

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ ЩЕБНЯ, ПРИМЕНЯЕМОГО ДЛЯ БАЛЛАСТНОГО СЛОЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

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

¹Колос Алексей Федорович - кандидат технических наук, доцент;

²Осипов Григорий Владимирович - студент;

³Клищ Сергей Андреевич - студент;

⁴Леус Алексей Сергеевич - аспирант;

⁵Каминный Олег Александрович – студент,

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

Аннотация: объектом исследования является балластный слой железнодорожного пути, воспринимающий нагрузки от движущихся поездов. Цель работы – количественное определение прочностных свойств щебеночного балласта (удельного зацепления и угла внутреннего трения), которые должны использоваться для оценки несущей способности балластной призмы железнодорожного пути. 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 форме зерен щебня. Проведенные испытания доказывают существенное влияние формы зерна щебня на его удельное зацепление, которое в отдельных сериях испытаний снижалось на 60-70%. Практическая значимость: полученные результаты являются новыми и являются основой для оценки несущей способности балластного слоя железнодорожного пути.

Ключевые слова: несущая способность щебня, угол внутреннего трения и удельное сцепление, окатанность щебня.

УДК 625.1.5

Проблема стабильности рельсовой колеи за весь срок службы конструкции верхнего строения пути определяется не только надежностью земляного полотна, применяемых типов шпал, скреплений, рельсов, но и качеством всех элементов подшпального основания, в том числе щебеночного балласта.

Несмотря на то, что исследовательские работы по повышению срока службы балласта в разных условиях эксплуатации ведутся с 80-х годов нормативные документы с такими требованиями пока отсутствуют. Сегодня доказано, как результатами отечественных, так и зарубежных исследований, что именно балластный слой остается проблемным местом [1, 2, 3, 4, 5]. Следует отметить, что основные характеристики, определяющие сегодня возможность применения щебня в конструкции верхнего строения пути в соответствии с [6] никак не определяют такой важнейший количественный параметр, как несущая способность балластной призмы. Хотя именно этот критерий определяет стабильную работу пути под поездной динамической нагрузкой. К сожалению, в настоящий момент времени таких методик, позволяющих прогнозировать несущую способность балластного слоя с наработкой тоннажа с учетом климатических особенностей отдельных направлений железнодорожных линий и других факторов нет. Предлагаемые сегодня подходы к решению этой проблемы не учитывают главного обстоятельства: балластный слой работает в условиях повышенных вибродинамических нагрузок. Основным фактором, определяющим надежность работы балластного слоя, является его несущая способность, которая несомненно зависит и от уровня динамического воздействия, передаваемого материалу балластного слоя и от характеристик основания, на котором такой слой сформирован.

Несущую способность балластного слоя определяют следующие прочностные характеристики - удельное зацепление щебня, C и его угол внутреннего трения, φ . Именно они определяют сопротивление щебня сдвигу, τ_n в каждой точке балластного слоя по некоторой площадке $n - n$, проведенной через эту точку. Взаимосвязь между сопротивлением щебня сдвигу и его прочностными свойствами может быть описана хорошо известным законом Кулона, являющегося частным случаем теории прочности Мора [7]:

$$\tau_n = \sigma_n * tg\varphi + C \quad (1)$$

где σ_n – нормальные напряжения, возникающие в некоторой точке по площадке $n - n$, проведенной через данную точку.

Прочностные свойства щебня существенно зависят от гранулометрического состава щебня, его плотности, формы зерна, загрязненности, наличия демпфера между шпалой и балластом, его жесткости и т.д. [1, 2, 3, 4, 5]. В рамках настоящего исследования для определения данных характеристик проводились испытания на приборах трехосного нагружения. Испытания проводились в стабилометре STX-600 (рисунок 1) в соответствии с действующими национальными стандартами [8].

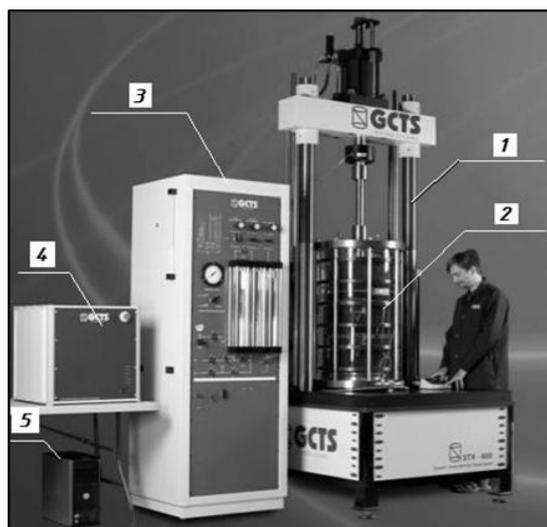


Рис. 1. Прибор трехосного нагружения STX-600: 1 – силовая рама; 2 – камера стабилометра; 3 – блок контроля всестороннего давления в камере стабилометра; 4 – блок сбора данных; 5 – персональный компьютер с программным обеспечением

