

# Эффективность георешеток в конструкции земляного полотна

Эффективное применение армирующих георешеток, а также других неуплотняемых слоев в конструкции пути возможно только при наличии всеобъемлющих знаний о механизме взаимодействия отдельных компонентов земляного полотна и верхнего строения пути.

Точно оценить механизм взаимодействия компонентов конструкции пути с армирующей георешеткой невозможно. Тем не менее некоторые специалисты считают, что время, в течение которого земляное полотно с армирующим слоем сохраняет свои характеристики, в несколько раз превышает срок службы неармированной конструкции. Их оппоненты утверждают, что использование армирующих геосинтетических материалов в слоях конструкции земляного полотна почти не способствует повышению устойчивости его к деформациям.

Разные мнения высказываются и о выборе вида армирующего геосинтетического материала (геотекстиль, георешетки, геокомпозиаты и т. д.). Так, для активизации георешетки достаточно минимальной деформации, поэтому ее чаще применяют в конструкции железнодорожного пути. Среди специалистов нет согласия по поводу их параметров, влияющих на эффективность и функциональность в качестве армирующего слоя.

## Укрепление подшпального слоя с помощью георешеток

В Словакии геосинтетика была использована при модернизации железнодорожного коридора № 4 ОСЖД. Строгие требования, предъявлявшиеся к качеству путевых работ, в особой степени относились к подшпальному основанию и земляному полотну. Большое внимание уделялось не только эффективному

использованию армирующей георешетки, но и ее параметрам.

Слои подшпального основания в процессе эксплуатации подвергаются воздействию статических и динамических нагрузок, а также климатических факторов. Природные материалы, из которых состоят эти слои, определяют качество пути и срок его службы. С одной стороны, эти параметры зависят от предполагаемого характера развития деформации слоев, с другой — от эксплуатационной или предельной пластической деформации пути, приводящей к критическому изменению его геометрии.

Чтобы повысить срок службы пути, требуется исключить возможность возникновения и развития его неравномерных и недопустимых деформаций в плане и профиле. На железных дорогах Словакии с этой целью укладывают георешетку, что связано также с необходимостью экономии природных материалов, используемых в подшпальном основании (сейчас их применяют только в несущем слое земляного полотна). Эффективность армирующих георешеток обеспечивается, во-первых, их собственными механическими свойствами, в том числе жесткостью (способностью сохранять форму), и, во-вторых, механизмом взаимодействия решетки с контактирующим с нею материалом (щебнем).

Георешетка может иметь ячейки в форме квадратов, треугольников и др., вследствие чего в армирующем слое может возникнуть

эффект связывания. Этот эффект, известный как механизм сцепления и зажатия, проявляется в пространстве, окружающем георешетку, если фракции взаимодействующего с нею насыпного материала (щебень, гравий, дробленый камень) попадают в соответствующие им по форме и размеру ячейки. В этом случае предотвращается случайное движение фракций, что обусловлено их формой (выступами), а также наличием узлов и жесткостью георешетки. На выбор нужного вида георешетки, как и соответствующего сочетания ее с насыпным материалом, влияет достаточно много факторов, в результате чего армирующий эффект георешетки может по-разному проявиться в построенной конструкции.

Основным условием функционирования ожидаемого механизма взаимодействия является возбуждение с помощью георешетки сил сцепления и сжатия, достаточных по величине для того, чтобы конструкция пути отвечала требованиям, предъявляемым к участкам соответствующей категории. Форма георешетки должна обеспечивать достаточную степень ее жесткости и прочности на изгиб. В контактирующем материале подшпального основания георешетка, обладающая достаточной прочностью на растяжение, действует как армирующий элемент, если выполнены определенные условия. Использование георешетки в слое подшпального основания поясняет рис. 1.

