

Прочностные и деформационные характеристики балласта в процессе абразивного износа его частиц

Для выяснения прочностных и деформационных свойств балласта в процессе абразивного износа было проведено несколько серий испытаний по оценке формы подвергшихся истиранию частиц балласта с трехосным нагружением на специальной установке и с циклическим нагружением на крупномасштабной модели пути. По результатам этих испытаний изучена степень абразивного износа частиц балласта, их форма, прочностные и деформационные свойства, а также осадка под воздействием циклических нагрузок от подвижного состава. Установлено, что рассматриваемый метод оценки формы частиц балласта с использованием нормализованной аргументной функции весьма эффективен для определения степени их износа.

Железнодорожный балласт, представляющий собой сортированный дробленый щебень, используется в верхнем строении пути для обеспечения его высокой прочности, жесткости, ремонтпригодности и других технико-эксплуатационных характеристик. Однако в пути возникают неравномерные осадки, вызываемые перемещением или разрушением (истиранием, дроблением и др.) частиц балласта под влиянием циклических нагрузок от подвижного состава. Когда частицы балласта разрушены, предпринимаются работы по восстановлению балластного слоя и уборке отработанного балласта как промышленных отходов. Обновление балластного слоя следует рассматривать с точки зрения снижения стоимости и эффективного использования ресурсов, имея при этом в виду, что для повторного использования старогоднего балласта следует отрегулировать его гранулометрический состав в соответствии с требованиями стандарта, так как загрязненный балласт содержит большое количество мелких частиц. Даже если гранулометрический состав удовлетворяет стандарту, балласт с окатан-

ными частицами совсем не обязательно имеет жесткостные или деформационные свойства такие же, как новый, поскольку его частицы потеряли требуемые свойства под воздействием циклических нагрузок от подвижного состава. Хотя в прошлом выполнялись исследования используемого в верхнем строении пути или в насыпях щебня с хорошо подобранным гранулометрическим составом с точки зрения его прочностных и деформационных характеристик, взаимозависимость между абразивным износом частиц и указанными свойствами балласта изучена недостаточно.

В ходе настоящего исследования была проведена серия испытаний по оценке формы частиц подвергшегося истиранию балласта с трехосным и циклическим нагружением с особым вниманием к процессу абразивного износа частиц балласта под воздействием циклических нагрузок от подвижного состава. По результатам этих испытаний исследованы степень абразивного износа частиц балласта, их форма, прочностные и деформационные свойства, а также осадка в условиях эксплуатации под поездной нагрузкой.

Методика испытаний

Испытуемые материалы

В ходе данных исследований испытывался балластный материал трех типов, а именно щебень, подвергнутый абразивному износу на испытательной установке типа Los Angeles при режимах 0 (продолжительность истирания 0 мин), А (10 мин) и В (35 мин). Количество балласта, одновременно закладываемого в испытательную установку, составляло 15 кг, а частота вращения рабочего органа — 33 об/мин. На рис. 1 показано изменение гранулометрического состава испытываемого балласта при различных режимах обработки.

Методы испытаний

Оценка формы частиц балласта. Форму частиц балласта оценивали аналитическим способом с помощью аргументной и радиусной функций распределения после обработки фотоснимков поперечных сечений частиц балласта, сделанных с помощью цифровой фотокамеры в системе координат $X - Y$.

Аргументная функция — это функция распределения тангенса угла наклона прямой, проведенной через точку P_x , которая соответствует смещению X относительно контрольной точки S , и угла $\Theta_{(x)}$ контрольной линии, как показано на рис. 2.