Методика испытаний заключается в том, что образец с пробами щебня помещался в водонепроницаемую мембрану. Затем образец с мембраной устанавливался в резервуар с водой, после чего в камере прибора создавалось всестороннее боковое давление, σ_3 , которое обжимало сформированный образец из щебня. Боковое давление на образец σ_3 задавалось равным 40, 60 и 80 кПа. На следующем этапе испытания через систему гидравлического нагружения на образец передавалась вертикальная нагрузка с постоянной скоростью нагружения до момента разрушения образца. В процессе эксперимента с помощью системы регистрации фиксировались величины избыточных вертикальных давлений на образец и соответствующие им значения вертикальных деформаций образца. Для получения значений удельного зацепления и угла внутреннего трения щебня испытания в одной серии испытаний проводились при нескольких разных значениях величин бокового давления, что давало возможность построить диаграмму напряженного состояния Мора, которая позволила определить значения прочностных свойств щебеночного балласта.

На рисунке 2 приведен пример обработки результатов экспериментов по определению удельного зацепления и угла внутреннего трения для нового гранитного щебня II категории по ГОСТ 7392-2014 [6] с построением кругов Мора и огибающей, характеризующей предельное напряженное состояние.

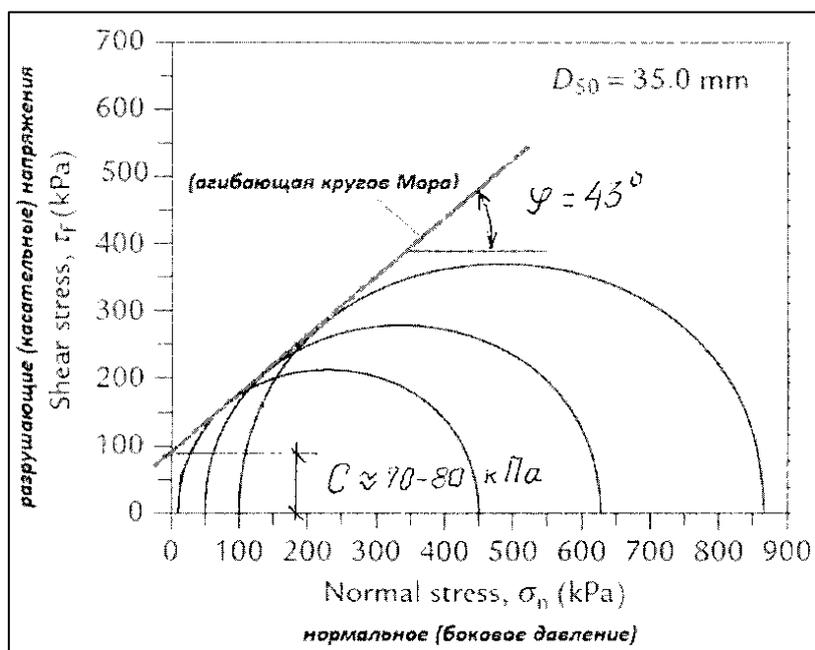


Рис. 2. Круги Мора и огибающая предельного напряженного состояния образцов

В таблице 1 представлены сводные данные по результатам испытаний нового щебня, соответствующего требованиям ГОСТ 7392-2014 [6].

Таблица 1. Результаты определения удельного зацепления и угла внутреннего трения нового щебня по ГОСТ 7392-2014

Характеристика проб щебня (серия испытаний, TS)	Плотность образцов, г/см ³	Прочностные свойства щебня	
		Удельное сцепление С, кПа	Угол внутреннего трения φ, град.
Новый щебень (TS1)	1,60 – 1,62	55	52,4
Новый щебень с преобладанием фракции 50-60 мм (TS2)	1,59 – 1,61	58	49,8
Новый щебень с преобладанием фракции 40-50 мм (TS3)	1,58 – 1,62	65	52,6
Новый щебень с преобладанием фракции 30-40 мм (TS4)	1,59-1,61	55	52,4
Новый щебень (TS5)	1,59-1,62	59	52,3
Новый щебень при удалении фракции менее 20 мм (TS6)	1,57-1,60	61	52,8
Новый щебень с преобладанием фракции 50-60 мм (TS7)	1,59-1,61	50	50,8
Новый щебень (TS8)	1,58 – 1,60	55	52,4