## Параметры влияния армирующей георешетки

В литературе о геосинтетике приводятся различные параметры, которые могут повышать эффективность

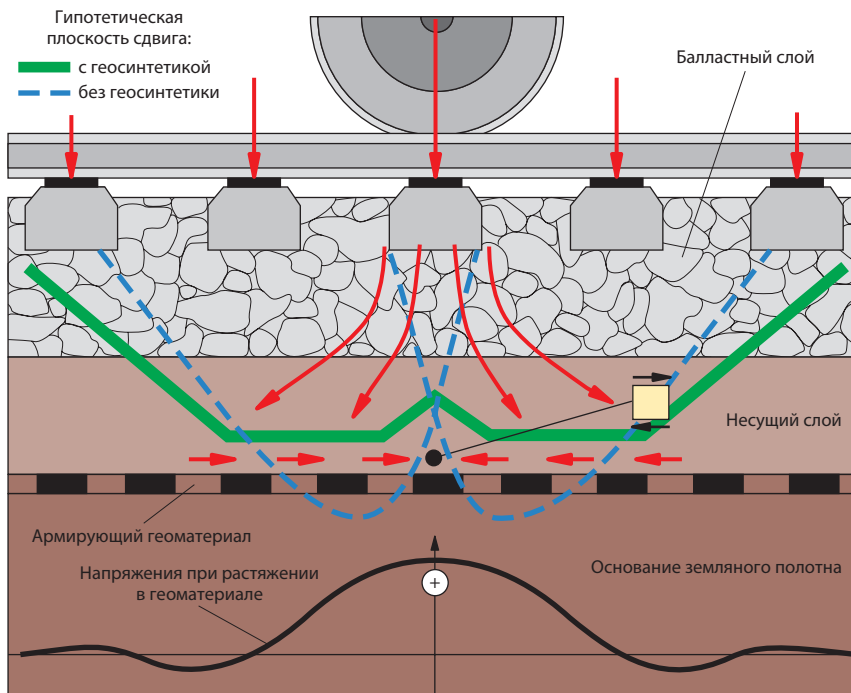


Рис. 1. Схема механизма армирующего действия георешетки в подшпальном основании

георешетки в армируемом слое. Изготовители или поставщики часто целенаправленно относят указанные параметры к георешетке определенного типа, чтобы обратить на них особое внимание маркетинговых служб.

Параметры, оказывающие решающее влияние на эффективность армирования, можно определить исходя из рассмотренного механизма взаимодействия. На первом этапе определяют силы, действующие на георешетку, т. е. анализируют внешние силы. На втором этапе

рассматривают внутренние силы, возникающие как реакция георешетки на действие внешних сил. Вид внешних сил и способ их передачи на георешетку характеризуют характер ее взаимодействия с материалом слоя. Вместе с внутренними силами (напряжениями), возникающими как реакция на внешние силы, они определяют различные параметры, как основные, так и производные, которые влияют на эффективность георешетки, т. е. на ее физико-механические и геометрические свойства.

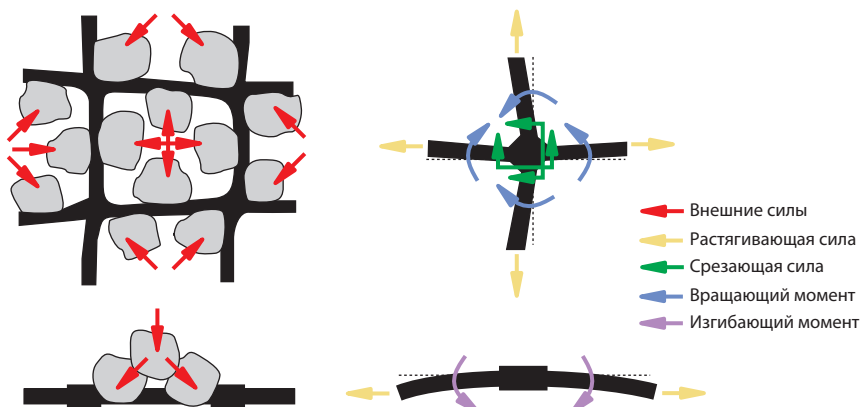


Рис. 2. Внешние и внутренние силы, действующие на георешетку

## Внешние силы, действующие на георешетку

Со стороны щебеночного балласта на георешетку действуют внешние (экзогенные), стохастически направленные силы (рис. 2). Их величина зависит от способа и интенсивности нагружения конструкции, степени взаимодействия георешетки с насыпным материалом. Можно предположить, что чем выше плотность материала решетки и величина внешних сил, тем лучше взаимодействуют щебень и георешетка, обеспечивая эффективное армирование. Поскольку щебеночный слой представляет собой смесь из фракций горных пород различного размера, то силы передаются на георешетку теми зернами, которые находятся в контакте с ее ребрами и узлами.

*Первое условие взаимодействия* — обеспечение определенной зависимости между размерами зерен и ячеек георешетки. В подшпальном основании чаще всего используют фракции 31,5/63 мм для нижнего слоя и 32/63 мм для балластной призмы. Георешетку следует выбирать прежде всего с учетом гранулометрического состава фракций (в диапазоне  $d_{50} - d_{100}$ ). Такой щебень должен содержать средние и крупные зерна (гранулы). Зерна данного размера решающим образом влияют на сцепление между насыпным материалом и георешеткой: происходит их зажатие в ячейках георешетки. Более мелкие фракции (менее  $d_{50}$ ) обеспечивают слою другие требуемые качества — морозоустойчивость, водопроницаемость, прочность и пр. Эти фракции в принципе не влияют на механизм взаимодействия между насыпным материалом и георешеткой. Идеальное распределение сил, действующих в георешетке, теоретически возможно, если в насыпном материале зерна  $d_{50}$  в 3,5–2,5 раза меньше размера ячейки георешетки, а фракции  $d_{100}$  меньше или

равны размеру ячеек (рис. 3). Это условие подтверждено в нескольких научно-исследовательских работах, выполненных во время измерения прочности армированного основания на сдвиг и растяжение.

*Второе условие*, влияющее на взаимодействие георешетки и насыпного материала, — обеспечение определенных геометрических свойств компонентов армированного несущего слоя. Силы передаются от насыпного материала к георешетке через поверхности контакта фракций среднего и крупного размера с георешеткой. Силы, действующие на поверхности соприкосновения, в том числе и сила трения между георешеткой и щебнем, достигнув определенного значения, удерживают зерна щебня в ячейках георешетки и перераспределяют дополнительные вертикальные напряжения слоя в направлении плоскости георешетки.

Основными параметрами, влияющими на силу, которая действует в зоне контактирующих поверхностей, и силу трения между гранулами и георешеткой, являются форма и размер зерен, а также форма и размер ребер и узлов георешетки. Размер фракций щебня согласно первому условию определенным образом зависит от размера ячеек георешетки. Чем выше доля средних и крупных зерен в слое, тем сильнее зацепление насыпного материала в ячейках георешетки. Максимально эффективное связывание зерен в ячейках георешетки и распределение между ними сил достигается при достаточно шершавых зернах, имеющих острые края и относящихся к определенному классу сферичности.

Угол внутреннего трения между гранулами и георешеткой меньше, чем между гранулами в неармированном щебеночном слое. Это обусловлено тем, что форма ребер и узлов георешетки неоптимальна. Теоретически ребра решетки могут иметь оптимальные форму и

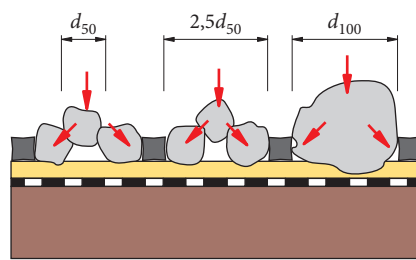


Рис. 3. Зажатие гранул в георешетке

размеры в поперечном сечении, соответствующие форме и размерам гранул, которые по кривой гранулометрического состава соответствуют фракции  $d_{50}$ . Однако выполнить это условие в процессе производства и при практическом использовании георешеток невозможно.