Если полная длина замкнутой кривой равна L , аргументная функция нормализуется согласно уравнению (1), поскольку $\Theta_{(x+L)} = \Theta_{(x)} + 2\pi$:

$$\Theta_{N(x)} = \Theta_{(x)} - 2\pi(x/L). \quad (1)$$

Так как нормализованная аргументная функция $\Theta_{N(x)}$ — это периодическая функция с периодом L , она может быть преобразована в ряд Фурье, приведенный в уравнении (2). Амплитудный k -й спектр может быть выражен через уравнение (3).

$$\Theta_{N(x)} = \frac{b_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \sin(2\pi kx/L) + b_k \cos(2\pi kx/L)], \quad (2)$$

$$C_k = \sqrt{(a_k^2 + b_k^2)}, \quad (3)$$

где

$$a_k = \left(\frac{2}{L}\right) \int_{x_0}^{x_0+L} f(x) \sin(2\pi kx/L) dx,$$

$$b_k = \left(\frac{2}{L}\right) \int_{x_0}^{x_0+L} f(x) \cos(2\pi kx/L) dx,$$

$k = 1, 2, \dots$

Значение нормализованной аргументной функции

$$(NA_{fv}) = \sum_{k=3}^{20} C_k. \quad (4)$$

По результатам одного из ранее выполненных исследований сумма амплитудных спектров с 3-го по 20-й, согласно уравнению (4), показывает степень угловатости частицы. Далее угловатость частицы истертого балласта суммировали с величиной NA_{fv} , полученной из уравнения (4).

Радиусная функция — это функция длины $r(\alpha)$ прямой, соединяющей некоторую точку P_a на внешнем контуре частицы с ее центром тяжести O (см. рис. 2). Она выражается уравнением (5), а k -й амплитудный спектр — уравнением (6):

$$r(\alpha) = \frac{b_0}{2} + \sum_{k=1}^{\infty} [a_k \sin(k\alpha) + b_k \cos(k\alpha)], \quad (5)$$

$$C_k = \sqrt{(a_k^2 + b_k^2)}, \quad (6)$$

где

$$a_k = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int_{\alpha_0}^{\alpha_0+2\pi} r(\alpha) \sin(k\alpha) d\alpha,$$

$$b_k = \left(\frac{1}{\pi}\right) \int_{\alpha_0}^{\alpha_0+2\pi} r(\alpha) \cos(k\alpha) d\alpha,$$

$k = 1, 2,$

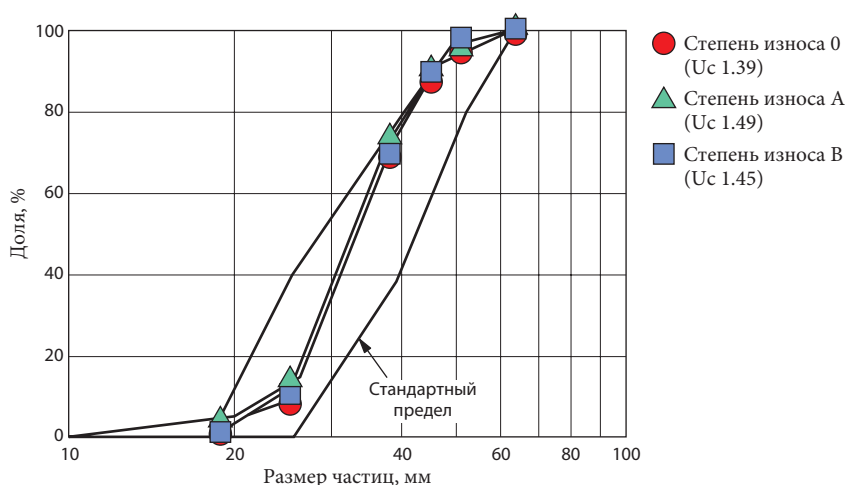


Рис. 1. Распределение частиц щебня по размерам

Ранее было определено, что отношение амплитудных спектров 2-го и 0-го порядков, приведенное в уравнении (7), показывает степень деформирования частицы. Затем вариацию коэффициента формы суммировали со значением радиусной функции, полученным из уравнения (7):

$$R_{fv} = C_2/C_0. \quad (7)$$

Испытания с трехосным нагружением. Серия испытаний с трехосным нагружением высушенных и обезвоженных образцов балластного материала была проведена с темпом приращения осевого сжатия 0,01%/мин и при постоянном предельном давлении 19,6 кН/м² после изотропной консолидации. Давление создавали с помощью вакуума. Циклы «разгрузка — нагружение» под давлением 49,1; 98,1 и 117,2 кН/м² реализовывали в виде равномерного трехосного сжатия. Установка для испытаний с трехосным нагружением изображена на рис. 3.