По своей природе щебень, как несвязный материал, не обладает коагуляционными связями, формирующимися под действием молекулярных сил, то есть практически не должен иметь сцепления. Однако, проведенные эксперименты, наоборот, не демонстрируют отсутствие удельного сцепления. Причина кроется в появлении у щебня явления зацепления острых граней друг за друга при нагружении образца внешней нагрузкой, что и приводит к возникновению условного удельного сцепления, которое условно назовем «удельное зацепление». При чем сама по себе величина зацепления достигает значительных величин (до 65 кПа), фактически характеризующих величину касательных усилий, приводящих к скалыванию граней (ребер) частиц щебеночного балласта.

Однако, с течением времени щебень, используемый в балластном слое железнодорожного пути, под периодически действующей пульсирующей нагрузкой от проходящих поездов, имеет свойство скалываться, истираться и приобретать окатанную форму. Для оценки влияния формы зёрен щебня на его прочностные характеристики, новый щебень проходил обработку в специальной машине. Машина представляет из себя вращающийся барабан, в который помещался новый щебень, который за счет вращения начинает постепенно скалываться (окатываются острые грани) и истираться об соседние частицы, приобретая округлую форму. В зависимости от числа оборотов барабана щебень условно был разделен на 4 класса по окатанности: 1 класс – 100 оборотов, 2 класс – 200 оборотов, 3 класс - 500 оборотов, 4 класс – 800 оборотов. Из окатанного щебня были изготовлены образцы для испытаний, при этом фракционный состав образцов нового и окатанного щебня был идентичен.

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



Рис. 3. Кривые разрушения образцов щебня в камере трехосного нагружения при разной степени обработки образцов балласта в полочном барабане (боковое давление в камере стабилометра 40 кПа)

Анализ рисунка 3 позволяет сделать вывод, что появление в щебеночном балласте окатанных зерен приводит к уменьшению величины разрушающего давления на образец щебня. При этом, щебень с более окатанными ребрами показывает более низкие значения разрушающей величины девиатора напряжений при прочих равных условиях. Образец из нового щебня при боковом давлении 40 кПа разрушается в камере стабилометра при величине девиатора напряжений, равной 662 кПа. Образец щебня, прошедший обработку в полочном барабане при 200 оборотах, характеризуется разрушающим девиатором в 435 кПа, а щебень после обработки при 800 оборотах – 340 кПа. Таким образом, в первом случае разрушающая нагрузка оказалась в 1,5 раза меньше, а во втором случае в 1,9 раза ниже по сравнению с новым щебнем. Это свидетельствует о том, что прочностные свойства окатанного щебня будут значительно ниже, чем у нового.

В таблице 2 приведены итоговые результаты определения прочностных свойств окатанного щебня.

Таблица 2. Результаты определения удельного зацепления и угла внутреннего трения щебеночного балласта в сериях испытаний с разной степенью окатанности

Характеристика проб щебня (серия испытаний, TS)	Количество оборотов в полочном барабане	Прочностные свойства щебня	
		Удельное сцепление C , 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

Из полученных данных видно, что существует выраженная зависимость между степенью окатанности зёрен щебня (формой зерна) и его удельным сцеплением. По мере приближения зёрен щебня к полуокруглой и округлой форме сцепление щебня снижается практически до нуля. Если новый щебень

характеризуется удельным сцеплением C равным 57 кПа, то очищенный щебень после обработки в полочном барабане при количестве оборотов, равном 800, имеет сцепление 9 кПа, то есть в 6 раз меньше. В отношении угла внутреннего трения можно сделать вывод, что с увеличением степени окатанности ϕ практически не изменяется.

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы.

1. Новый щебеночный балласт по ГОСТ 7392-2014 [6] характеризуется значительной величиной удельного зацепления (до 50-60 кПа) и значением угла внутреннего трения, достигающего 50-52 град.

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

3. Степень окатанности зерен практически не влияет на угол внутреннего трения щебня. Среднее значение угла внутреннего трения любого щебня среднем составляет 51°.

Список литературы

1. *Кьян И., Ли С.Ж., Тутумлуер Е., Хаиши 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). С. 546-551. Июнь, 2013.
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. *Индраратна 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. ГОСТ 7392-2014 «Щебень из плотных горных пород для балластного слоя железнодорожного пути».
7. *Черников А.К.* Решение жесткопластических задач геомеханики методом характеристик: Учеб. пособие / Петерб. гос. ун-т путей сообщ. СПб.: ПГУПС, 1997. 191 с.
8. ГОСТ 12248-2010. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости.