

УДК 625.072

Исследование физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения

А. Ф. Колос, Д. В. Серебряков, К. Е. Демин, Д. С. Чеботаев, С. В. Исаков, Н. А. Эван

Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, Российская Федерация, 190031, Санкт-Петербург, Московский пр., 9

Для цитирования: Колос А. Ф., Серебряков Д. В., Демин К. Е., Чеботаев Д. С., Исаков С. В., Эван Н. А. Исследование физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения // Бюллетень результатов научных исследований. — 2023. — Вып. 4. — С. 15-26. DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-15-26

Аннотация

Цель: Обосновать актуальность проведения исследований свойств балластных материалов. Описать методику проведения лабораторных испытаний и представить результаты исследования физико-механических свойств материалов балластной призмы для скоростного и высокоскоростного движения поездов. Предложить конструкцию балластной призмы с применением бывших в употреблении автомобильных шин. **Методы:** Проведение лабораторных испытаний проб щебня из базальта, гранита и габбро-диабазы на истираемость в полочном барабане и на сопротивление удару в копре ПМ. **Результаты:** Определена потеря массы после испытаний на истираемость в полочном барабане и после испытаний на ударную прочность на копре. Наименьшая потеря массы зафиксирована у пробы из базальта, промежуточная потеря массы — у пробы из габбро-диабазы, наибольшая — у гранитного щебня. **Практическая значимость:** Базальтовые горные породы имеют наименьшую потерю массы как во время испытаний на истирание в полочном барабане, так и на ударную прочность, по сравнению с габбро-диабазом и гранитом. Авторами предложен вариант конструкции балластной призмы и экспериментально обоснован выбор балластного материала для этой конструкции. Полученные результаты могут быть использованы для обоснования выбора балластного материала при проектировании и строительстве и при моделировании работы балласта в пути.

Ключевые слова: Балласт, железнодорожный путь, истираемость, сопротивление удару, полочный барабан, копер, физико-механические свойства.

Стратегией развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года установлены перспективные направления развития железных дорог, в числе которых повышение скоростей движения пассажирских поездов. По мере увеличения скоростей движения поездов процессы износа щебеночного балласта приобрели особую значимость из-за сокращения межремонтных периодов, вызванных быстрой засоряемостью и загрязнением щебня его продуктами дробления и истирания. Из опыта отечественных и зарубежных железных дорог и результатов многочисленных исследований [1–3] известно, что балластный слой должен обладать достаточной прочностью и деформативностью, чтобы обеспечивать стабильность рельсовой колеи в течение нормативного межремонтного

периода. Эта стабильность определяется ограничением остаточных деформаций балластного слоя при движении поездов установленной массы и скорости при оптимальных затратах на техническое обслуживание железнодорожного пути.

В последние десятилетия геосинтетические материалы, такие как георешетка и геоячейки, широко использовались для улучшения работы балласта в пути [3–7]. Основной принцип армирования георешеткой заключается в обеспечении хорошей стабилизации частиц балласта, то есть ограничении бокового перемещения частиц. Георешетка может укладываться на основную площадку земляного полотна или размещаться в балластной призме вне зоны работы путевых машин, снижая колебания в подшпальном основании [4]. Применение геоячеек может обеспечить дополнительное внутреннее уплотняющее воздействие и армирование в слое щебня, снизить затраты на техническое обслуживание и улучшить долговечность пути [4, 8]. Однако геоячейки создают затруднения при текущем содержании пути. Для устранения препятствий работе путевых машин предлагается размещать геоячейки в нижней части балластного слоя. Прошлые исследования показали, что применение геоячеек значительно повышает прочность и жесткость балласта [4], однако отсутствие утвержденной методики проектирования подобных конструкций препятствует их применению на действующих линиях.

В качестве альтернативы геоячейкам авторы предлагают применять бывшие в употреблении автомобильные шины. Повторное использование отслуживших шин будет способствовать снижению вредного воздействия на окружающую среду. Вариант конструкции пути с применением автомобильных шин приведен на рис. 1.

Шины используются для минимизации деформации пути и повышения его несущей способности. В предлагаемой конструкции пути используются шины с удаленной боковиной, заполненные щебнем и размещенные на основной площадке. Шины выполняют функцию стабилизации частиц щебня, повышают жесткость балластного слоя и таким образом, снижают деформации балласта. При этом существенное влияние на стабильность и долговечность балластного слоя будут оказывать минеральный состав щебеночного балласта, который влияет на его способность сопротивляться удару и истиранию, зерновой состав, морозостойкость, уровень загрязнения и засорения [9] и т. д.

Настоящая публикация посвящена исследованию свойств материалов балластного слоя, которые в последующем будут применены в лабораторных исследованиях предлагаемой конструкции, и моделированию ее работы в пути.

Соппротивление истиранию и ударам являются важными характеристиками щебеночного балласта. Истирание зерен, вызванное разрушением балласта, сопровождается появлением более мелких фракций и уменьшением объема пор. Это может привести к увеличению плотности, снижению его фильтрационных свойств щебня и дополнительным деформациям пути.

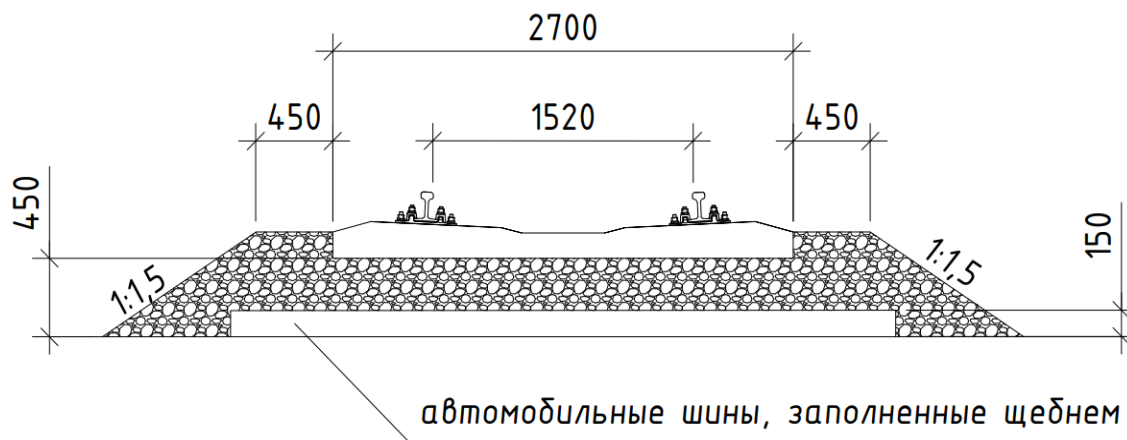


Рис. 1

Известны различные методы оценки сопротивления щебня истиранию. За рубежом используются:

- метод барабанной мельницы (Mill abrasion test, MA), заключающийся во вращении цилиндрической емкости — барабанной мельницы, заполненной щебнем, с добавлением воды. Вращение мельницы вызывает перемещение контактирующих частиц щебня и их истирание;

- метод микро-Деваль (micro-Dewal abrasion test, MDA), выполняемый по сходному принципу, но отличающийся от MDA-теста некоторыми параметрами испытаний;

- метод Лос-Анджелес (Los-Angeles abrasion test, LAA), выполняемый на абразивной машине, идентичной полочному барабану, применяемому в Российской Федерации. Испытание проводится с использованием металлических шаров и нормируется российским стандартом ГОСТ 7392—2014.

Метод барабанной мельницы используется только в странах Северной Америки, в то время как методы микро-Деваль и Лос-Анджелес (или аналогичные им) используются по всему миру. Испытания по методу Лос-Анджелес проводятся только на сухих образцах, в то время как метод микро-Деваль предполагает использование сухих или предварительно замоченных в воде частиц щебня.

Проведение испытаний по определению сопротивления истиранию щебня в полочном барабане

Для определения наиболее подходящей горной породы для щебеночного балласта конструкции железнодорожных путей проводились испытания на трех разных горных породах: базальте, габбро-диабазе и граните. Габбро-диабаз и гранит относятся к plutonic породам среднего и кислого отряда соответственно. Базальт является вулканической породой основного отряда.