Цилиндрические образцы высотой 60 и диаметром 30 см были изготовлены методом набивки с помощью деревянной трамбовки и виброуплотнителя с постоянной энергией в цилиндрической форме; набивку выполняли послойно (всего пять слоев). Плотность образцов со степенями абразивного износа 0, А и В составляла соответственно 1,632; 1,679 и 1,681 г/см³. Осевые

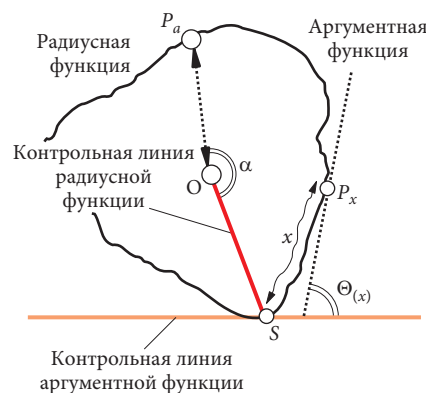


Рис. 2. Концептуальная схема аргументной и радиусной функций

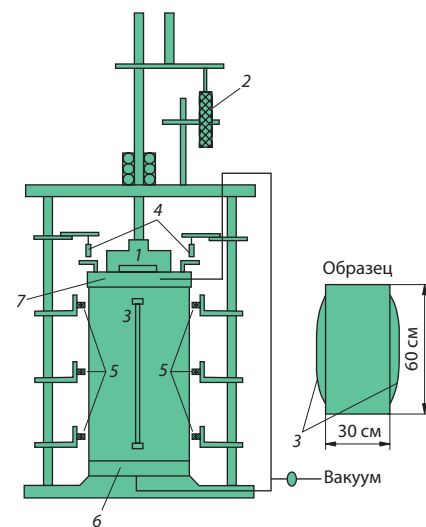


Рис. 3. Схема установки для испытаний с трехосным нагружением:

1 — датчик нагрузки; 2 — датчик наружной деформации; 3 — датчик локальной деформации; 4 — датчик приближения для продольной деформации; 5 — датчик приближения для поперечной деформации; 6 — основание; 7 — крышка

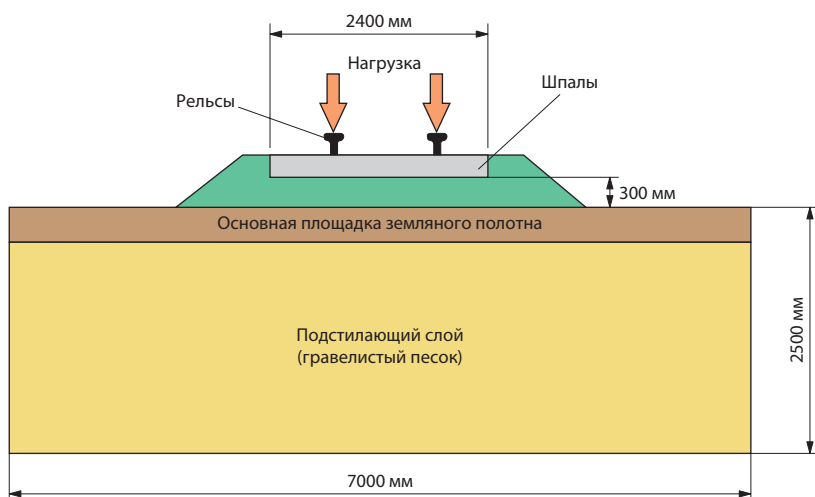


Рис. 4. Схема крупномасштабной модели верхнего строения пути

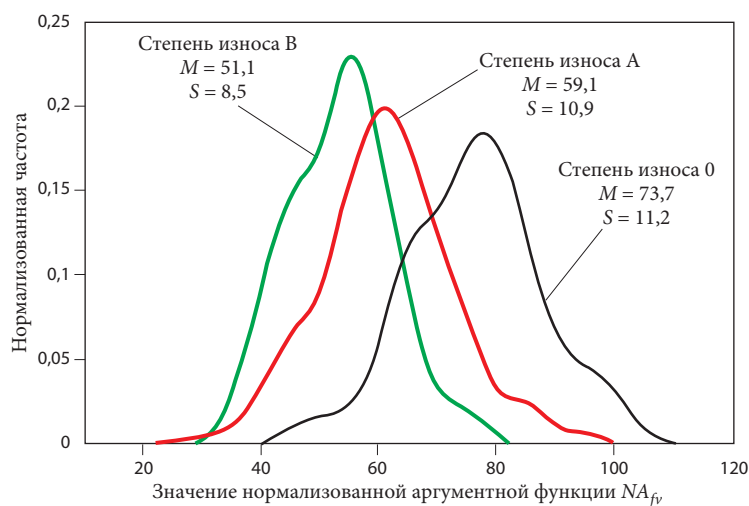


Рис. 5. Частотное распределение значений аргументной функции

нагрузки измеряли с помощью силового датчика, установленного на крышке прибора, осевые перемещения — с помощью датчиков наружной, внутренней и локальной деформации, продольные и поперечные перемещения — с помощью датчиков приближения, установленных по диагонали напротив друг друга по диаметру образца.

Испытания с циклическим нагружением. Как показано на рис. 4, была создана крупномасштабная модель участка верхнего строения пути длиной 7,0, шириной 3,5 и толщиной 2,5 м, состоящая из рельсов, железобетонных шпал, щебеночного балластного и подстилающего слоев. Испытания с циклическим нагружением в объеме 300 тыс. циклов были проведены

при нагрузках от 9,8 до 68,6 кН с частотой 11 Гц на каждый рельс, прикладываемых с помощью вибратора с двумя рабочими органами. Величина приложенной нагрузки определялась исходя из массы подвижного состава и пассажиров, коэффициента распределения нагрузок и других факторов.

Результаты испытаний

Оценка формы частиц балласта

Изучались частицы балласта, подвергшиеся абразивному износу степени 0, А и В. По графикам нормализованной аргументной функции, полученные для этих частиц, можно видеть, что пиковые значе-

ния функции уменьшаются по мере развития абразивного износа, а форма кривых графика имеет тенденцию к сглаживанию. Для каждой степени износа было сфотографировано около 100 частиц с трех направлений; распределения величин NA_{fv} , полученных из графиков аргументной функции, суммировались, как показано на рис. 5. Частотное распределение нормализовано в процентах от общего числа, так как количество анализируемых частиц балласта было в каждом случае разным. Распределение значений NA_{fv} подобно нормальному распределению. По мере развития абразивного износа пиковые, частотные, средние значения и среднеквадратическое отклонение NA_{fv} уменьшаются. Следовательно, величина NA_{fv} становится тем меньше, чем более окатанной становится форма частиц.

Пример графика радиусной функции показан на рис. 6, частотное распределение ее значений — на рис. 7. По мере развития абразивного износа максимальная величина этой функции уменьшается, а форма кривых графика имеет тенденцию к сглаживанию. Подобно NA_{fv} , значения радиусной функции R_{fv} , полученные приблизительно на 100 образцах частиц балласта для каждой степени абразивного износа, были суммированы. Частотное распределение, нормализованное по процентному содержанию от общего числа образцов, показано на рис. 6. Видно, что частотное распределение R_{fv} имеет несколько пиковых значений для каждой степени абразивного износа. Средние значения имеют тенденцию к уменьшению, а влияние абразивного износа на величину среднеквадратического отклонения остается неясным.

Испытания с трехосным нагружением

Зависимость между девиатором напряжений q и продольной деформацией ϵ_a для каждой степе-

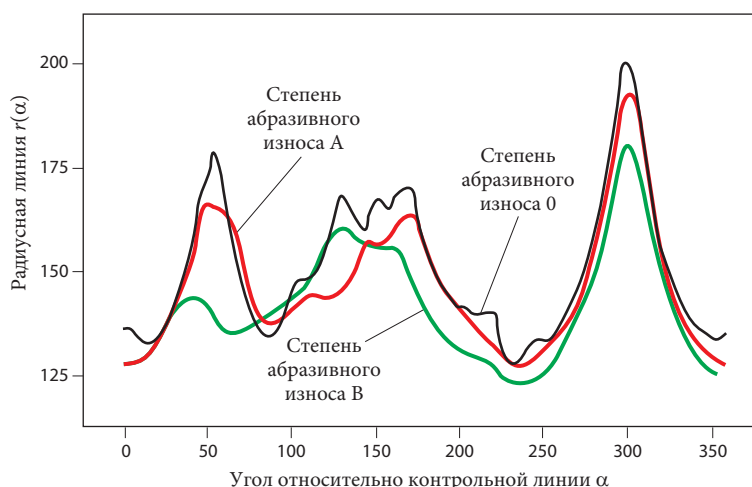


Рис. 6. Пример графика радиусной функции

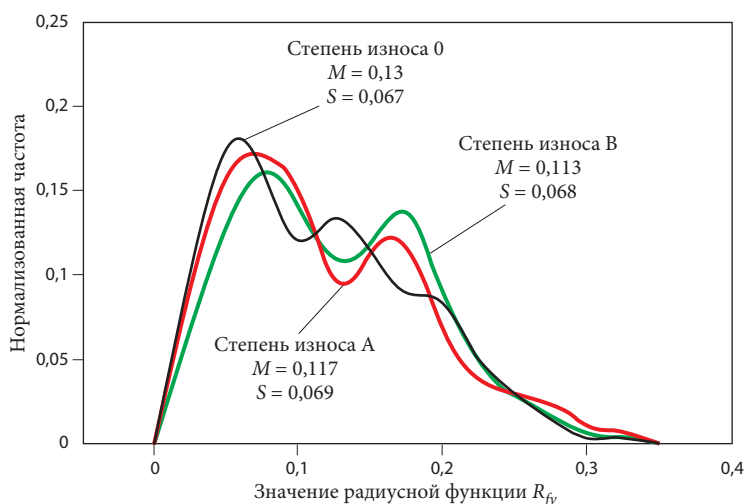


Рис. 7. Частотное распределение значений радиусной функции

ни абразивного износа показана на рис. 8. По мере развития абразивного процесса максимальное значение девиатора напряжений q_{max} уменьшается.

Рис. 9 иллюстрирует взаимосвязь между девиатором напряжений и касательным модулем упругости E_{tan} для каждой степени абразивного износа. Значения E_{tan} при степени износа 0 и А резко уменьшаются на начальной стадии нагружения и стабилизируются по мере развития деформации сдвига, но после этого они снова уменьшаются.

Значения E_{tan} при степени абразивного износа В постоянно уменьшаются с начальной стадии нагружения в процессе развития деформации сдвига. С другой стороны, в

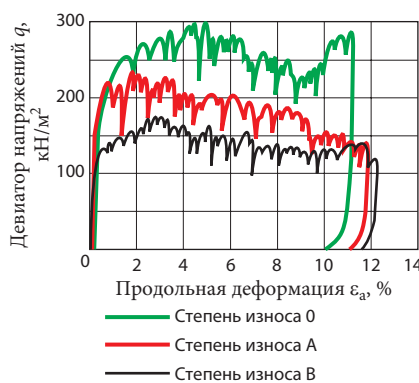


Рис. 8. Результаты испытаний с трехосным нагружением

случае повторного нагружения E_{tan} при степени износа 0 и А возрастает с начальной стадии нагружения по мере развития деформации сдвига. По достижении пикового значения он уменьшается и дости-

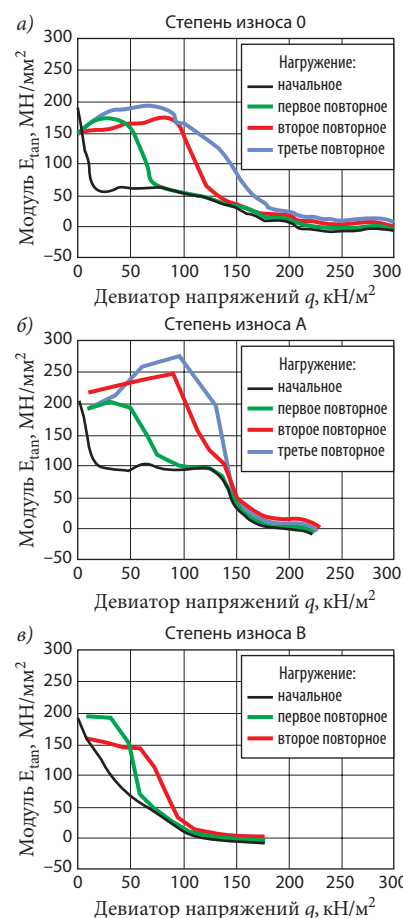


Рис. 9. Зависимость между модулем упругости и девиатором напряжений по результатам испытаний с трехосным нагружением:

а — при степени износа 0; б — при степени износа А; в — при степени износа В

гает значения E_{tan} в начале нагружения. При степени износа В величина E_{tan} непрерывно уменьшается с начальной стадии нагружения по мере развития деформации сдвига таким же образом, как и при первичном нагружении. При повторном нагружении степень износа А демонстрирует большую величину E_{tan} , чем степень износа 0, предположительно потому, что абразивный износ становится достаточным и расположение частиц в испытуемых образцах улучшается. Относительно степени износа В установлено, что E_{tan} уменьшается, поскольку влияние развития процесса истирания больше, чем влияние расположения частиц.

Поперечная деформация ϵ_r , как и продольная ϵ_a , очень важна для

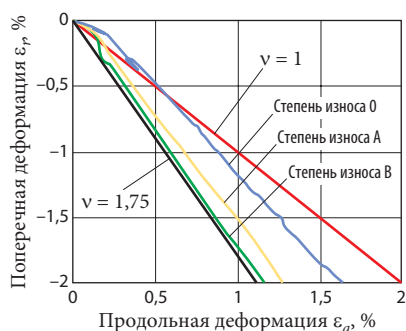


Рис. 10. Зависимость между продольной и поперечной деформациями: ν — коэффициент Пуассона

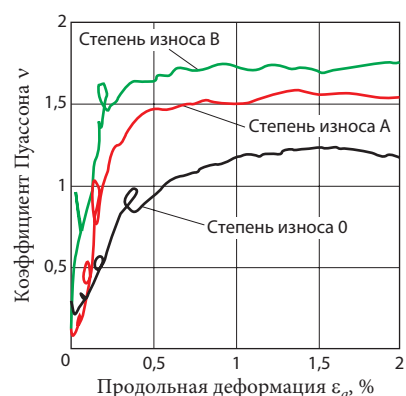


Рис. 11. Зависимость между продольной деформацией и коэффициентом Пуассона

анализа прочностных и деформационных характеристик материала при трехосном сжатии. Зависимость между продольной и поперечной деформациями показана на рис. 10.

На этом рисунке нанесены линии, соответствующие значениям

коэффициента Пуассона $\nu = 1,0$ и $\nu = 1,75$. В диапазоне значений ϵ_a до 1,5% для каждой степени абразивного износа ϵ_r больше, чем ϵ_a . Величина ν составляет при этом 1,0...1,75. Однако, в диапазоне значений ϵ_a порядка 0,2%, ϵ_a больше, чем ϵ_r . Можно видеть, что величины продольной и поперечной деформаций становятся противоположными друг другу.

Рис. 11 иллюстрирует зависимость между продольной деформацией и коэффициентом Пуассона.

Видно, что при величине ϵ_a около 0,5% величина ν возрастает по мере увеличения ϵ_a и становится почти постоянной уже при $\epsilon_a > 0,5\%$ для каждой степени абразивного износа. При величине ϵ_a около 0,1% величина ν возрастает по степеням износа в последовательности А, 0, В. Эта последовательность такая же, как и для значений модуля упругости при $q < 100 \text{ кН/м}^2$. Однако при $\epsilon_a > 0,1\%$ значение ν возрастает по степеням износа в последовательности 0, А, В. Как указано выше, установлено, что коэффициент Пуассона имеет существенное влияние на прочностные и деформационные свойства балласта.

