

ВЛИЯНИЕ ФОРМЫ ЗЕРЕН ЩЕБЕНОЧНОГО БАЛЛАСТА НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА

Колос А.Ф.¹, Леус А.С.², Чистяков П.А.³, Клищ С.А.⁴, Осипов Г.В.⁵, Каминный О.А.⁶

¹Колос Алексей Федорович – кандидат технических наук, доцент;

²Леус Алексей Сергеевич – аспирант;

³Чистяков Павел Александрович – аспирант;

⁴Клищ Сергей Андреевич – студент;

⁵Осипов Григорий Владимирович – студент;

⁶Каминный Олег Александрович – студент,

кафедра строительства дорог транспортного комплекса, факультет транспортного строительства, Санкт-Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург

Аннотация: объектом исследования является балластный слой железнодорожного пути, воспринимающий динамическое воздействие от движущихся поездов.

Ключевые слова: балластный слой, щебень, щебеночный балласт, балластная призма, удельное зацепление щебня, угол внутреннего трения щебня, смесь из нового и очищенного щебня.

УДК 625.1.5

Цель работы: оценка влияния формы зерна щебня на его прочностные свойства: удельное зацепление и угол внутреннего трения.

Методы исследования: при проведении исследований были проведены лабораторные трехосные испытания щебеночного балласта фракции 25-60 мм с различной формой зерна в приборе трехосного нагружения.

Результаты: на основе проведенных лабораторных испытаний получены значения удельного зацепления и угла внутреннего трения щебеночного балласта при различной степени окатанности зерен щебня. Данные испытаний показывают наибольшее влияние формы зерна щебня на его удельное зацепление, которое в отдельных сериях испытаний снижалось на 60-70% в зависимости от степени окатанности зерен.

Практическая значимость: полученные результаты являются новыми и позволяют нормировать количество очищенного щебня, возвращаемого в путь при глубокой очистке, в зависимости от степени окатанности его зерен.

Надежность работы балластного слоя железнодорожного пути определяется его несущей способностью. На несущую способность балласта оказывают влияние уровень динамического воздействия, характеристики балласта и его основания. Основными свойствами щебеночного балласта, влияющими на его несущую способность, являются его прочностные характеристики – удельное сцепление, c и угол внутреннего трения, φ . Прочностные характеристики балласта зависят от его гранулометрического состава, плотности, окатанности, загрязненности и других факторов. Изменение этих свойств в процессе работы щебеночного балласта в пути будет определять величину несущей способности.

Известно большое количество экспериментальных работ, посвященных изучению прочностных свойств щебня для балластного слоя железнодорожного пути. В основном, эти исследования выполнены с помощью приборов трехосного нагружения [1, 2, 3]. Большой объем исследований посвящен изучению влияния различных факторов на снижение прочностных свойств щебеночного балласта [4]. Такими факторами являются:

- накопление в балластном слое мелких фракций, образующихся за счет образования продуктов собственного дробления [5];
- инфильтрация в балластный слой мелких частиц с поверхности на участках перевозки сыпучих грузов или загрязнение балластной призмы за счет инфильтрации продуктов износа железобетонных шпал;
- инфильтрация пылевато-глинистых частиц из нижележащих слоев под балластной призмой в толщу балластного слоя;
- скалывание острых угловатых граней зерен щебня под действием периодически действующей динамической нагрузки от движущихся поездов, что придает им более округлую (окатанную) форму;
- действие вибродинамической нагрузки, передающейся балластному слою железнодорожного пути, сопровождающееся снижением количества контактов между частицами за счет возникновения их колебаний, что приводит к снижению сил трения и зацепления, способствующее понижению несущей способности балластной призмы [6, 7, 8, 9].

Целью настоящего исследования является исследование влияния окатанности зёрен щебня на его прочностные свойства. В выполненном исследовании окатанность зёрен щебня моделировалась путем его обработки в полочном барабане.

Исследование прочностных свойств балласта выполнялось путём трёхосного сжатия в камере стабилометра по методике консолидированно-недренированных испытаний при максимально возможной скорости разрушения образца. Испытания проводились в стабилометре STX-600 и вакуумном стабилометре конструкции ЛИИЖТа в соответствии с действующими национальными стандартами, в частности, ГОСТ 12248-2010 [10]. Боковое давление на образец σ_3 задавалось равным 40, 60 и 80 кПа.

