

Щебеночный балласт

Щебеночный балласт оказывает большое влияние на качество и прочность железнодорожного пути. В связи с этим к нему предъявляется ряд особых требований. На качество балласта большое влияние оказывает наличие загрязнений. Один из наиболее опасных загрязнителей — мелкие фракции, образующиеся в результате истирания частиц щебня.

Верхнее строение балластного пути имеет конструкцию, которую можно назвать плавающей. Если параметры рельсов, креплений и шпал выбраны правильно, то щебеночный балласт является наиболее слабым звеном в этой системе.

Для того чтобы щебень оптимально выполнял свои функции, он должен соответствовать как субстанционным, так и гранулометрическим требованиям.

Балластное основание должно быть рассчитано таким образом, чтобы нагрузка от подвижного состава, передаваемая рельсами через шпалы на щебень, распределялась как можно равномернее в нижнем строении пути. Толщина балластного слоя и дренаж земляного полотна являются главными факторами для нормального функционирования щебеночного балласта. Под действием поездной нагрузки щебеночный балласт подвергается статическим и динамическим воздействиям. Вертикальные нагрузки, под действием которых в балласте возникают напряжения сжатия, передаются нижнему строению пути.

Теоретические познания в области нагрузок, действующих в системе, свидетельствуют о сложности конструкции рельсошпальной решетки, балластной призмы и нижнего строения пути. Для несущей способности балластной призмы особое значение имеет ее прочность на сдвиг.

Горные породы, используемые для щебеночного балласта

Требования к горным породам, пригодным для балласта

Горная порода для щебеночного балласта пути должна соответствовать следующим требованиям:

- устойчивость к атмосферным воздействиям;
- высокие вязкость и прочность на сжатие;
- отсутствие примесей, ухудшающих воздухо- и водопроницаемость, например, суглинка и других почвенных включений;
- наличие большого числа граней с острыми ребрами;
- высокая ударная прочность и прочные ребра.

Подтверждение указанных характеристик осуществляется на основе испытаний, предусмотренных стандартами. Наиболее пригодны для использования в качестве балласта твердые горные породы (гранит, базальт, диабаз и др.). Мягкие (известняк, доломит, осадочные горные породы и др.) имеют меньшую прочность на сжатие.

Гранит. Эта массивная, относительно крупнокристаллическая магматическая абиссальная горная порода имеет большое содержание кварца, полевого шпата, а также темных минералов, например слюды. Гранит бывает средне- и крупнозернистым с однородным распределением минералов. Размер кри-

сталлов колеблется от 1 мм до нескольких сантиметров. Обычно все кристаллы видны невооруженным глазом.

Цветовой спектр гранита отличается богатой палитрой от светло-серого до синеватого, красного и желтоватого. При этом тип кристаллизации и влияние окружающей среды, которому подверглась горная порода, также играют большую роль, как и содержание минералов. Желтый цвет выветренного гранита говорит о соединениях гидроокиси железа, появившихся в результате выветривания железосодержащих минералов из гранита.

Существует простое правило: желтый гранит технически хуже серого. Полевые шпаты, содержащиеся в желтом граните, частично превращались в глинистые минералы, что вело к определенным ухудшениям прочностных свойств.

Базальт является вулканической породой и характеризуется низким содержанием соединений кремневой кислоты, состоит прежде всего из смеси силикатов железа и магния с оливином и пироксеном, а также с богатыми кальцием полевыми шпатами. Базальт образуется тогда, когда жидкая лава с малым содержанием кремневой кислоты выходит на поверхность земли и относительно быстро остывает.

Цвет базальта обычно имеет все оттенки от темно-серого до черного. Большей частью он состоит из мелкозернистой основной массы. В качестве строительного материала базальт используется прежде всего для нижнего строения автомобильных дорог и железнодорожного пути. Это прочный на сжатие материал, тяжело поддающийся обработке, но не хрупкий.

Особый вид представляет базальт, подвергающийся постоянному воздействию солнечного излучения. Он легко разрушается и поэтому непригоден для многих технических целей. Причина разрушения

заключается в большом содержании оливина, который достаточно легко выветривается.

Затвердевание лавы может быть двух видов. Когда после извержения она быстро остывает, возникает связанная структура горной породы. Если же процесс остывания замедляется, то в результате усадки появляются базальтовые столбчатые кристаллы, как правило, шестигранные.

Диабаз причисляется к так называемым магматическим породам и возник в результате преобразования базальтовой лавы, длившегося 500 млн. лет. Диабазы имеют довольно высокую плотность, обусловленную его средней зернистостью. Благодаря вкраплениям полевого шпата он иногда имеет порфировую структуру. Прочность диабазы на сжатие примерно такая же, как базальта, или несколько ниже.

Гранулиты — это видоизмененные горные породы, минералогический состав которых был коренным образом преобразован в результате сжатия и высоких температур. Гранулит обычно серый или реже красноватый. Он содержит преимущественно полевой шпат и кварц. Если доля полевого шпата преобладает, такой гранулит непригоден для использования в качестве балласта верхнего строения пути.

Другие твердые горные породы. Массивы ультрамафических пород, встречающиеся в некоторых местах, например в верхнем течении Мура (Австрия), разлагаются на более или менее сильно серпентинизированные дуниты, периододиты и бронзиты. Эти материалы характеризуются высокой твердостью, вязкостью, шероховатостью и износостойкостью.

Известняк — это биогенная органическая осадочная порода, состоящая в основном из углекислой извести (карбоната кальция CaCO_3 , зачастую с глинистыми и песчаными фракциями) и доломита $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$. Если преобладают доломитные фракции, тогда минерал назы-

Значения коэффициента LA для наиболее распространенных видов щебеночного балласта

Гранит	12 – 15
Базальт	8,7 – 9,5
Диабаз	9,5 – 10,5
Известняк	13,7 – 23

вают доломитом. Известняк быстрее выветривается, обладает значительно меньшей прочностью на сжатие и более низкой износостойкостью, чем рассмотренные ранее твердые горные породы.

Камень для изготовления щебня обычно добывают открытым способом в карьерах. При выемке горной породы следует обращать особое внимание на то, чтобы она добывалась из таких зон, где отсутствуют примеси и признаки выветривания.

Требования к щебеночному балласту

Свойства материала. Щебень должен быть устойчив к выветриванию (испытание варкой в солевом растворе). Поглощение воды не должно превышать 0,5% массы. Если данное значение превышено, необходимо проверить устойчивость к циклическим замерзаниям/оттаиваниям, провести испытание на кристаллизацию и оценить подверженность выветриванию.

Щебень должен иметь постоянный объем. Если при поставке ба-

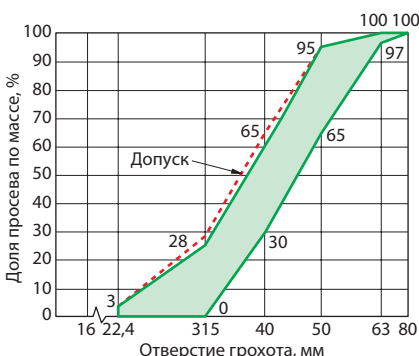


Рис. 1. Характеристика грохочения и допуски для поставляемого щебня фракции 31,5/63

зальта возникнет подозрение в том, что это материал, подвергавшийся постоянному воздействию солнечного излучения, необходимо провести петрографическое исследование (состава кристаллов и пр.).

Щебеночный балласт должен обладать высокой степенью прочности на сжатие и удар. На сети железных дорог Австрии (ÖBB) определение прочности осуществляется в соответствии со стандартом ÖNORM B 3127.

Частицы щебня должны быть устойчивыми к дроблению и истиранию. Определение соответствующих параметров выполняется по методу Лос-Анджелес (коэффициент LA) стандарта EN 13450. Суть метода заключается в следующем: образец (щебень) массой 10 кг (5 кг фракции 31,5/40 и 5 кг фракции 40/50) вращают в барабане вместе с 12 стальными шарами общей массой 5210 ± 90 г со скоростью 31–33 об/мин. По окончании испытания содержимое барабана просеивают через сито с ячейкой 1,6 мм и по массе просеявшегося материала вычисляют коэффициент LA:

$$LA = (10000 - m) / 100,$$

где m — масса просева.

Качество щебня тем выше, чем ниже коэффициент LA.

Гранулометрические свойства щебеночного балласта. Гранулометрический состав щебня должен соответствовать требованиям предприятия инфраструктуры, выступающего в роли заказчика. Этот состав устанавливается путем грохочения через сита с квадратными отверстиями. Размер частиц поставляемого щебня обозначается по основной доле фракций, полученной после двукратного грохочения. Так, на ÖBB щебень фракций 31,5/63 используется на главных путях (щебень I) и фракций 16/31,5 — на боковых станционных путях (щебень II).

На рис. 1 показаны характеристика грохочения и допуски для поставляемого щебня фракции 31,5/63.

Для поставляемого щебня фракций 31,5/63 имеем:

- доля фракций менее 22,4 мм — до 3% общей массы при взятии пробы на заводе и до 5% массы — при взятии пробы на месте укладки;
- доля фракций менее 0,5 мм — до 1% общей массы при сухом грохочении.

Наличие в пробе более 6% частиц длиной более 100 мм не допускается.

Что касается формы частиц балласта, то она должна быть неправильной с острыми краями.

Доля частиц с соотношением l/d (длина/толщина) более 3:1 должна составлять 5–30% общей массы. Проверке подвергаются группы гравия грануляций от 31,5/50 до 16/31,5.

Щебень, предназначенный для балластировки верхнего строения пути, должен быть чистым, без посторонних включений (органических, мергелистых или глинистых). Доля в очищенном от загрязнений щебне фракций размером менее 0,063 мм не должна превышать 1% общей массы. Чтобы обеспечить наивысшую степень чистоты от примесей, необходимо промывать щебень на заводе.

Балластная призма

Чистое, упругое и однородное щебеночное основание верхнего строения пути является важным условием бесперебойного функционирования системы колесо — рельс. Щебеночное основание оказывает большое влияние на срок службы и геометрию пути, а значит, на эффективность текущего содержания верхнего строения пути.

Балластная призма должна выполнять следующие задачи:

- максимально равномерно распределять давление, передаваемое от колес на шпалы и нижнее строение пути;
- обеспечивать упругость пути с целью минимизации динамических нагрузок;

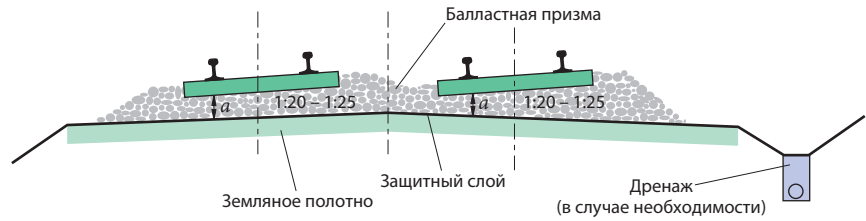


Рис. 2. Балластная призма двухпутного участка в кривой с возвышением наружного рельса

• гарантировать фиксированное и устойчивое положение шпал, т.е. высокую степень сопротивления их продольному и поперечному сдвигу;

• иметь хорошую водо- и воздухопроницаемость с целью обеспечения продолжительного срока службы шпал и сохранения несущей способности нижнего строения пути.

Данные задачи выполняются в случае правильного выбора толщины и поперечного сечения призмы, качества щебня и степени его уплотнения.

Для обеспечения наиболее благоприятных условий передачи эксплуатационных нагрузок нижнему строению пути необходимо стремиться к наибольшей толщине балластного слоя (рис. 2).

Толщина балластного слоя должна быть такой, чтобы линии распределения давления соседних шпал пересекалась над поверхностью защитного слоя земляного полотна, в противном случае зоны нижнего строения пути, заключен-

ные между шпалами, будут подвергаться слишком высоким нагрузкам (рис. 3).

Толщина балластного слоя зависит от расстояния между шпалами, ширины шпал и угла распределения давления.

При обычной для Европы осевой нагрузке, равной 220 кН, расстоянии между шпалами 60 см и ширине шпалы 26 см толщина балластного слоя должна быть как минимум 30 см. Для высокоскоростных участков она должна быть увеличена до 40 см.

Ширина балластной призмы влияет на сопротивление сдвигу шпал по их продольной оси. Сопротивление сдвигу тем сильнее, чем больше щебня имеется перед торцом шпалы. В среднем ширина балластного слоя между краем призмы и торцами шпал должна составлять 45 см (см. рис. 2).

Нагруженный балластный слой в основном состоит из гранул исходной формы, т.е. той, которую

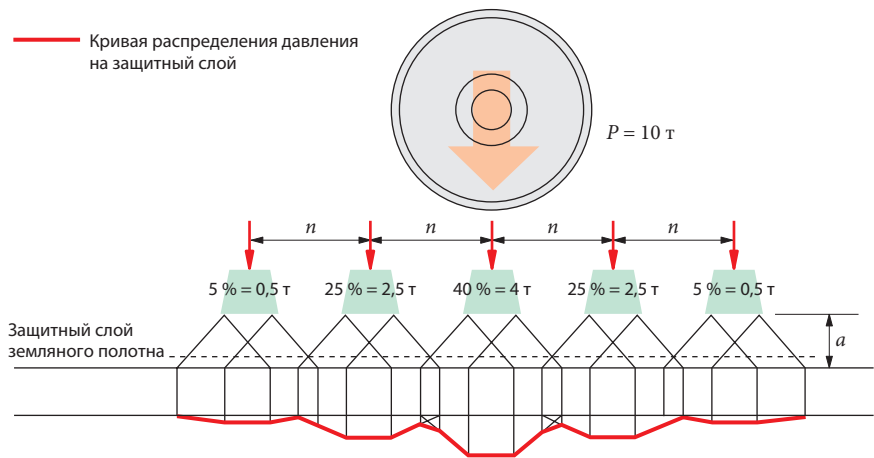


Рис. 3. Распределение давления под воздействием сосредоточенной нагрузки, равной 10 т

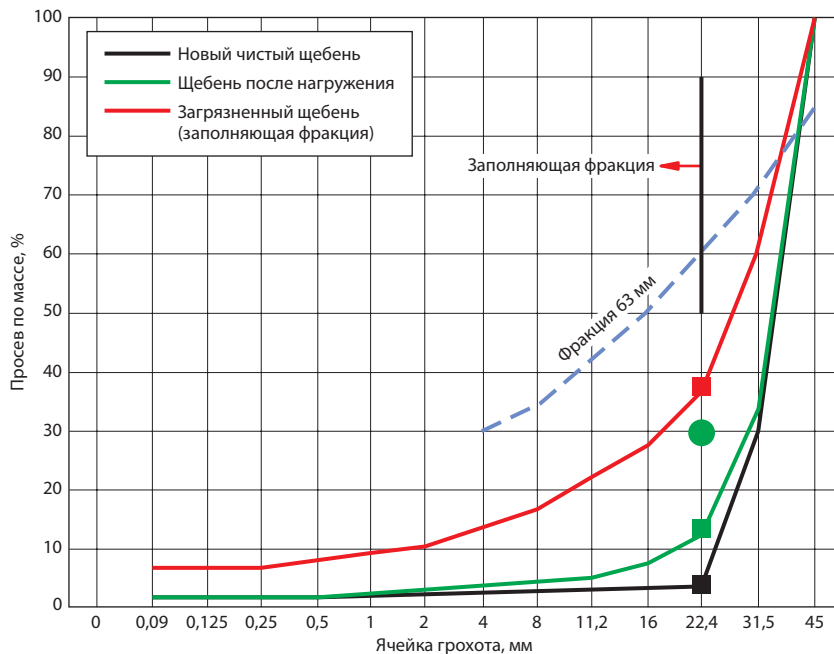


Рис. 4. Типичные характеристики грохочения

они имели при поставке щебня и последующей отсыпке, частично из более мелких зерен, разделяющих основные частицы, и совсем мелких. Согласно принятой здесь терминологии, первые основные частицы называются скелетообразующими, вторые — дистанцирующими и третьи — заполняющими.

Новый балластный слой состоит почти полностью из основных, или скелетообразующих, частиц. В результате воздействия эксплуатационных нагрузок на грани этих частиц передаются значительные усилия. Катящееся по рельсу колесо,

находясь на некотором расстоянии перед шпалой, вызывает ее небольшой подъем, сменяющийся при перекатывании колеса резким опусканием в щебень. Это обуславливает образование многочисленных сколов щебня в местах контакта.

Дистанцирующие фракции, образованные в результате этих сколов, повышают сопротивление шпал сдвигу. Но с течением времени доля таких частиц возрастает, дополнительно образуются мелкие заполняющие фракции, которые в результате множественных циклов нагружения обволакива-

ют основные скелетообразующие частицы щебня. Вследствие этого внутренний угол трения материала становится меньше, снижается сопротивление сдвигу, а значит, и несущая способность балласта. Заполняющие фракции, состоящие из суглинков и глины, могут также проникать в балластную призму из защитного слоя земляного полотна. На рис. 4 приведены типичные характеристики грохочения щебня после эксплуатационных нагрузок.

Нагрузка на балласт

В процессе эксплуатации балластный слой подвергается квазистатическим и динамическим нагрузкам. Прежде всего — это вертикальные силы, создающие давление и напряжение в балластной призме, воспринимающей их. В связи с этим несущая система пути должна быть рассчитана таким образом, чтобы не могли возникнуть недопустимые упругие и пластические деформации. При этом следует обратить внимание на следующее: в связи с неравномерностью нагружения шпал в балластной постели неравномерное уплотнение щебня и нижнего строения пути, а также неравномерность распределения нагрузок в области контакта колесо — рельс обуславливают большой разброс значений нагружений и деформации верхнего строения пути. В зависимости от технического состояния пути, подвижного состава, а также скорости последнего разброс значений указанных параметров может находиться в диапазоне 10–30%.

Вертикальные силы

Балластная призма и нижнее строение пути воспринимают вертикальные нагрузки следующих видов:

- колесная нагрузка;

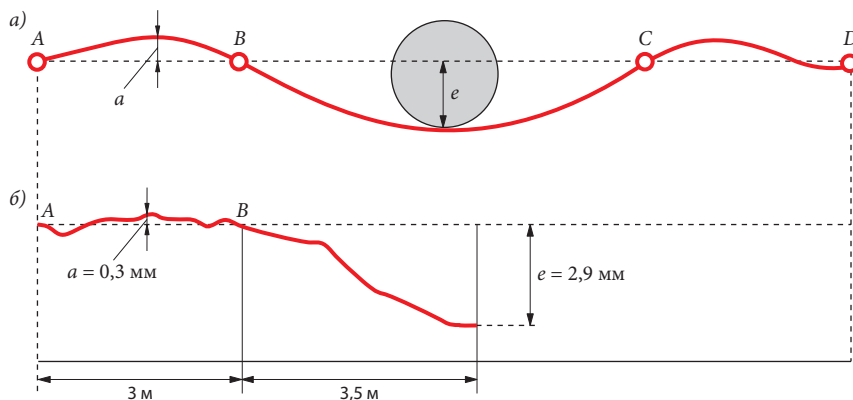


Рис. 5. Теоретическая (а) и реальная (б) линии прогиба рельса под действием колеса

Таблица 1

Ориентировочные значения коэффициента балластной постели C_b

Качество балластного слоя, земляного полотна и грунта основания	Значения коэффициента C_b
Очень плохое (мягкая глина, грунт с органическими включениями, песок одинаковой зернистости)	< 50
Плохое (полужесткая глина, рыхлый песок)	≥ 50
Хорошее (глинистый или песчаный гравий)	≥ 100
Очень хорошее (гравийный песок, защитный слой земляного полотна)	≥ 150
Бетонное основание (мосты, тоннели, путь на жестком основании)	≥ 300

- удары, действующие вертикально вниз;

- силы, действующие вертикально вверх.

Нагрузки от колес для существующего подвижного состава в основном известны (например, для локомотива до 125 кН). Но в процессе качения нагрузки от колеса на рельс значительно изменяются. Эти изменения зависят от скорости, состояния пути и рессорного подвешивания экипажа. Удары, действующие вертикально вниз, возникают в местах стыковых зазоров, а также под действием колес с дефектом некруглости.

Поскольку рельсы являются опорой для многих упругих элементов, действие вертикальных сил вызывает реакции, направленные вверх. Данные реакции воздействуют на рельсовые скрепления.

На рис. 5 приведено сравнение кривых теоретического прогиба (a) и реальной деформации рельса (b), построенных по результатам измерений, выполненных железными дорогами Германии (DB).

Степень деформации зависит от нагрузки колеса на рельс, жесткости рельсов и шпал, расстояния между шпалами, упругости балластного слоя и нижнего строения пути.

Для расчета верхнего строения пути берут рельс, который рассматривают как длинную балку на сплошной упругой опоре с коэффициентом балластной постели C_b (Н/см³). Этот коэффициент учитывает упругость балласта и нижнего строения пути:

$$C_b = p/y,$$

где p — давление на балластное основание, Н/см²; y — упругий прогиб рельса, см.

Таким образом, при большом значении коэффициента, например в случае пути на жестком основании, прогиб рельса незначителен, а давление на балласт высокое. С помощью коэффициента C_b описывается деформация пути.

При малом коэффициенте балластной постели, например на мягкой глине, просадка рельса большая, а давление на балластный слой невелико.

Ориентировочные значения коэффициента C_b в зависимости от качества балластной призмы, земляного полотна и грунта основания приведены в табл. 1.

Под влиянием эксплуатационной нагрузки на краях отдельных частиц щебня возникают высокие силы давления, отчасти направленные под углом к поверхности контакта и нередко приводящие к откалыванию. Напряжения изгиба, появляющиеся прежде всего у плоских частиц щебня, приводят к изломам и, следовательно, к изменению гранулометрического состава. При этом место максимального нагружения находится на глубине, соответствующей половине ширины шпалы.

Давление на щебень под шпалой

Величину давления на щебень непосредственно под шпалой можно определить с помощью известного метода расчета Циммермана. Согласно его теории опорные площадки с подкладками обычных поперечно расположенных шпал преобразуются в равновеликие продольные шпалы (рис. 6, 7).

При этом получаем:

- для упругого прогиба

$$y = Q\Omega\eta / (2bC_bL), \text{ см;}$$

- для давления на щебень под шпалой

$$p = Q\Omega\eta = C_b y, \text{ Н/см}^2;$$

- для силы в точке опирания

$$S = bC_b a y, \text{ кН,}$$

где Q — действующая нагрузка от колеса, представляющая собой сумму статической колесной нагрузки и статического приращения

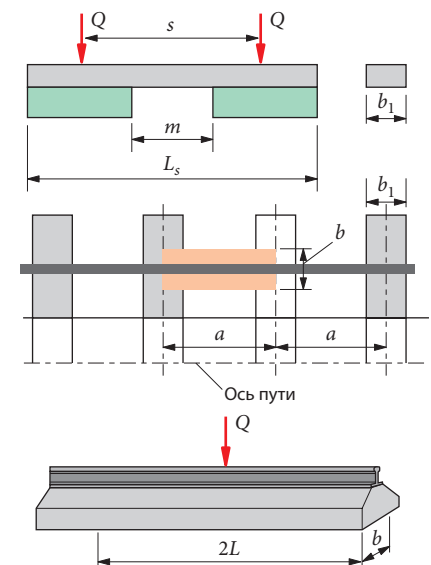


Рис. 6. Преобразование конструкции верхнего строения пути на обычных шпалах в конструкцию с продольными шпалами: Q — нагрузка от колеса, Н; s — ширина колеи, см; L_s — общая длина шпалы, см; m — длина шпалы без опорных частей, см; a — шаг укладки шпал, см; b_1 — ширина шпалы, см; b — ширина продольной шпалы, см ($b = F/2a$); $F = (L_s - m) b_1$; L — фиктивная длина продольной шпалы, см ($L^2 = 4EI/bC$); E — модуль упругости, Н/см²; I — момент инерции рельса, см⁴; C — коэффициент балластной постели, Н/см³

Таблица 2

Коэффициенты влияния Циммермана

ξ	η	μ	ξ	η	ξ	η	μ
0	1	1	2,2	0,0244	4,4	-0,01546	0,00791
0,1	0,9907	0,81	2,3	0,008	4,5	-0,0132	0,00852
0,2	0,9651	0,6398	2,4	-0,0056	4,6	-0,01112	0,00886
0,3	0,9267	0,4888	2,5	-0,0166	4,7	-0,00921	0,00891
0,4	0,8784	0,3564	2,6	-0,0254	4,8	-0,00748	0,00892
0,5	0,8231	0,2415	2,7	-0,032	4,9	-0,00593	0,0087
0,6	0,7628	0,1431	2,8	-0,0369	5	-0,00455	0,00837
0,7	0,6997	0,0599	2,9	-0,0403	5,1	-0,00334	0,00795
0,8	0,6354	-0,0093	3	-0,04226	5,2	-0,00229	0,00746
0,9	0,5712	-0,0657	3,1	-0,04314	5,3	-0,00139	0,00692
1	0,5083	-0,1108	3,2	-0,04307	5,4	-0,00063	0,00636
1,1	0,4476	-0,1457	3,3	-0,04224	5,5	0,00001	0,00578
1,2	0,3899	-0,1716	3,4	-0,04079	5,6	0,00053	0,0052
1,3	0,3355	-0,1897	3,5	-0,03887	5,7	0,00096	0,00464
1,4	0,2849	-0,2011	3,6	-0,03659	5,8	0,00127	0,00409
1,5	0,2384	-0,2086	3,7	-0,03407	5,9	0,00152	0,00356
1,6	0,1959	-0,2077	3,8	-0,03138	6	0,00169	0,00307
1,7	0,1576	-0,2047	3,9	-0,02862	6,1	0,0018	0,00261
1,8	0,1234	-0,1985	4	-0,02583	6,2	0,00185	0,00219
1,9	0,0932	-0,1899	4,1	-0,02309	6,3	0,00187	0,00181
2	0,0667	-0,1794	4,2	-0,02042	6,4	0,00184	0,00146
2,1	0,0439	-0,1675	4,3	-0,01787	6,5	0,00179	0,00115

от смещения точки приложения ($Q = Q_{stat} + \Delta Q_{stat}$). При этом приращение от смещения нагрузки в зависимости от радиуса кривой, возвышения рельса и высоты расположения центра тяжести единицы подвижного состава при движении в кривой составляет 10–30%; b – ширина продольной шпалы, см; C_b – коэффициент балластной постели; a – расстояние между шпалами, см.

Чтобы учесть влияние нескольких осей единицы подвижного состава, например локомотива, ис-

пользуют величину η (коэффициент влияния Циммермана), приведенную в табл. 2.

Для сосредоточенной нагрузки в середине шпалы коэффициент $\eta = 1$. При этом с учетом состояния верхнего строения пути и скорости движения прогиб рельса равен

$$y = Q/2bCL = 1 + 3s_a\phi,$$

где s_a – коэффициент, учитывающий состояние верхнего строения пути; ϕ – коэффициент, учитывающий влияние скорости движения v .

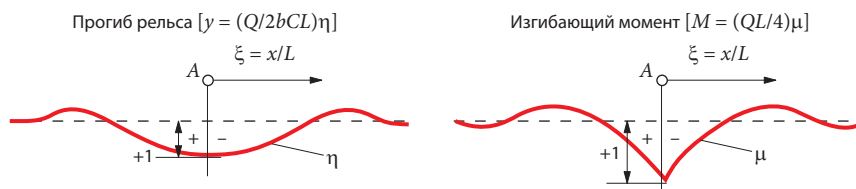


Рис. 7. Коэффициенты Циммерманна для прогиба рельса и изгибающего момента: А – точка приложения нагрузки; x – продольная координата; L – фиктивная длина шпалы; η – коэффициент, влияющий на величину прогиба рельса; μ – коэффициент, влияющий на величину изгибающего момента

Коэффициент s_a будет равен 0,1 при очень хорошем состоянии верхнего строения пути, 0,2 при хорошем состоянии и 0,3 при плохом.

Коэффициент $\phi = 1$ при скорости $v \leq 60$ км/ч. При 60 км/ч $< v \leq 300$ км/ч (для пассажирских поездов) он определяется из выражения

$$\phi = 1 + 0,5 [(v - 60)/190];$$

при 60 км/ч $< v \leq 140$ км/ч (для пассажирских поездов)

$$\phi = 1 + 0,5[(v - 60)/80].$$

Приведем пример расчета давления на щебень под сосредоточенной нагрузкой.

Исходные данные: статическая нагрузка от колеса подвижного состава $Q_{stat} = 100$ кН; приращение нагрузки (20%) за счет ее смещения $\Delta Q_{stat} = 0,2Q_{stat}$; реальная нагрузка от колеса $Q = 1,2Q_{stat} = 120$ кН; скорость $v_{max} = 140$ км/ч; рельсы МСЖД 60, бесстыковой путь из сварных плетей; модуль Юнга материала рельсов $E = 21 \cdot 10^6$ Н/см²; момент инерции сечения рельсов $I = 3055$ см⁴; шпалы типа В70 с активной поверхностью опирания $F = 5930$ см²; расстояние между шпалами $a = 60$ см; коэффициент балластного основания при хорошем качестве нижнего строения пути $C_b = 100$ Н/см³; $s_a = 0,2$ (хорошее состояние верхнего строения пути); допустимое давление на балласт $p_{zul} = 30$ Н/см².

Расчет. При $C_b = 100$ Н/см³ прогиб рельса $y = 0,271$ см, давление на балласт $p = 27,1$ Н/см² $< p_{zul}$, реакция опоры $S = 80,5$ кН.

При $C_b = 50$ Н/см³ прогиб рельса $y = 0,444$ см, давление на балласт $p = 22,2$ Н/см² $< p_{zul}$, реакция опоры $S = 69,9$ кН.

При $C_b = 250$ Н/см³ прогиб рельса $y = 0,162$ см, давление на балласт $p = 40,51$ Н/см² $> p_{zul}$, реакция опоры $S = 120,3$ кН.

Анализ результатов расчета показывает, что при низком коэффициенте балластного основания:

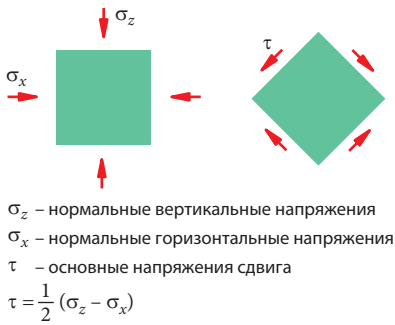


Рис. 8. Напряжения в балластной призме и нижнем строении пути

- увеличен прогиб y , в результате чего нагрузка на рельс увеличена;
 - понижены значения давления на балласт p и реакции опоры S .
- При высоком коэффициенте балластного основания:
- повышены значения давления на балласт p и реакции опоры S , т. е. нагрузка на балласт увеличена;
 - нижнее строение пути недостаточно упругое.

Высоким нагрузкам на щебень могут противодействовать установка упругих прокладок между рельсом и шпалой, нанесение упругих покрытий на подошву шпалы, укладка подбалластных матов.

Общие напряжения в балластной призме и нижнем строении пути

В балластной призме и нижнем строении пути, помимо нормальных вертикальных и горизонтальных напряжений σ_z и σ_x , также возникают касательные напряжения τ (рис. 8).

Характеристику нормальных напряжений в вертикальном σ_z и горизонтальном σ_x направлениях, а также основные касательные напряжения, действующие под углом 45° , может проиллюстрировать рис. 9, где ось нагружения определяется давлением на балласт под шпалой. Место максимального касательного напряжения находится при этом на глубине, равной примерно половине ширины шпалы.

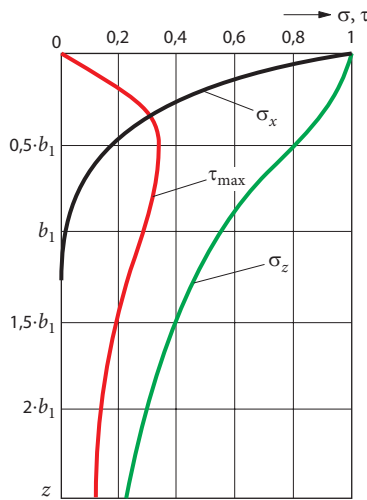
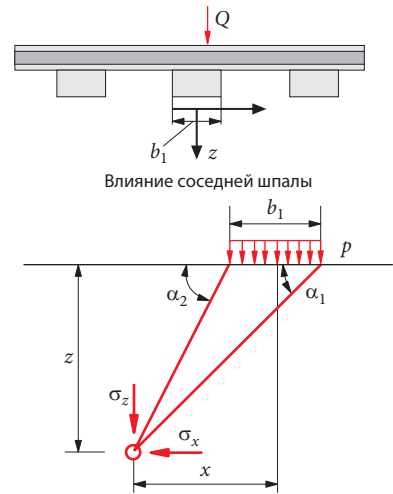


Рис. 9. Нормальные и касательные напряжения по оси нагружения: x, z — координаты; Q — нагрузка от колеса; b_1 — ширина шпалы



Расчет давления на грунт

Если известны давление на балласт, толщина слоя и модуль упругости балласта E_1 , модули защитного слоя E_2 и земляного полотна E_3 , можно рассчитать давление на грунт. С этой целью можно использовать разработанный итеративный способ для многослойной системы (рис. 10). Эту несущую систему пересчитывают в так называемое эквивалентное полупространство, принимая для эквивалентного пространства значения толщины слоев:

$$h_{11} = 0,9h_1(E_1/E_3)^{1/3};$$

$$h_{22} = 0,9h_2(E_2/E_3)^{1/3}.$$

Рассмотрим пример расчета.

Исходные данные: балластный слой — $E_1 = 150 \text{ Н/мм}^2$, $h_1 = 300 \text{ мм}$; защитный слой земляного полотна — $E_2 = 100 \text{ Н/мм}^2$, $h_2 = 400 \text{ мм}$; нижнее строение пути — $E_3 = 50 \text{ Н/мм}^2$, $h_3 = 390 \div 544 \text{ мм}$.

Для расчета напряжений, вызываемых давлением на грунт под одной шпалой, получаем выражения

$$\sigma_z = - (2p/\pi) \{ \arctg[b_1/2z] + [2b_1z/(b_1^2 + (2z)^2)] \};$$

$$\sigma_x = - (2p/\pi) \{ \arctg[b_1/2x] + [2b_1x/(b_1^2 + (2x)^2)] \};$$

$$\tau_{\max} = (\sigma_z - \sigma_x)/2,$$

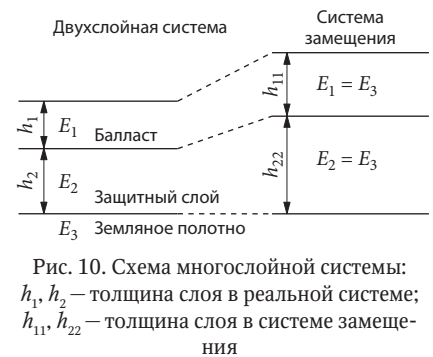


Рис. 10. Схема многослойной системы: h_1, h_2 — толщина слоя в реальной системе; h_{11}, h_{22} — толщина слоя в системе замещения

где p — давление на балласт под шпалой; b_1 — ширина шпалы; σ_z — нормальные вертикальные напряжения от давления на грунт; σ_x — нормальные горизонтальные напряжения от давления на грунт; τ_{\max} — максимальное значение касательных напряжений; z — вертикальная координата, соответствующая уровню подошвы шпалы; x — продольная координата.

С увеличением глубины усиливается влияние нагрузки от соседних шпал (см. рис. 3).

Сопротивление сдвигу — угол внутреннего трения

Прочность несущих слоев на сдвиг или срез можно исследовать в лаборатории с помощью специальной режущей установки. Образцы в такой установке одновремен-

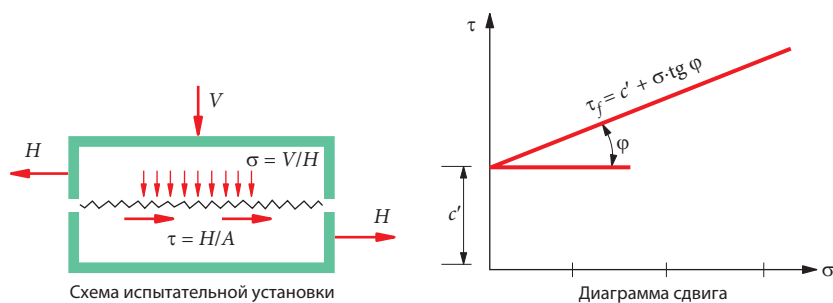


Рис. 11. Диаграмма сдвига с линиями разрушения Кулона:

V – вертикальная нагрузка; H – горизонтальная нагрузка; A – плоскость среза

но с действием вертикальной силы, вызывающей возникновение нормальных напряжений, нагружаются срезающей горизонтальной силой вплоть до излома частиц. В этом состоянии измеряют напряжения, возникающие при разрушении, и по этим значениям определяют величину срезающего усилия. На основании нескольких испытаний с возрастанием нормальных напряжений можно определить пару напряжений σ и τ . По ним строят так называемую диаграмму сдвига с линиями разрушения Кулона (рис. 11).

Уравнение для линий разрушения одновременно определяет сопротивление сдвигу:

$$\tau_f = c' + \sigma \operatorname{tg} \varphi,$$

где c' – сопротивление сил сцепления (когезия); σ – нормальные напряжения; φ – угол внутреннего трения (угол трения).

Несущая способность балластной призмы зависит прежде всего от сопротивления сдвигу. Угол внутреннего трения определяет на диаграмме сдвига увеличение сопротивления сдвигу. Величина это-

го сопротивления зависит в основном от различий в форме и величине частиц, степени сложности формы и шероховатости поверхности, а также от плотности щебня. Чем больше угол внутреннего трения, тем выше сопротивление сдвигу.

Из этого вытекает следующее: сопротивление сдвигу и устойчивость балластной призмы особенно высоки в том случае, если щебень соответствует требованиям к гранулометрическому составу, форме и шероховатости, указанным ранее. Неочищенный и влажный щебень приводит к снижению его сопротивляемости сдвигу.

Результаты испытаний, проведенных Техническим университетом Граца с загрязненным, очищенным, обработанным щебнем и обкатанным гравием, приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что характеристика сдвига загрязненного щебня такая же, как у обкатанного гравия. Очищенный щебень обладает значительно большей сопротивляемостью сдвигу. В результате округления граней частиц этот показатель несколько ниже, чем у нового щебня.

Таблица 2

Характеристика сцепления и угол внутреннего трения балласта различных видов

Вид балласта	Показатель сцепления, Н/см ²	Угол внутреннего трения, град	tgφ
Загрязненный щебень	5,2	57,7	1,58
Очищенный щебень	8,1	63,4	2
Обкатанный гравий	4,2	57,4	1,56
Новый щебень	9,2	65,2	2,16

Испытания, проведенные Техническим университетом Граца, показали, что характеристика сдвига щебня фракций 30/60 мм может быть увеличена, если к нему добавить щебень грануляции 15/30 мм. Оптимальная доля такой добавки – 15%.

Качество пути

В результате поездных нагрузок и других воздействий на железнодорожный путь с течением времени происходит загрязнение балластного слоя и его неравномерное оседание. Степень загрязнения характеризует качество пути и определяет сроки проведения работ по текущему содержанию и ремонту, прежде всего исправлению положения пути с помощью механической подбивки шпал и при необходимости – по очистке балластного слоя.

Под качеством пути понимается состояние его конструкции. Для объективной оценки берут среднее отклонение от положения пути в плане в пределах определенной длины участка.

Кривые изменения качества пути (рис. 12) показывают, что после определенной нагрузки достигается предел качества, при котором требуется принятие мер по подбивке пути. Достижение этого предела характеризуется тем, что путь больше не обеспечивает необходимой плавности хода подвижного состава.

Из рис. 12 видно, что после подбивки шпал явно улучшается качество положения пути. С возобновлением эксплуатационных нагрузок отклонение в положении пути увеличивается, что отображается экспоненциальной кривой. Ухудшение происходит из-за откалывания материала на ребрах граней и перемещения частиц щебеночного балласта. Быстрое увеличение отклонения в положении пути в начальный период возобновившейся эксплуатации (от 0,5 млн. до 2 млн. т) приводит к значительному сниже-

нию качества пути. Далее качество пути ухудшается почти по линейному закону.

Степень возрастания отклонений в положении пути зависит большей частью от его начального качества. Чем оно выше, тем продолжительнее период между началом эксплуатации и моментом, когда достигается предел качества. Высокое начальное качество бывает в том случае, если конструкция пути отвечает последним техническим достижениям и для укладки пути и его текущего содержания применяются оптимальные технологии.

Осадка балласта под действием эксплуатационных нагрузок

На качество пути влияет прежде всего осадка балластного слоя. Как уже отмечалось, в результате воздействия вертикальных нагрузок от качения подвижного состава, особенно в начальный период эксплуатации пути, происходят значительные перемещения частиц щебня и их обкалывание, приводящие к относительно большой осадке балласта (рис. 13).

Поскольку щебень при подбивке укладывается более компактно, то воспринимаемые частицей щебня нагрузки распределяются между несколькими точками касания, благодаря чему осадка становится меньше.

Характер осадки зависит преимущественно от величины давления на балласт, которое, в свою очередь, зависит от жесткости рельсошпальной решетки и уровня динамической нагрузки от колеса. В общем случае осадка щебеночного балласта зависит от следующих факторов:

- эксплуатационной нагрузки;
- качества верхнего строения пути;
- загрязнения балластного слоя.

Эти факторы определяют также характеристику качества пути.

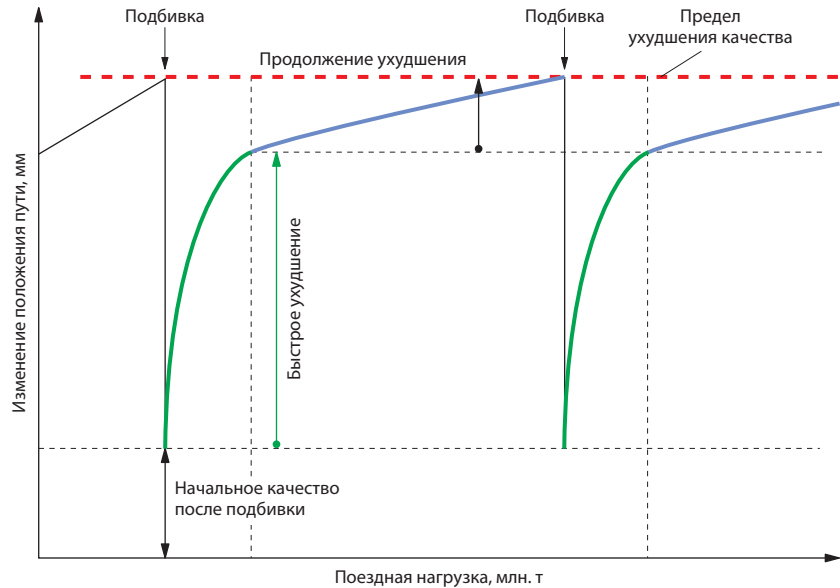


Рис. 12. Процесс изменения качества пути

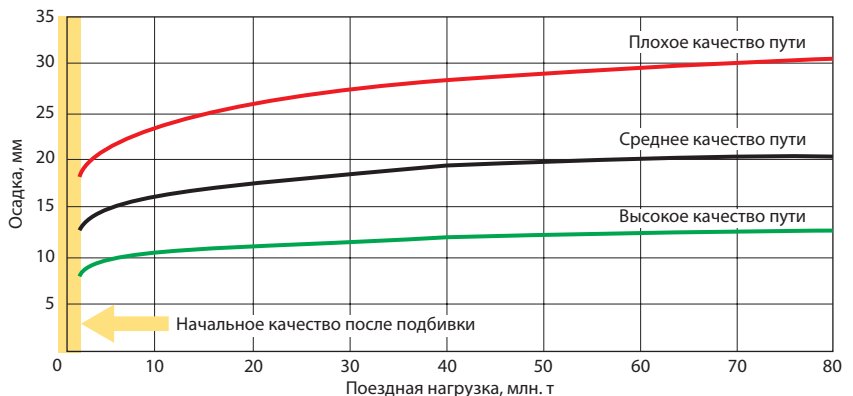


Рис. 13. Осадка балласта под воздействием эксплуатационной нагрузки для пути разного качества

Влияние эксплуатационной нагрузки определяется следующим:

- наработкой (млн. т/год);
- нагрузкой на ось (высокая осевая нагрузка является главной причиной сильной осадки, так как интервалы между подбивками сокращаются примерно на 30% при увеличении осевой нагрузки на 10%);
- скоростью движения (повышение скорости движения обуславливает рост динамической нагрузки от колес, в результате чего увеличивается давление на балластный слой).

Качество верхнего строения пути зависит от:

- конструкции — типа рельсов, материала шпал (деревянные или бетонные), рельсовых скреплений;
- балластного материала;
- толщины балластного слоя;
- типа земляного полотна;
- наличия защитного слоя земляного полотна.

Фактор загрязнения балласта означает, что по мере увеличения загрязнения ускоряется процесс осадки. Отклонения положения пути в плане и профиле увеличиваются, и это требует подбивки шпал через более короткие интервалы времени.

Уровень начальной осадки можно уменьшить посредством приме-

ЩЕБЕНОЧНЫЙ БАЛЛАСТ

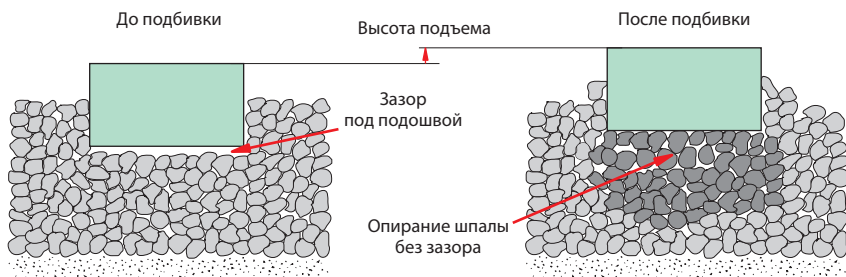


Рис. 14. Воздействие на балласт процесса подбивки

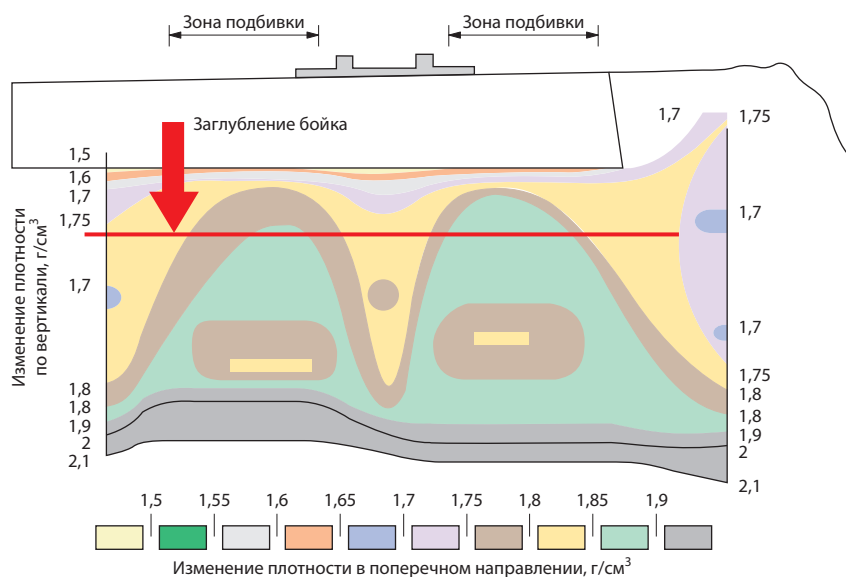


Рис. 15. Уплотнение балласта при подбивке

нения целенаправленной, контролируемой осадки, осуществляемой с помощью динамического стабилизатора пути (DGS). Благодаря его использованию непосредственно после подбивки шпал частицы щебеночного балласта смещаются без повреждения граней и создают таким образом однородный балластный слой. Тем не менее последующие осадки от воздействия эксплуатационных нагрузок достаточно значительны. Это объясняется случайным характером распределения частиц щебня под шпалами (под разными шпалами сумма площадей соприкосновения частиц щебня с подошвой различна).