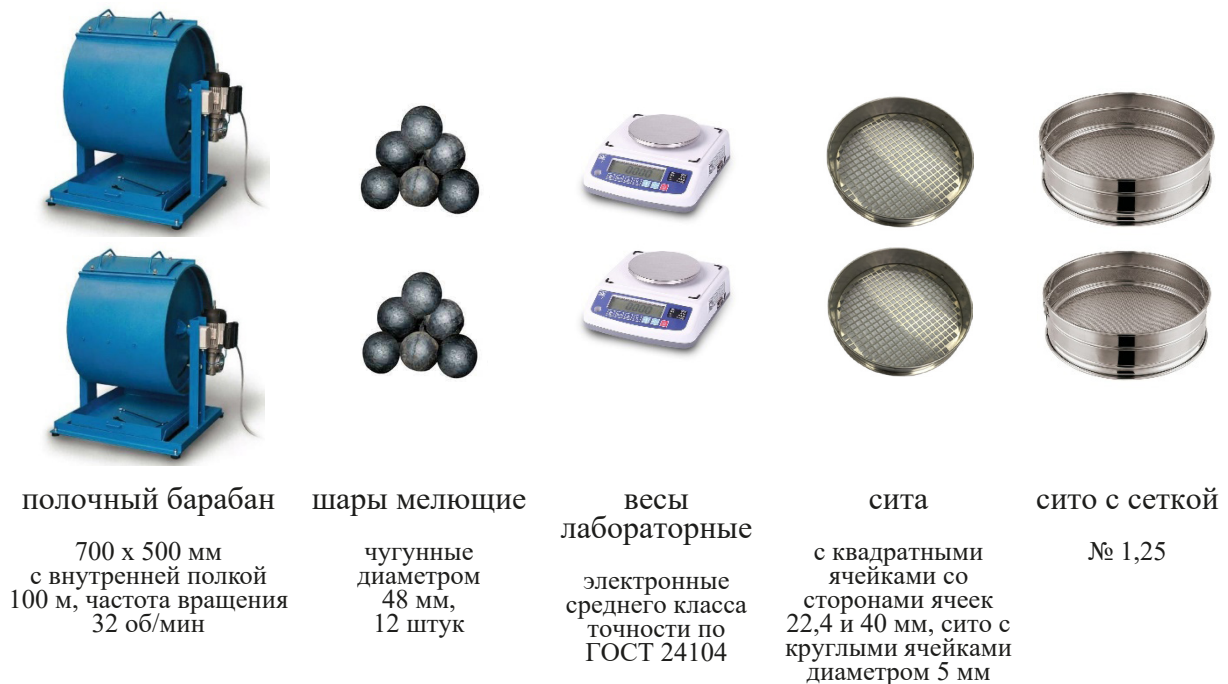


Рис. 2. Перечень оборудования, применяемого при испытаниях по определению сопротивления истиранию щебня в полочном барабане

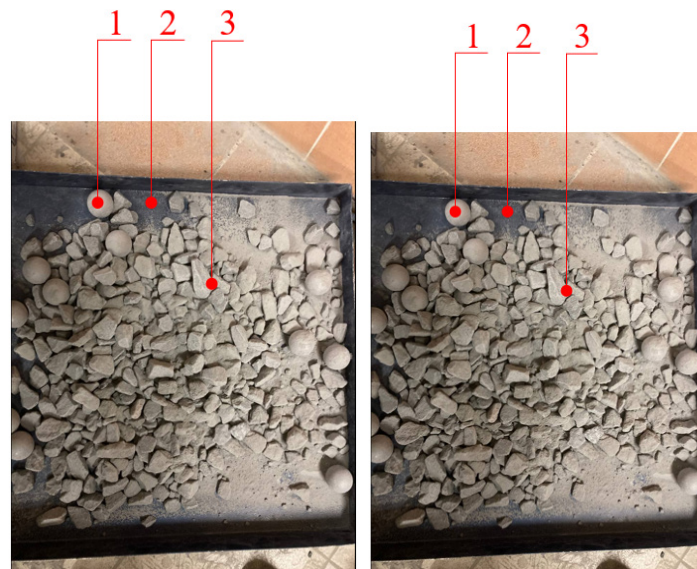


Рис. 3. Внешний вид образца после испытания:
1 — чугунные шары; 2 — лоток; 3 — испытанный щебень

Величина потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане определялась мерой разрушения зерен, для этого проводилось сравнение зернового состава пробы щебня до и после испытания.