Образцы для испытаний изготавливались из щебня II категории по ГОСТ 7392-2014 [11]. Плотность образцов изменялась в диапазоне 1,54-1,62 г/см³. В образцах использовался новый щебень и щебень, прошедший обработку в полочном барабане.

На рисунке 1 приведен пример обработки результатов экспериментов по определению удельного сцепления и угла внутреннего трения для нового гранитного щебня II категории с построением кругов Мора и огибающей предельное напряженное состояние испытываемых образцов.

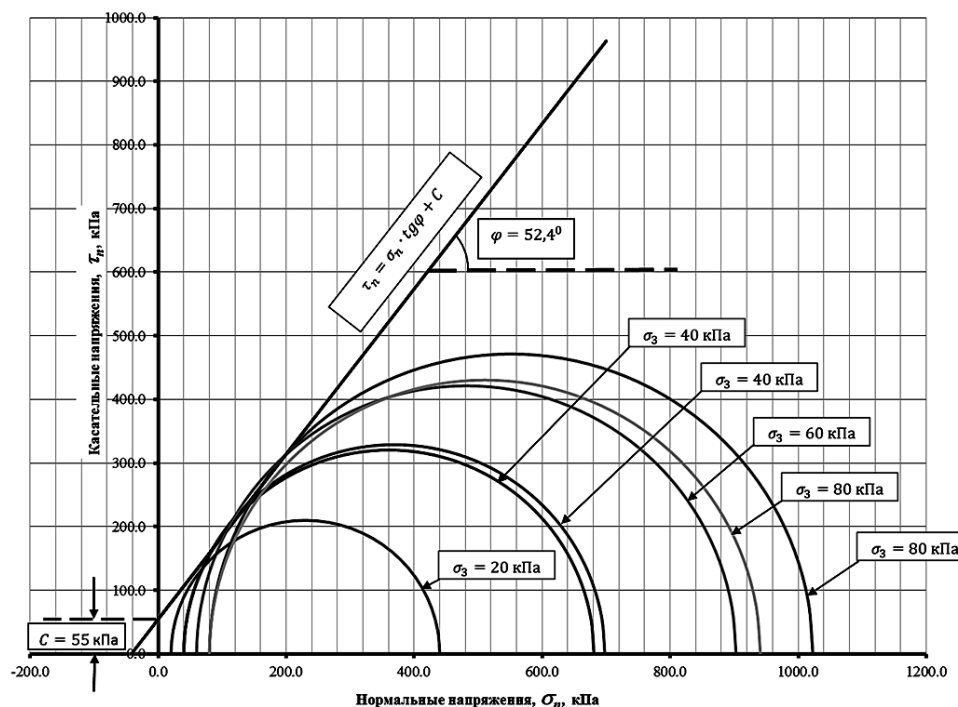


Рис. 1. Обработка результатов экспериментов по определению прочностных характеристик щебеночного балласта. Круги Мора и огибающая предельного напряженного состояния образцов, построенные по результатам обработки экспериментальных данных

В таблице 1 приведены сводные данные по определению прочностных свойств нового щебеночного балласта.

В процессе работы щебня под поездной нагрузкой происходит скалывание его острых граней, вследствие чего зерна щебня приобретают более окатанную форму. В целом исследование влияния формы зерна щебня на несущую способность балластного слоя до настоящего времени никто не анализировал и не определял. В ходе проведения работ на участках железнодорожного пути по очистке щебеночного балласта производится исключительно только удаление фракций из щебня, содержание которых по ГОСТ 7392-2014 [11] не допускается. Таким образом, очищенный щебень после многократных очисток балласта, имея зерновой состав по ГОСТ 7392-2014, может иметь такую форму зерна, при которой прочностные свойства балласта не будут обеспечивать надежную работу балластного слоя в течение требуемого межремонтного цикла.

Таблица 1. Сводные результаты определения удельного сцепления и угла внутреннего трения нового щебеночного балласта в сериях испытаний

Шифры серий испытаний	Плотность образцов,	Прочностные свойства щебня
-----------------------	---------------------	----------------------------

	г/см ³	Удельное сцепление С, кПа	Угол внутреннего трения φ, град.
TS1	1,60 – 1,62	55	52,4
TS2	1,59 – 1,61	58	49,8
TS3	1,58 – 1,62	65	52,6
TS4	1,59-1,61	55	52,4
TS5	1,59-1,62	59	52,3
TS6	1,57-1,60	61	52,8
TS7	1,59-1,61	50	50,8
TS8	1,58 – 1,60	55	52,4
Среднее значение, \bar{X}		57	51,9
Среднеквадратическое отклонение, S		4,56	1,06
Коэффициент вариации, V		0,08	0,02

Для оценки степени влияния окатанности зёрен щебня на прочностные характеристики, новый щебень проходил обработку в полочном барабане при 100, 200, 500 и 800 оборотах. Из окатанного щебня были изготовлены образцы для испытаний, при этом фракционный состав образцов нового и окатанного щебня был идентичен. Характеристики образцов приведены в таблице 2.