В связи с неравномерностью осадки в продольном направлении возникают волны пути длиной от 3 до 25 м. В поперечном направлении относительно оси пути осадка в зо-

не укладки шпал также неравномерна, что приводит к возвышению одного рельса над другим и, следовательно, к дефектам пути в профиле. Как только такие дефекты достигают заданного предела, требуется проведение подбивочных работ.

Подбивка шпал

При машинной подбивке частицы щебеночного балласта уплотняются под шпалами в горизонтальном направлении. В результате этого фиксируется исправленное положение пути по своей высоте. Смещение щебня предотвращается прежде всего силами трения. Горизонтально направленная сила действия при подбивке шпал вызывает взаимные смещения частиц щебня.

Поскольку при каждой подбивке путь поднимается (выправка поло-

жения пути в профиле), под шпалами образуется пустое пространство (рис. 14). Благодаря применению асинхронного принципа подбивки шпал с постоянным давлением шпалоподбивочных агрегатов компании Plasser & Theurer, движущихся по прямой линии с частотой подбивки 35 Гц, все пустоты под шпалами заполняются, и щебень под ними уплотняется. В ходе процесса подбивки происходит лишь перемещение частиц щебня при незначительном скалывании, степень которого зависит от качества материала, из которого изготовлен щебень.

Исследование процесса образования мелких фракций при подбивке шпал (без учета воздействия эксплуатационных нагрузок) не дает исчерпывающих результатов, поскольку после каждой подбивки и последующей эксплуатационной нагрузки изменяется структура балласта.

При подбивке под каждой шпалой образуется от 1,8 до 3,9 кг частиц мелких фракций. Балластный слой отсыпается из расчета 1050 кг щебня на одну шпалу. Под действием эксплуатационных нагрузок возникает гораздо больше сколов. Максимальная доля мелких фракций находится в зоне балластного слоя, в которой происходит распределение давления, передаваемого от шпалы на балласт.

Распределение давления под шпалами и загрязнение балласта мелкими фракциями

На рис. 15 показано, что в результате подбивки образуется подшпальное основание заданного качества. В зоне заглубления пика шпалоподбивки создается самое высокое уплотнение балласта. От торцов шпалы к оси пути плотность его уменьшается. В то же время можно видеть, что уплотнение увеличивается сверху вниз в соответствии с распределением давления от поездной нагрузки.

В новом балласте доля допустимых мелких фракций составляет, как правило, 3–5% общей массы. Увеличение их доли приводит к ухудшению качества балласта.

Содержащаяся в старом балласте доля мелких фракций определяет эксплуатационный показатель щебня и рассматривается как загрязнение, если ее процентное содержание больше допустимого уровня, определяемого техническими условиями поставки. Мелкой считается фракция, которая проходит через квадратное отверстие сита размером 22,4 мм. Если доля мелких фракций больше нормы, то ухудшается водопроницаемость балласта, в результате чего тенденция к дальнейшему загрязнению возрастает.

Причины загрязнения

Причины загрязнения балластного слоя могут быть следующими:

- недоброкачественный новый щебень;
- эксплуатационные нагрузки;
- перегрузка нижнего строения пути из-за недостаточной толщины балластного слоя;
- размягчение под действием влаги земляного полотна в результате недостаточного поперечного уклона защитного слоя;
- отсутствие дренажа;
- увеличение доли мелких фракций вследствие перегрузки нижнего строения пути;
- попадание мелких фракций в балласт при перевозке грузов;
- осадение мелких фракций из воздуха;
- работы по текущему содержанию и ремонту пути.

Новый щебень. При взятии проб нового балласта, укладываемого в путь, исходят из нормы, допускающей содержание до 5% (по массе) мелких фракций щебня размером менее 22,4 мм.

Эксплуатационная нагрузка. После подбивки шпал в результа-

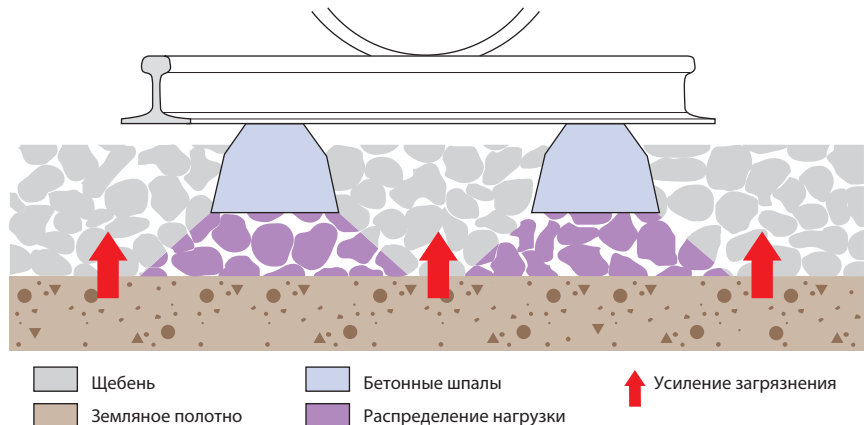


Рис. 16. Разрушение защитного слоя земляного полотна из-за неудовлетворительного распределения нагрузок, вызванного недостаточной толщиной балластного слоя

те воздействия статических и динамических нагрузок на путь происходит обкалывание и смещение частиц щебня, что приводит к осадке рельсошпальной решетки. Образовавшиеся в результате сколов мелкие фракции содержат определенное количество частиц размером менее 22,4 мм. С целью повышения сопротивляемости сдвигу рекомендуется для балласта использовать смесь, содержащую 15% щебня фракций 16/31,5 мм. Если же доля мелких фракций выше, происходит их осадение в балластный слой, в частности в зону распределения давления, передаваемого шпалой.

Большинство проводившихся исследований, учитывающих все факторы эксплуатационной нагрузки, касались в основном характера усадки и не давали объективной качественной оценки. Лишь в работах некоторых специалистов США рассматриваются различные виды загрязнения балласта. В частности, исследована роль мелких частиц размером менее 9,2 мм, которые составляют 76% общего объема загрязнений. В других исследованиях рассматривали поведение балласта на участках тяжеловесного движения с осевой нагрузкой до 39 т.

Перегрузка нижнего строения пути из-за малой толщины балластного слоя. Если толщина балластно-

го слоя слишком мала, происходит неблагоприятное распределение нагрузки на защитный слой земляного полотна. Он разрушается, и мелкие фракции попадают из него в балласт (рис. 16).

Размягчение защитного слоя из-за отсутствия поперечного уклона защитного слоя. Если у защитного слоя земляного полотна нет поперечного уклона, то под балластом образуются водяные мешки. Под нагрузкой от проходящих поездов создается эффект насоса, в результате чего материал защитного слоя попадает в балласт (рис. 17).