Для данного метода применялись средства контроля и вспомогательное оборудование, приведенные на рис. 2.

Для проведения испытания была взята лабораторная проба щебня весом 50 кг, перемешанная и выровненная на металлическом листе. Для отсева от подготовленной пробы было отобрано 30 кг щебня. Отобранный щебень отсеивался на двух ситах с ячейками со сторонами 22,4 и 40 мм. После отсева аналитическая проба массой 20 кг была получена из остатков на сите с ячейками 22,4 мм. Если необходимая масса аналитической пробы не была достигнута после отсева, то дополнительно отбирался и просеивался щебень из исходной лабораторной пробы в соответствии с данной процедурой.

Аналитическая проба щебня массой 20 кг была разделена на две части по 10 кг. Одна из частей пробы помещалась в барабан вместе с 12 чугунными шарами и обрабатывалась в течение 1000 оборотов при частоте 32 об/мин. Вид пробы щебня после испытания представлен на рис. 3. Проба просеивалась через круглое сито с ячейками диаметром 5 мм и сито с сеткой № 1,25. Взвешенные остатки сит составили общую массу остатков для данной испытываемой пробы.

Величину потери массы щебня для каждой навески $\Delta M_{и}$, в % общей массы, после испытаний на истираемость в полочном барабане определяли по формуле:

$$M_{и} = \frac{m - m_{и}}{m} 100,$$

где m — масса испытываемого щебня, г;

$m_{и}$ — суммарная масса остатков на сите с круглыми ячейками диаметром 5 мм и сите с сеткой № 1,25, г.

Результаты двух испытаний аналитической пробы были усреднены для получения итогового значения.

Проведение испытаний по определению сопротивлению удару

Потеря массы после испытаний на сопротивление удару на копре определялась по степени разрушения зерен щебня в пробе. Для проведения этого испытания использовалось оборудование, показанное на рис. 4.

При испытаниях использовалась лабораторная проба массой 30 кг. Аналитическая проба массой 4,5 кг отбиралась из остатков на сите 22,4 мм. Полученная проба щебня была разделена на три равные навески, которые были промыты и высушены до постоянной массы. Для испытания каждой навески щебня ее высыпали в ступку, удалив при этом лишний щебень, выровняв ее края, и взвешивали ступку с щебнем. Ступку устанавливали на копер и подвергали 40 ударам бойка, после каждого из которых ступка автоматически поворачивалась на 45 градусов. После этого содержимое ступки помещалось на поддон, в том числе мелкие частицы, прилипшие к ступке. Затем щебень, прошедший через сито диаметром



копер ПМ
с стальной ступкой (внутренний диаметр 105 мм, высота 58 мм)

сита
с квадратными ячейками со сторонами ячеек 22,4 и 40 мм, сито с круглыми ячейками диаметром 5 мм

Рис. 4. Перечень оборудования, применяемого при испытаниях щебня на сопротивление удару на копре

5 мм, взвешивался с точностью до 0,1 г. В результате ударного воздействия бойка содержимое ступки разрушалось, что приводило к разрушению щебня. Внешний вид образцов до и после испытаний представлен на рис. 5 и 6 соответственно.

Величину потери массы щебня ΔM_y , в % общей массы, после испытаний на сопротивление щебня удару на копре определяли по формуле:

$$M_y = \frac{M_{-5}}{M} 100,$$

где M — масса испытываемого щебня, г;

M_{-5} — масса щебня, прошедшего через сито с круглыми ячейками диаметром 5 мм после проведения испытания, г.

Для получения результата испытания использовалось среднеарифметическое значение результатов трех последовательных навесок аналитической пробы.



Рис. 5. Внешний вид образца до испытания



Рис. 6. Внешний вид образца после испытания

Обработка результатов определения физико-механических свойств щебеночного балласта

Определение потери массы проб щебня после испытаний в полочном барабане представлено в табл. 1.

Путем анализа данных, показывающих потерю массы горных пород во время испытаний на износ в полочном барабане, были получены результаты, которые представлены в табл. 2.