На рисунках 2 и 3 приведено сопоставление изменения девиатора напряжений в образце при разной степени обработки щебеночного балласта в полочном барабане при одинаковой величине всестороннего бокового давления, σ_3 .

Таблица 2. Характеристика окатанного (очищенного) щебня II категории по ГОСТ 7392-2014 [11] для проведения трехосных испытаний

Порода, шифры серий испытания	Фракционный состав, мм, масс. %	Кол-во оборотов в полочном барабане	Плотность образцов, г/см ³
гранит (TS9)	60-70 мм – 4,2% 40-60 мм – 61,1% 25-40 мм – 34,7 %	100	1,59 – 1,61
гранит (TS10)	60-70 мм – 3,2% 40-60 мм – 58,6% 25-40 мм – 38,2 %	200	1,56 -1,62
гранит (TS11)	60-70 мм – 4,8% 40-60 мм – 64,6% 25-40 мм – 30,6 %	500	1,57 – 1,59
гранит (TS12)	60-70 мм – 3,0% 40-60 мм – 55,7% 25-40 мм – 41,3%	800	1,55 – 1,60

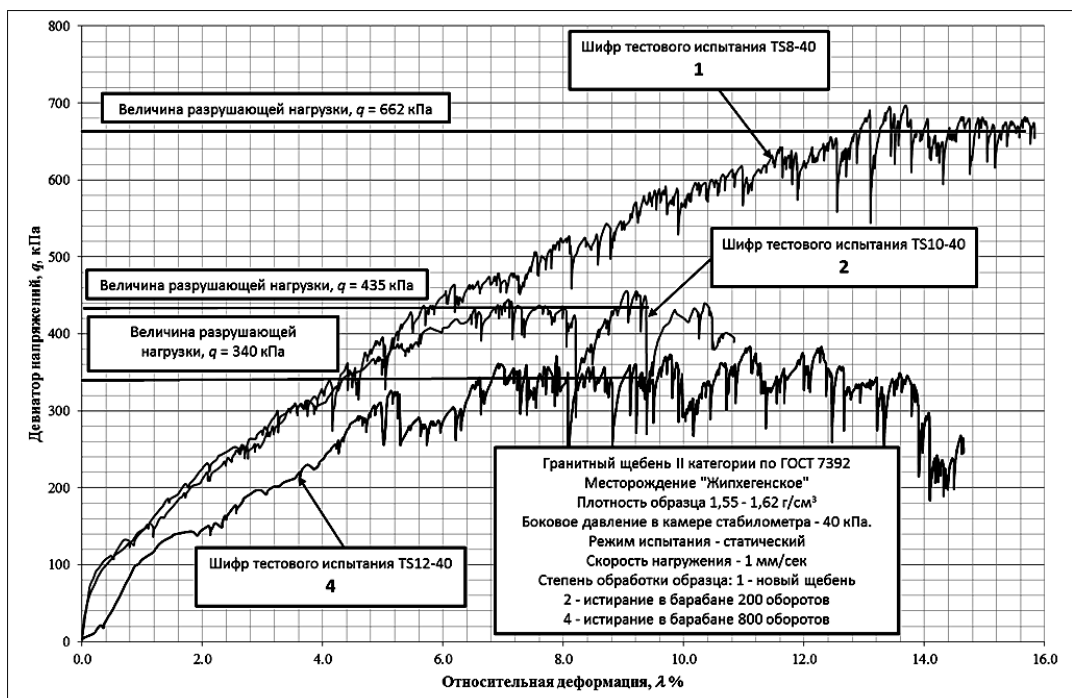


Рис. 2. Кривые разрушения образцов щебня в камере трехосного нагружения при разной степени обработки образцов балласта в полочном барабане (боковое давление в камере стабилометра 40 кПа)