Очень важно, чтобы ребра и узлы георешетки были шероховатыми, с острыми краями и достаточно высокими. Высота ребер должна быть равна как минимум  $1/3$  размера зерна  $d_{50}$ , оптимально — размеру  $d_{50}$ . Достаточная высота ребер и узлов также гарантирует высокую прочность георешетки на изгиб. Ширина ребер влияет на соотношение суммарной площади ячеек и общей площади всей георешетки. В принципе, чем больше это соотношение, тем больше доля зерен, зажимаемых в ячейках георешетки, и меньше число тех, которые

расположены свободно. Теоретически эффективность ребра георешетки будет более высокой, если его сечение расширяется сверху вниз, благодаря чему обеспечивается лучшее вдавливание и зажатие зерен щебня в ячейках.

Еще одним условием, влияющим на взаимодействие георешетки с насыпным материалом, является степень уплотнения щебня в армируемом слое. В процессе уплотнения щебня, распределенного на уложенной георешетке, отдельные зерна проникают в ячейки, в результате чего возрастает сила, действующая на стенки ячеек, и увеличивается площадь соприкосновения насыпного материала и георешетки. Ячейки георешетки под действием сил, воздействующих на их стенки, растягиваются. После того как уплотнитель балласта завершит работу, ячейки георешетки снова стягиваются. В результате в ребрах возникает определенное предварительное напряжение, и насыпной материал связывается таким образом с георешеткой. Над ячейками георешетки появляются распределяющие нагрузки своды, которые опираются на ребра и узлы георешетки (рис. 4).

В дальнейшем георешетка предотвращает движение зерен в вертикальном и, прежде всего, в горизонтальном направлениях. Это явление называется динамическим зацеплением; оно возникает в процессе уплотнения щебня в пространстве выше георешетки. В слоях выше и ниже георешетки после уплотнения образуется новая структура с лучшими механическими свойствами.

Насыпной материал, армированный георешеткой, обладает более высоким сцеплением, чем обычный неармированный. Степень уплотнения армированного слоя должна составлять не менее 95% максимальной. Решающая роль уплотнения в обеспечении устойчивости пути к деформациям была подтверждена многочисленными измерениями, выполненными

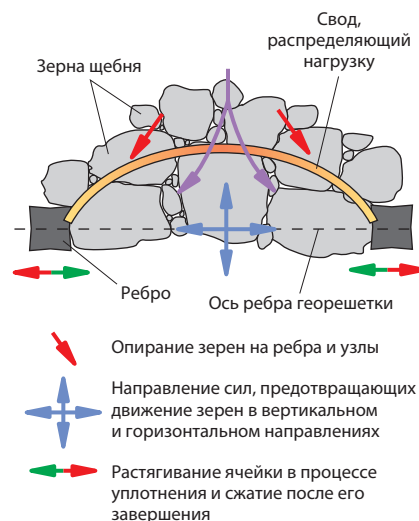


Рис. 4. Схема, поясняющая процесс уплотнения при взаимодействии насыпного материала и георешетки