ТАБЛИЦА 1. Результаты испытаний по определению потери массы после испытаний на истираемость в полочном барабане

№	Наименование материала	Масса пробы до испытания, кг	Остаток на ситах, кг		Величина потери массы, %	Среднее значение
			5 мм	1,25 мм		
1	Базальт	10	9,46	0,038	5,02	5,24
		10	9,42	0,034	5,46	
2	Базальт	10	9,34	0,031	6,29	5,82
		10	9,43	0,036	5,34	
3	Базальт	10	9,39	0,037	5,73	5,56
		10	9,42	0,042	5,38	
4	Гранит	10	8,74	0,06	12	11,85
		10	8,79	0,04	11,7	
5	Гранит	10	8,71	0,057	12,33	12,72
		10	8,62	0,048	13,12	
6	Гранит	10	8,75	0,058	11,92	12,26
		10	9,7	0,039	12,61	
7	Габбро-диабаз	10	9,18	0,06	7,6	8,04
		10	9,08	0,072	8,48	
8	Габбро-диабаз	10	9,09	0,051	8,59	8,44
		10	9,12	0,052	8,28	
9	Габбро-диабаз	10	9,16	0,064	7,76	8,17
		10	9,08	0,062	8,58	

ТАБЛИЦА 2. Результаты обработки данных испытаний по потери массы после испытания на истираемость в полочном барабане

Горная порода	Базальт	Габбро-диабаз	Гранит
Потеря массы после испытания на истираемость в полочном барабане, масс. %	5,54	8,22	12,28

Из табл. 2 видно, что базальт обладает лучшим показателем по потере массы после испытаний на истирание в полочном барабане — 5,54 масс. %.

На основе протоколов испытаний сформирована сводная таблица результатов испытаний по определению величины потери массы на сопротивление удару на копре, которая представлена в табл. 3.

В результате обработки данных испытаний по определению средней потери массы после испытаний на сопротивление удару на копре сформирована табл. 4.

Из табл. 4 видно, что базальт обладает лучшим показателем по потере массы после испытаний на ударную прочность на копре — 2,61 %.

ТАБЛИЦА 3. Результаты испытаний по определению величины потери массы
на сопротивление удару

№	Наименование материала	Масса пробы до испытания, кг	Масса щебня, прошедшего через сито 5 мм, кг	Величина потери массы, %	Среднее значение, %
1	Базальт	1,065	0,033	3,1	2,65
		1,049	0,027	2,6	
		1,042	0,023	2,24	
2	Базальт	1,06	0,031	2,92	2,55
		1,041	0,024	2,32	
		1,043	0,025	2,4	
3	Базальт	1,052	0,031	2,97	2,62
		1,02	0,023	2,26	
		1,034	0,027	2,63	
4	Гранит	1,008	0,041	4,11	3,97
		1,036	0,042	4	
		1,024	0,039	3,79	
5	Гранит	1,016	0,042	4,16	4,12
		1,038	0,044	4,25	
		1,01	0,040	3,94	
6	Гранит	1,052	0,050	4,72	4,39
		1,028	0,043	4,19	
		1,018	0,043	4,25	
7	Габбро-диабаз	1,09	0,034	3,13	2,84
		1,15	0,032	2,8	
		1,126	0,029	2,58	
8	Габбро-диабаз	1,056	0,031	2,9	2,68
		1,116	0,028	2,51	
		1,104	0,029	2,62	
9	Габбро-диабаз	1,098	0,031	2,84	2,88
		1,144	0,036	3,13	
		1,128	0,030	2,66	

ТАБЛИЦА 4. Результаты обработки данных по потере массы после испытаний
на ударную прочность на копре

Горная порода	Базальт	Габбро-диабаз	Гранит
Потеря массы после испытания на ударную прочность на копре, масс. %	2,61	2,80	4,16

Коллектив авторов провел испытания различных горных пород щебня для определения физико-механических характеристик щебня. В результате исследования было установлено, что базальтовые горные породы имеют наименьшую потерю массы как во время испытаний на истирание в полочном барабане, так и на ударную прочность, по сравнению с габбро-диабазом и гранитом. Авторами предложен вариант конструкции балластной призмы и экспериментально обоснован выбор балластного материала для этой конструкции. Полученные результаты могут быть использованы при моделировании работы балласта в пути.