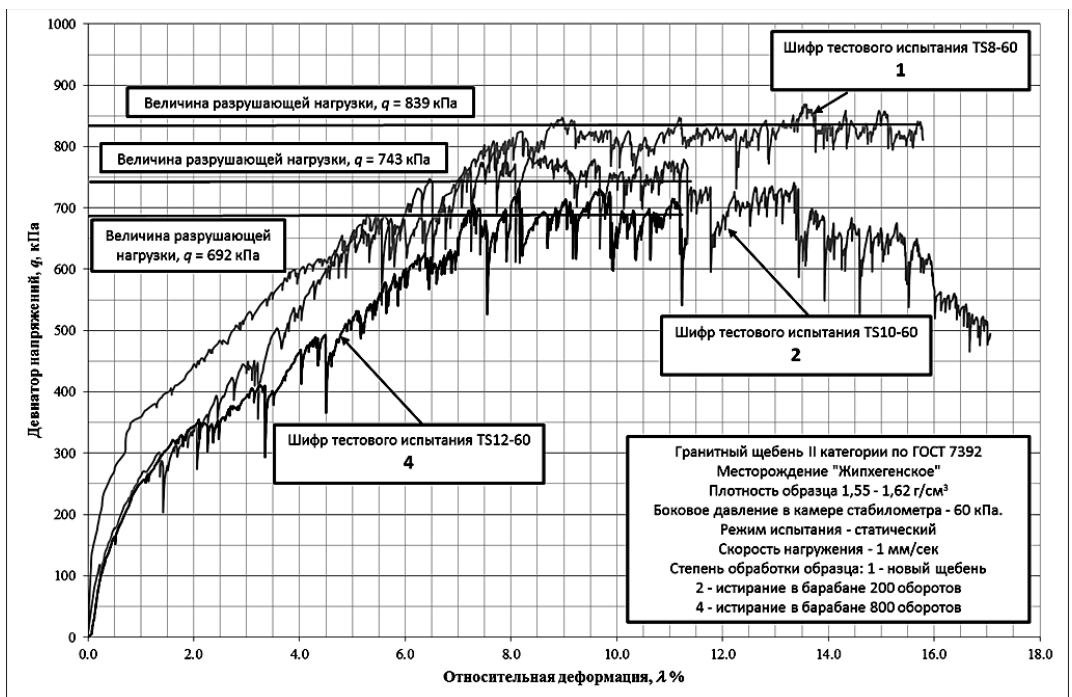


Рис. 3. Кривые разрушения образцов щебня в камере трехосного нагружения при разной степени обработки образцов балласта в полочном барабане (боковое давление в камере стабилометра 60 кПа)

В таблице 3 приведены результаты определения прочностных свойств окатанного щебня при действии статической нагрузки.

Таблица 3. Сводные результаты определения удельного сцепления и угла внутреннего трения щебеночного балласта в сериях испытаний с разной степенью окатанности

Место отбора проб,	Количество оборотов	Прочностные свойства щебня
--------------------	---------------------	----------------------------

порода, шифры серий испытания	в полочном барабане	Удельное сцепление С, кПа	Угол внутреннего трения φ , град.
гранит, TS8 – новый щебень	-	57	52,4
гранит, TS9	100	55	52,4
гранит, TS10	200	46	51,2
гранит, TS11	500	21	50,7
гранит, TS12	800	9	55,4

Укладка в путь при ремонте смеси из нового и очищенного щебня позволяет обеспечить соответствие материала требованиям ГОСТ 7392-2014 [11]. В настоящем исследовании изучены прочностные характеристики смесей нового и очищенного щебня, определяющие несущую способность балластной призмы, сложенной смесями щебня. Смесей для испытаний формировались из щебня II категории по ГОСТ 7392-2014 [11] в соотношении по массе нового и очищенного щебня соответственно: 70% и 30%, 50% и 50%, 30% и 70%. В качестве очищенного балласта применялся гранитный щебень II категории, прошедший истирание в полочном барабане при 200, 500 и 800 оборотах.

В таблице 4 приведены результаты определения прочностных характеристик смесей нового и очищенного щебня.

Таблица 4. Удельное сцепление и угол внутреннего трения смесей из нового и очищенного гранитного щебня II категории по ГОСТ 7392-2014 [11]

Прочностные характеристики	Класс очищенного щебня по окатанности								
	200 оборотов			500 оборотов			800 оборотов		
	Процентное соотношение в смеси нового (числитель) и очищенного (знаменатель) щебня, %								
	70/30	50/50	30/70	70/30	50/50	30/70	70/30	50/50	30/70
С, кПа	56	57	51	40	31	19	27	20	6
φ , град.	50,5	48,6	51,6	49,3	48,0	48,5	51,6	52,1	53,2

Результаты, приведенные в таблице 4, свидетельствуют, что угол внутреннего трения практически не зависит от степени окатанности зерен щебеночного балласта и в среднем колеблется от 48° до 53°. В отношении удельного сцепления также сделан вывод, отражающий выявленную ранее закономерность: чем больше степень окатанности щебеночного балласта, тем ниже его удельное сцепление. Можно убедиться, что после обработки нового щебня в барабане при количестве оборотов, равном 800, удельное сцепление щебеночного балласта, сформированного из 30% нового и 70% очищенного щебня, стремится к нулю.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Повышение степени окатанности зерен щебеночного балласта приводит к снижению прочностных свойств щебеночного балласта. Если новый щебень характеризуется величиной сцепления 57 кПа, то щебень после обработки в полочном барабане при количестве оборотов, равном 800, имеет удельное сцепление практически равное нулю, что несомненно скажется на несущей способности балластного слоя.

2. Степень окатанности зерен практически не влияет на угол внутреннего трения щебня. Среднее значение угла внутреннего трения любого щебня, соответствующего по фракционному составу щебню II категории и имеющему плотность 1,55-1,60 г/см³ в среднем составляет 51°.

3. Прочностные характеристики щебеночного балласта, сформированного из нового и очищенного щебня существенно зависят от изначальной степени окатанности очищенного балласта. При использовании в смеси 70% очищенного щебня и 30 % нового удается обеспечить прочностные свойства щебеночного балласта близкие к нормативным значениям, установленным для нового щебня. В то же время при любом процентном соотношении нового щебня в смеси с обработанным при 800 оборотах в полочном барабане, значения удельного сцепления оказываются в 2 и более раз ниже, чем у нового балласта, а при соотношении нового и очищенного щебня 30/70 % величина удельного сцепления при действии статических нагрузок не превышает 6 кПа.

Статья опубликована при поддержке Федеральным Государственным Образовательным Учреждением Высшего Образования «Петербургский Государственный Университет Путей Сообщения Императора Александра I» инициативных научных работ, выполняемых студенческими научными коллективами.

Список литературы

1. *Кьян И., Ли С.Ж., Тутумлуер Е., Хашаи И.М.А.* Оценка прочностных свойств балласта на основе крупномасштабных трехосных испытаний. Метод дискретного элемента: Транспортные исследования. № 2374. С. 126-135.
2. *Кумара Ж., Хаяно К., Шигекуни И., Сасаки К.* Физические и механические свойства песчано-гравийных смесей, оцененных в лаборатории трехосных испытаний. Международный журнал геоматериалов. Издание 4. № 2 (S. 1. № 8). Июнь, 2013. С. 546-551.
3. *Ионеску Даниэла.* Оценка инженерных характеристик железнодорожного балласта. Диссертация, утвержденная на получение степени доктора наук. Университет Воллонгонга, 2004. 440 с.
4. *Нальсунд Р.* Характеристики железнодорожного балласта, критерии выбора и эксплуатация. Норвежский Университет наук и технологий. Диссертация на соискание степени доктора наук, 2014. 177 с.
5. *Индаратна Б., Нимбалкар С.* Последствия разрушения балласта для железнодорожного пути, основанного на численном моделировании. Сидней. Австралия, 2011. 13-я международная конференция международной Ассоциации компьютерных методов, применяемых в геомеханике. С. 1085-1092.
6. *Колос А., Конон А., 2016.* Оценка несущей способности железнодорожного балласта и подбалластного основания под поездной нагрузкой 300 кН. Труды международной конференция «Проблемы инноваций в геотехнике». Астана. 5-7 августа, 2016. Издательство: Роттердам: Балкема. С. 291–294.
7. *Морозова А.* Несущая способность подшпального основания железнодорожного пути на участках обращения поездов с осевыми нагрузками до 300 кН. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Санкт-Петербург, ПГУПС, 2014. 184 с.
8. *Колос А., Морозова А.* Напряженное состояние земляного полотна и железнодорожного балластного слоя при повышенных нагрузках. Путь и путевое хозяйство, 2014. № 7. С. 13-14.
9. *Колос А., Морозова А.* Исследование распространения виброускорений частиц балластного слоя в условиях движения поездов с повышенными осевыми нагрузок // Известия Петербургского университета путей сообщения, 2014. № 2 (39). С. 29-35.
10. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.
11. ГОСТ 7392-2014. Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути.
12. ГОСТ 20522. Грунты. Методы статистической обработки результатов испытаний.