Испытания с циклическим нагружением

Рис. 12 иллюстрирует взаимосвязь между числом циклов нагружения и остаточной осадкой шпал.

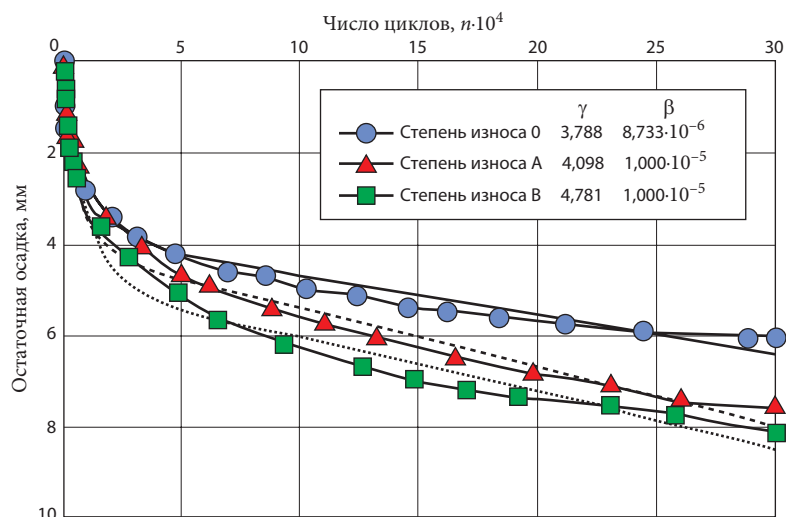


Рис. 12. Зависимость между числом циклов нагружения и остаточной осадкой шпал

Видно, что остаточная осадка резко возрастает в начальной фазе нагружения при каждой степени абразивного износа. После этого, при числе циклов нагружения более 100 тыс., наблюдается тенденция к более плавному, почти линейному увеличению осадки. Чтобы количественно оценить общую тенденцию развития осадки в процессе циклического нагружения, были использованы кривые по эмпирическому уравнению (8) из ранее выполненного исследования, полученные при аналогичных испытаниях и также приведенные на рисунке.

$$y = \gamma(1 - e^{-\alpha x}) + \beta x, \tag{8}$$

где y — остаточная осадка; x — число циклов нагружения; α — эмпирический коэффициент.

Величины β и γ в уравнении означают темп развития остаточной осадки и величину осадки в начальной фазе нагружения. Установлено, что обе эти величины возрастают по мере развития абразивного процесса.

Взаимосвязь между формой частиц и прочностными и деформационными характеристиками балласта

Для анализа зависимости между формой частиц, прочностными и деформационными свойствами балластного слоя и осадкой пути были суммированы результаты оценки формы частиц балласта, испытаний с трехосным и циклическим нагружением.

Зависимость между величиной девиатора напряжений (максимальной) и касательного модуля упругости при испытаниях с трехосным нагружением и темпом развития остаточной осадки шпал и величиной осадки в начальной фазе нагружения при испытаниях с циклическим нагружением показана на рис. 13.

Значения E_{\tan} были получены при напряжении около 160 кН/м^2 , которое соответствует напряже-

нию под подошвой шпалы крупномасштабной модели верхнего строения пути. Это напряжение соответствует величине q при повторном нагружении в процессе трехосного сжатия. Причина принятия в расчет напряжения при повторном нагружении состоит в том, что испытания на крупномасштабной модели пути — это испытания с циклическим нагружением. Как видно из рисунка, значения β и γ уменьшаются с возрастанием q_{max} и E_{tan} . К тому же отмечено, что осадка верхнего строения пути уменьшается по мере увеличения прочности и жесткости балластного слоя.

Взаимосвязь между степенью шероховатости NA_{fv} частиц балласта, величиной частиц, коэффициентом формы частиц, величиной девиатора напряжений (максимальной) и касательного модуля упругости при испытаниях с трехосным нагружением приведена на рис. 14.

