, Y., Szymkiewicz, F., Duc, M. (2021) Re-use in road construction of a Karal-type clay-rich soil from North Cameroon after a lime/cement mixed treatment using two different limes. *Case Studies in Construction Materials*, 15. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00626>.
3. Rasul, J.M., Burrow, M.P.N., Ghataora, G.S. (2016) Consideration of the deterioration of stabilised subgrade soils in analytical road pavement design. *Transportation Geotechnics*, 9, 96-109. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2016.08.002>.
4. Alhaji, M.M., Muazu, M.A, Alhassan, M., Umar, K.G, Ayinla, A.A. (2023) Optimal density for effective chemical stabilization of deficient soils for road structures. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.230>.
5. Kumar, S., Singh, S.K. (2023) Subgrade soil stabilization using geosynthetics: A critical review, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.266>.
6. Naik, R., Kumar, S., Saha, G. (2024) Novel framework for assessing economic viability and environmental impacts: Use of waste products in soil stabilization. *Construction and Building Materials*, 411, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134329>.
7. Renjith, R., Robert, D., Setunge, S., Costa, S., Mohajerani, A. (2021) Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction. *Journal of Cleaner Production*, 294. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126264>.
8. Rabab'ah, S.R., Sharo, A.A., Alqudah, M.M., Ashteyat, A.M., Saleh, H.O. (2023) Effect of using Oil Shale Ash on geotechnical properties of cement-stabilized expansive soil for pavement applications. *Case Studies in Construction Materials*, 19, <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02508>.



9. Díaz-López, J.L., Cabrera, M., Agrela, F., Rosales, J. (2023) Geotechnical and engineering properties of expansive clayey soil stabilized with biomass ash and nanomaterials for its application in structural road layers. *Geomechanics for Energy and the Environment*, 36, <https://doi.org/10.1016/j.gete.2023.100496>.
10. Turkane, S.D., Chouksey, S.K. (2022) Design of low volume road pavement of stabilized low plastic soil using fly ash geopolymer. *Materials Today: Proceedings*, 65, Part 2, 1154-1160. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.04.167>.
11. Yadav, A.K., Gaurav, K., Kishor, R., Suman, S.K. (2017) Stabilization of alluvial soil for subgrade using rice husk ash, sugarcane bagasse ash and cow dung ash for rural roads. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 10, 254-261. <https://doi.org/10.1016/j.ijprt.2017.02.001>.
12. Rahmat, M.N., Kinuthia, J.M. (2011) Effects of mellowing sulfate-bearing clay soil stabilized with wastepaper sludge ash for road construction. *Engineering Geology*, 117, 170-179. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2010.10.015>.
13. Dhawale, A.W., Banne, S.P. (2023) Laterite soil stabilization using cellulose biopolymer. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.07.062>.
14. Sengul, T., Akray, N., Vitosoglu, Y. (2023) Investigating the effects of stabilization carried out using fly ash and polypropylene fiber on the properties of highway clay soils. *Construction and Building Materials*, 400, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132590>.
15. Alzhanova, G.Z.; Aibuldinov, Y.K.; Iskakova, Z.B.; Khabidolda, S.M.; Abdiyussupov, G.G.; Omirzak, M.T.; Murali, G.; Vatin, N.I. (2022) Development of Environmentally Clean Construction Materials Using Industrial Waste. *Materials*, 15, 5726. <https://doi.org/10.3390/ma15165726>
16. Bashkarev, A., Novik, A., Ismailov, A. (2023) A model for assessing the quality of the granulometric composition of an asphalt concrete mixture. *Technical and technological problems of the service*, 2, 34-42. <https://sciup.org/148326486>
17. Novik, A., Ismailov, A., Sentsov, I. (2022) Study of physical and mechanical properties of asphalt concrete with the addition of artificial asphaltite. *IOP Conference Series: Proceedings of STCCE. International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022: Lecture Notes in Civil Engineering. Switzerland*, 15-30. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_2)
18. Celauro, B., Bevilacqua, A., Bosco, D.L., Celauro, C. (2012) Design Procedures for Soil-Lime Stabilization for Road and Railway Embankments. Part 1-Review of Design Methods. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 53, 754-763. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.09.925>.