Настоящая статья (работа) опубликована (выполнена) при поддержке федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Библиографический список

1. Liu Zh. Coupling Train-Track Models with the Discrete Element Method for a More Realistic Simulation of Ballasted Track Dynamic Behavior / Zh. Liu, B. Feng, E. Tutumluer // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. — 2023. — DOI: 10.1177/03611981231156933.
2. Ren D. Resilient and Permanent Axial Strain of Crusher-Run Materials under The Effect of Principal Stress Axes Rotation / D. Ren, T. Ishikawa, T. Tokoro. — 2022.
3. Arivalagan J. Effectiveness of Geosynthetics at Preventing Subgrade Instability under Cyclic Loading / J. Arivalagan, Ch. Rujikiatkamjorn, B. Indraratna et al. — 2023. — Pp. 427–437. — DOI: 10.1061/9780784484685.043.
4. Konon A. Influence of geosynthetics on the oscillations amplitude of railway subgrade / A. Konon, A. Petriaev // *11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018*: 11, Seoul, September 16–21, 2018. — Seoul, 2018. — Vol. 2. — Pp. 990–998.
5. Petriaev A. The Effect of Elastic Pads and Mats on the Stress–Strain State of Railway Subgrade / A. Petriaev, A. Konon, V. Egorov // *Lecture Notes in Civil Engineering*. — 2022. — Vol. 165. — Pp. 279–286. — DOI: 10.1007/978-3-030-77234-5_23.
6. Abrashitov A. A. Creation of a Two-Layer Ballast Prism of a Railroad Track from Granite Rubble Using Plastic Flat Geogrids and Rubber Crumb of Recycled Automobile Tires / A. A. Abrashitov // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”*, Vladivostok, Russky Island, October 01–04, 2019. Vol. 753, 3, Chapter 2. — Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020. — P. 032016. — DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032016.
7. Abrashitov A. Construction and Current Maintenance of the Reinforced Ballast Layer of the Railway Track / A. Abrashitov, A. Sidrakov, A. Zaitsev // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Virtual, Online, January 10–12, 2022. — Virtual, Online, 2022. — P. 022045. — DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022045.

8. Zikria R. Effect of Geocell Inclusion on Railway Ballast Stability / R. Zikria, U. S. Neyamat // Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. — Sydney, 2021.

9. Колос А. Ф. Засорение и загрязнение щебеночного балласта при эксплуатации железнодорожного пути / А. Ф. Колос // Известия Петербургского университета путей сообщения. — 2022. — Т. 19. — № 3. — С. 558–575.

Дата поступления: 31.09.2023

Решение о публикации: 21.11.2023

Контактная информация:

КОЛОС Алексей Федорович — канд. техн. наук, доц.; sdtk@pgups.ru

СЕРЕБРЯКОВ Дмитрий Владимирович — канд. техн. наук, доц.; sdtk@pgups.ru

ДЕМИН Кирилл Евгеньевич — студент; bymrballis@mail.ru

ЧЕБОТАЕВ Данил Сергеевич — студент; danil.chebotaev@mail.ru

ИСАКОВ Сергей Владимирович — студент; art.213@gmail.com

ЭВАН Николай Александрович — студент; evan.kolya@mail.ru

A Study of Physical and Mechanical Properties of the Ballast Section Materials for Higher-Speed and High-Speed Railways

A. F. Kolos, D. V. Serebryakov, K. E. Dyomin, D. S. Chebotaev, S. V. Isakov, N. A. Evan

Emperor Alexander I St. Petersburg State Transport University, 9, Moskovsky pr., Saint Petersburg, 190031, Russian Federation

For citation: Kolos A. F., Serebryakov D. V., Dyomin K. E., Chebotaev D. S., Isakov S. V., Evan N. A. A Study of Physical and Mechanical Properties of the Ballast Section Materials for Higher-Speed and High-Speed Railways. *Bulletin of scientific research results*, 2023, iss. 4, pp. 15-26. (In Russian) DOI: 10.20295/2223-9987-2023-4-15-26