Значения q_{max} и E_{tan} линейно уменьшаются с уменьшением NA_{fv} и R_{fv} . В ранее выполненном исследовании получено, что $R_{fv} = 0$, когда коэффициент формы, соответствующий очертанию прямоугольника, наложенного на силуэт частицы балласта, равен 1, и $R_{fv} \approx 10$, когда коэффициент формы равен 1,5. Поэтому считается, что вариация q_{max} и E_{tan} при изменении R_{fv} , как показано на рис. 14, обусловлена, главным образом, вариацией NA_{fv} .

Влияние абразивного износа определяли по результатам испытаний на крупномасштабной модели верхнего строения пути. Как видно из рис. 15, значения NA_{fv} и R_{fv} возрастают, а β и γ уменьшаются по мере абразивного износа частиц балласта.

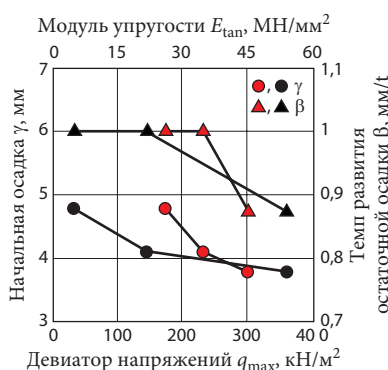


Рис. 13. Зависимость между максимальным девиатором напряжений, модулем упругости, темпом развития остаточной осадки и осадкой в начальной фазе нагружения

Выводы

По результатам оценки формы частиц и испытаний с трехосным и циклическим нагружением, проведенных с использованием деформированного балласта, имитировавшего предназначенный для очистки загрязненный балласт, могут быть сделаны следующие выводы.

1. Значения β и γ , полученные по результатам испытаний с циклическим нагружением на крупномасштабной модели верхнего строения пути, уменьшаются с возрастанием величин q_{max} и E_{tan} , полученных при испытаниях с трехосным нагружением.

2. Когда коэффициент формы NA_{fv} частиц балласта становится малым, значения q_{max} и E_{tan} уменьшаются, а β и γ возрастают. Это означает, что по мере того как шероховатость частиц балласта минимизируется из-за абразивного износа, прочность и жесткость балластного слоя уменьшаются, а осадка возрастает.

3. По мере уменьшения величины частиц балласта R_{fv} , значения q_{max} и E_{tan} уменьшаются, а β и γ возрастают. Однако поскольку вариация

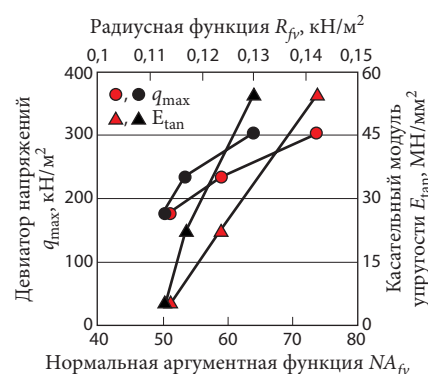


Рис. 14. Зависимость между шероховатостью и величиной частиц, максимальным девиатором напряжений и модулем упругости

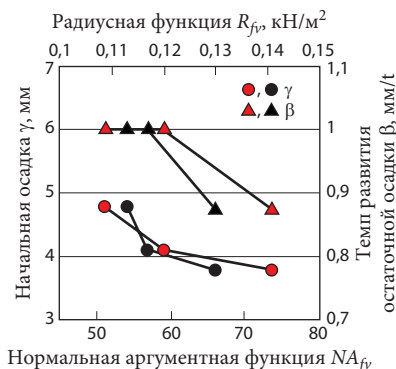


Рис. 15. Зависимость между шероховатостью и величиной частиц, начальной осадкой шпал и темпом ее развития

R_{fv} мала и хотя степень абразивного износа частиц различна, уменьшение значений q_{max} и E_{tan} и увеличение β и γ обусловлены, главным образом, уменьшением NA_{fv} , т. е. они вызваны отсутствием шероховатости частиц балласта.

Можно, очевидно, заключить, что метод оценки формы частиц с помощью нормализованной аргументной функции весьма эффективен для описания состояния частиц балласта при абразивном износе.