19. Vamsi Krishna S.H., Sai Santosh B., Sai Prasanth B.H.S. (2023) Prediction of UCS and CBR of a stabilized Black-cotton soil using artificial intelligence approach: ANN. *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.097>.
20. Kozubal, J.V., Kania, T., Tarawneh, A.S., Hassanat, A., Lawal, R. (2023) Ultrasonic assessment of cement-stabilized soils: Deep learning experimental results. *Measurement*, 223, <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113793>.
21. Hasanzadeh, A.; Vatin, N.I.; Hematibahar, M.; Kharun, M.; Shooshpasha, I. (2022) Prediction of the Mechanical Properties of Basalt Fiber Reinforced High-Performance Concrete Using Machine Learning Techniques. *Materials*, 15. <https://doi.org/10.3390/ma15207165>
22. Besche, E., Sambol, M., Rice, E.K., Mackenzie, J.D. (2004) Determination of water-to-cement ratio in freshly mixed rapid-setting calcium sulfoaluminate concrete using 2.45 GHz microwave radiation. *Cement and Concrete Research*, 34, 807-812. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2003.09.023>.
23. Leung, C.K.Y., Pheeraphan, T. (1997) Freeze-thaw durability of microwave cured air-entrained concrete. *Cement and Concrete Research*, 27, 427-435. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(97\)00014-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(97)00014-8).
24. Mangat, P.S., Grigoriadis, K., Abubakri, S. (2016) Microwave curing parameters of in-situ concrete repairs. *Construction and Building Materials*, 112, 856-866. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.03.007>.
25. Makul, N. (2016) Innovative hybrid curing method for accelerating the strength of high-performance cement paste using microwave heating coupling with low-pressure processing. *Construction and Building Materials*, 105, 245-252. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.12.084>.



26. Zheng, Y., Su, Z., Fu, H., Zhang, Q., Li, J. (2024) Thermal behaviors of cement and mortar under microwave treatment and the influencing factors: An experimental study. *Construction and Building Materials*, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134191>.
27. Gao, Z., He, Y., Li, M., Jiang, M., Shen, J. (2022) Impacts of microwave on hydration evolution of Portland cement in the perspective of composition and microstructure of hydrates. *Construction and Building Materials*. 360. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129569>.
28. Kong, Y., Liu, S., Wang, P. (2021) Effects of microwave curing on the compressive strength development and hydration of cement-granulated blast furnace slag composite system. *Construction and Building Materials*. 270. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121432>.
29. Leung, C.K.Y., Pheeraphan, T. (1995) Very high early strength of microwave cured concrete. *Cement and Concrete Research*. 25, 136-146. [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(94\)00121-E](https://doi.org/10.1016/0008-8846(94)00121-E).
30. Makul, N., Rattanadecho, P., Agrawal, D.K. (2010) Microwave curing at an operating frequency of 2.45GHz of Portland cement paste at early-stage using a multi-mode cavity: Experimental and numerical analysis on heat transfer characteristics. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 37, 1487-1495. <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2010.09.001>.
31. Novik, A., Ismailov, A., Rusakov, M. (2022) The influence of the granulometric composition of asphalt concrete mixtures on the quality of the road surface. *Travel Navigator*, 51 (77). 36-41. <https://www.elibrary.ru/contents.asp?id=48698580>.
32. Ogurtsov, G., Averchenko, G., Alekseev, S. (2022) Concrete Beams with External Reinforcement of Composite Materials. *Proceedings of STCCE: International Scientific Conference on Socio-Technical Construction and Civil Engineering 2022: Lecture Notes in Civil Engineering, Kazan*, 291. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7\\_31](https://doi.org/10.1007/978-3-031-14623-7_31).
33. GOST 25100-2020 Soils. Classification <https://docs.cntd.ru/document/1200174302>