Summary

Purpose: To substantiate the relevance of conducting research on the properties of ballast materials. To describe the methodology for conducting laboratory tests and present the results of a study of the physical and mechanical properties of ballast materials for higher-speed and high-speed train traffic. To propose the design of a ballast section using used car tires. **Methods:** Carrying out laboratory tests of samples of gravel from basalt, granite and gabbro-diabase for abrasion in an abrasion-tester and for impact resistance in a PM drop-testing machine. **Results:** The weight loss has been determined after tests for abrasion in an abrasion-tester and after tests for impact strength on a drop-testing machine. The lowest weight loss has been recorded for a sample of basalt, an intermediate weight loss has been observed for a sample of gabbro-diabase, and the highest - for crushed granite. **Practical significance:** Basalt rocks have the lowest mass loss in both abrasion-tester and impact tests compared to gabbro-diabase and granite. The authors have proposed a variant of the ballast section design and experimentally substantiated the choice of ballast material for this design. The results obtained can be used to substantiate the choice of ballast material in the design and construction and in modeling the performance of ballast in the track.

Keywords: Ballast, railway track, abrasion, impact resistance, abrasion-tester, drop-testing machine, physical and mechanical properties.

References

1. Liu Zh., Feng B., Tutumluer E. Coupling Train-Track Models with the Discrete Element Method for a More Realistic Simulation of Ballasted Track Dynamic. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2023. DOI: 10.1177/03611981231156933.
2. Ren D., Ishikawa T., Tokoro T. Resilient and Permanent Axial Strain of Crusher-Run Materials under The Effect of Principal Stress Axes Rotation, 2022.
3. Arivalagan J., Rujikiatkamjorn Ch., Indraratna B. et al. Effectiveness of Geosynthetics at Preventing Subgrade Instability under Cyclic Loading, 2023, pp. 427–437. DOI: 10.1061/9780784484685.043.
4. Konon A., Petriaev A. Influence of geosynthetics on the oscillations amplitude of railway subgrade. 11th International Conference on Geosynthetics 2018, ICG 2018: 11, Seoul, September 16–21, 2018, Seoul, 2018, vol. 2, pp. 990–998.
5. Petriaev A., Konon A., Egorov V. The Effect of Elastic Pads and Mats on the Stress–Strain State of Railway Subgrade. *Lecture Notes in Civil Engineering*, 2022, vol. 165, pp. 279–286. DOI: 10.1007/978-3-030-77234-5_23.
6. Abrashitov A. A. Creation of a Two-Layer Ballast Prism of a Railroad Track from Granite Rubble Using Plastic Flat Geogrids and Rubber Crumb of Recycled Automobile Tires. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering : International Science and Technology Conference “FarEastCon 2019”*, Vladivostok, Russky Island, October 01–04, 2019, vol. 753, 3, Chapter 2, Vladivostok, Russky Island: Institute of Physics Publishing, 2020, p. 032016. DOI: 10.1088/1757-899X/753/3/032016.
7. Abrashitov A., Sidrakov A., Zaitsev A. Construction and Current Maintenance of the Reinforced Ballast Layer of the Railway Track. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Virtual, Online, January 10–12, 2022. Virtual, Online, 2022, p. 022045. DOI: 10.1088/1755-1315/988/2/022045.
8. Zikria R., Neyamat U. S. Effect of Geocell Inclusion on Railway Ballast Stability. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Sydney, 2021.
9. Kolos A. F. Zasorenie i zagryaznenie shchebenochnogo ballasta pri ekspluatatsii zheleznodorozhnogo puti [Clogging and contamination of crushed stone ballast during the operation of railway tracks]. *Izvestiya Peterburgskogo universiteta putey soobshcheniya* [Proceedings of Petersburg Transport University]. 2022, vol. 19, Iss. 3, pp. 558–575. (In Russian)

Received: September 31, 2023

Accepted: November 21, 2023

Author's information:

Alexey F. KOLOS — PhD in Engineering, Associate Professor; sdtk@pgups.ru

Dmitrii V. SEREBRIAKOV — PhD in Engineering, Associate Professor; sdtk@pgups.ru

Kirill E. DYOMIN — Student; bymrballis@mail.ru

Danil S. CHEBOTAEV — Student; danil.chebotaev@mail.ru

Sergey V. ISAKOV — Student; art.213@gmail.com

Nikolai A. EVAN — Student; evan.kolya@mail.ru