На поверхности балластной призмы скапливается грязь. Связанная с этим деформация балластного слоя и земляного полотна способствует дальнейшему увеличению водяных мешков. Эффект засасывания материала нижнего строения пути в балласт усиливается. В результате состояние пу-

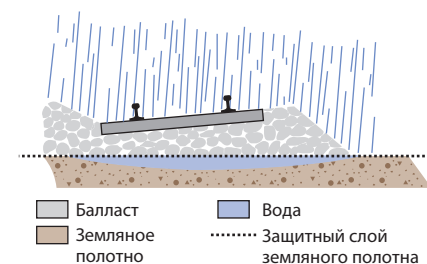


Рис. 17. Образование водяных мешков вследствие отсутствия поперечного уклона защитного слоя земляного полотна

ЩЕБЕНОЧНЫЙ БАЛЛАСТ

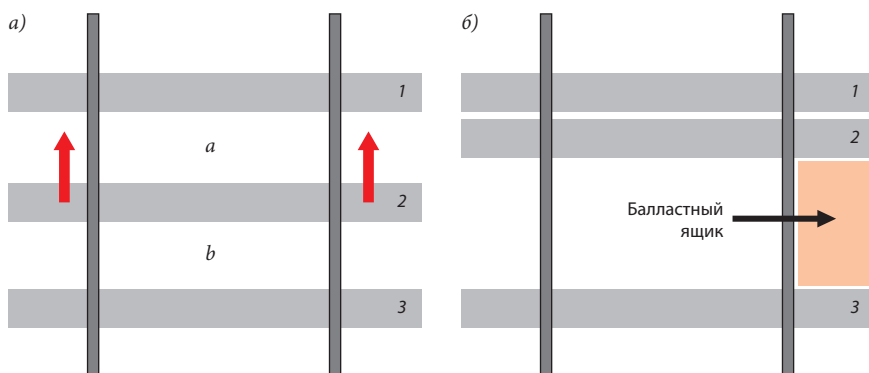


Рис. 18. Взятие пробы балластным ящиком

ти значительно ухудшается. В случае морозов возникает опасность пучинообразования.

Отсутствие дренажа. При отсутствии дренажа или водоотводящих желобов балласт насыщается водой, что значительно снижает его рабочие характеристики.

Увеличение доли мелких фракций в результате перегрузки нижнего строения пути. Перегрузка нижнего строения пути характерна прежде всего для земляного полотна из таких грунтов, как суглинок, глина. Пластические деформации его усиливаются при недостаточном дренировании. Происходит оседание нижнего строения, что приводит к потере устойчивости пути. Разбухший грунт проникает в балластный слой, и образуются полости, заполненные грязью и водой. При проходе поезда жидкая грязь выплескивается на поверхность балластной призмы.

В результате этого зимой возникает опасность образования пучин, в связи с чем для этих участков устанавливают ограничения скорости движения поездов. Подбивка пути в таких местах дает кратковременный эффект. Положительный результат достигается лишь устройством надежного дренажа и усилением защитного слоя земляного полотна.

Мелкие фракции от перевозимых грузов. В зависимости от местных условий и состояния вагонного парка, используемого при перевозках минерального сырья или угля, в течение года возможно высыпание на путь через неплотности вагонов до $3,6 \text{ кг/м}^2$ ($10,6 \text{ кг}$ на одну шпалу) загрязнителя.

Мелкие фракции, осаждаемые из воздуха. В ходе эксплуатации пути из воздуха осаждаются загрязнения очень мелких фракций в виде песка и частичек пыли, количество которых оценивается в $0,8 \text{ кг/м}^2$ ($2,4 \text{ кг}$ на одну шпалу) в год.

Работы по текущему содержанию и ремонту пути. При подбивке шпал в результате истирания образуется примерно $1,8\text{--}3,9 \text{ кг}$ мелких фракций на одну шпалу. Это составляет $0,17\text{--}0,37\%$ объема щебня, приходящегося на одну шпалу.

После обработки балластного слоя щебнеочистительными машинами доля мелких фракций составляет около $2,8\%$, что даже меньше допустимой доли, установленной для нового щебня.

Последствия загрязнения балластного слоя и оценка степени загрязнения

Как только балластный слой загрязнится, возникает неблагоприятное распределение давления на земляное полотно. Загрязнение дополнительно усиливается в этом случае за счет увеличения доли мелких фракций, поступающих из земляного полотна.

В загрязненном щебне внутреннее трение в значительной степени уменьшается. Указанные ранее условия, необходимые для нормальной работы балластного слоя, не выполняются. Происходит неравномерная осадка рельсошпальной решетки. Восстановление положения пути за счет подбивки в этом случае неэффективно. Состояние пути быстро ухудшается, нижнее строение подвергается еще большим нагрузкам. Это происходит до тех пор, пока суглинок и глина не достигнут поверхности балластного слоя. В местах проседания пути создаются условия, которые могут привести к сходу поезда с рельсов.

Оценка степени загрязнения измерительными методами. Необходимость в очистке балластного слоя определяется по показаниям самописца измерительного поезда. Вследствие загрязнения балластного слоя пути возникают коротковолновые дефекты пути в профиле.

Оседание нагруженной оси измеряется относительно соседних осей. Если балластный слой сильно загрязнен, то по данному параметру, а также по результату измерения перекаса рельсов делается вывод о значительном загрязнении балласта.

Измерительный поезд компании Plasser & Theurer, оборудованный аналитической системой ADA II, может оценивать результаты измерений в цифровом виде и указывать на необходимость проведения работ по очистке балласта.

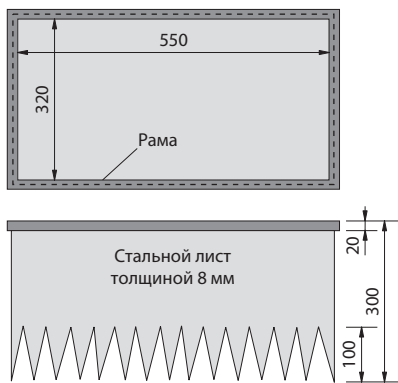


Рис. 19. Балластный ящик

Загрязнение балластного слоя можно также диагностировать с помощью установки Georadar.

Непосредственная оценка. Визуальный осмотр дает лишь приблизительный результат. Непосредственная оценка состояния балластного слоя допустима в настоящее время лишь на основе взятия проб и просеивания материала. Если пробы брать вручную, то для этого следует использовать специальный балластный ящик.

Для взятия пробы (рис. 18, а, б) удаляют балласт из двух шпальных ящиков (а и б) до уровня подошвы шпалы, после чего среднюю шпалу сдвигают, как показано на рис. 18, б.

Для взятия пробы балластный ящик, состоящий из рамы и боковых стенок из стального листа с зубчатыми краями (рис. 19), устанавливают зубьями вниз в простран-

стве возле рельса, освободившемся после сдвигания шпалы. После этого, ударяя по раме кувалдой, несколько заглубляют ящик в балласт. Затем из ящика берут первую пробу для проверки качества балластного слоя.

Далее ящик еще глубже погружают в балласт и снова берут пробу. Это повторяют до тех пор, пока не будет выбран щебень по всей толщине балластного слоя. При этом необходимо следить за тем, чтобы защитный слой земляного полотна остался неповрежденным и чтобы в пробу не попал материал защитного слоя.

Преимущество метода балластного ящика заключается в том, что благодаря сдвиганию шпалы проба берется из наиболее важной зоны, расположенной под шпалой и подвергающейся самым высоким нагрузкам. Возможность взятия проб

по всей толщине балластного слоя позволяет гарантировать точность результатов проверки.

Необходимость очистки балластного слоя

Очистку балласта следует проводить при условии, что подбивка не улучшает качества пути. В связи с этим и в соответствии с рекомендациями института железнодорожного транспорта ERRI щебеночный балласт нужно очищать в том случае, если средний результат проб на загрязнение, полученный с помощью просева через сито с квадратными отверстиями размером 22,4 мм, показывает, что масса загрязнителя составляет $\geq 30\%$ общей массы пробы.

E. Klotzinger. Eisenbahntechnische Rundschau, 2008, № 1/2, S. 34–41, № 3, S. 120–125.



**Журнал «Железные дороги мира»
и издательство «Интекст»**



ПОИСК И ОБОБЩЕНИЕ ИНФОРМАЦИИ

**о зарубежных рынках и инновациях
в области магистрального и промышленного
железнодорожного, а также городского рельсового транспорта**

**для компаний,
выходящих на внешний рынок,
заинтересованных в инновационных решениях,
ищущих поставщиков комплектующих.**

**Обзоры техники для железнодорожного
и городского рельсового транспорта**

Статистическая информация

**Подборки статей и других материалов
по железнодорожной тематике**

**Заинтересованные организации просим обращаться в редакцию журнала «Железные дороги мира»
по телефону (499) 317-55-65 и электронной почте zdm@css-rzd.ru**