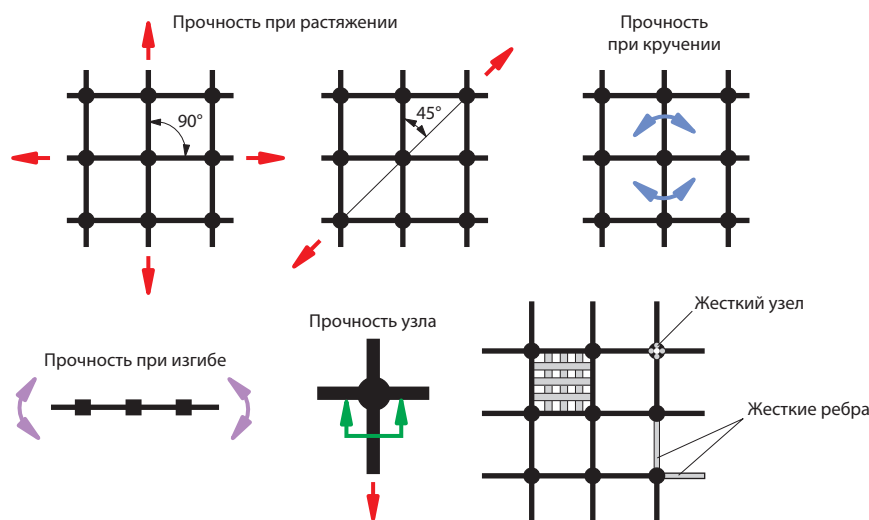


Рис. 5. Составляющие комплексной прочности двухосной георешетки

на испытательном стенде в лаборатории кафедры строительства и исследования железных дорог (KŽSaTH) Университета г. Жилина (Словакия).

### Внутренние силы, действующие в георешетке

В ребрах георешетки действуют изгибающие и растягивающие силы, а в узлах — срезающие силы и моменты (см. рис. 2). Внутренние (эндогенные) силы возникают в виде реакций на внешние и являются статистическим эквивалентом поверхностных сил армируемого слоя, т. е. представляют собой напряжения, действующие в георешетке, которая является частью нагружаемого армированного слоя, и влияющие на ее пространственную деформацию. Соотношения между напряжениями и соответствующими им деформациями зависят от физических свойств полимера, из которого изготовлена георешетка.

Свойства материала георешетки можно определенно выразить, как минимум, модулем упругости при растяжении  $E$ , коэффициентом Пуассона, геометрией (формой и габаритами) элементов георешетки и способом ее изготовления, прежде всего узлов. Названные

характеристики считаются основными физическими параметрами георешетки, на основе которых затем определяют технические параметры — прочность узлов на растяжение, изгиб и срез, прочность при кручении в плоскости георешетки и др. Поскольку количественно достаточно трудно оценить как геометрию георешетки, так и силы, передаваемые гранулами и зависящие от плотности, размера и ориентации последних в георешетке, то гарантировать ее работоспособность тоже сложно. В настоящее время практически нет общих предписаний, в которых были бы приведены минимальные значения параметров георешетки выбранной конструкции. Тем не менее, пользуясь известными значениями этих параметров, можно охарактеризовать так называемую эффективную георешетку.

*Параметр прочности* (при разрушении или при значительной деформации) георешетки, уложенной в подшпальном основании, не позволяет оценить ее поведение при деформации. Допустимая деформация георешетки определяется требованиями, предъявляемыми к конструкции пути, и глубиной укладки. В принципе, для слоев конструкции путей сообщения

(автомобильных и особенно железных дорог) допускается лишь незначительная деформация, лежащая в миллиметровом диапазоне. Важной задачей является определение параметров георешетки в данном диапазоне, причем важнее найти параметры, определяющие ее деформацию, а не прочность.

Минимальная прочность георешетки на растяжение соответствует требованиям Инструкции STN EN ISO 10319 (5/2000) и представляет собой линейную константу пропорциональности в диапазоне определенной деформации структуры георешетки. Для железнодорожного строительства принято, что максимальные значения деформаций конструкции пути, вызываемых силами растяжения, находятся в диапазоне от 0,1 до 0,5%. Деформация георешетки при поперечном растяжении определяется диапазоном от 0 до 0,1%. При рассмотрении реального распределения сил в слое конструкции пути (рис. 5) прочность георешетки на растяжение следует рассматривать, исходя из сил, направленных от центра решетки и лежащих в ее плоскости. Двухосная георешетка обладает гораздо более высокой прочностью при растяжении в направлении ребер, чем, например, под углом 45°, когда она самая низкая. В этом направлении сопротивление возможному горизонтальному сдвигу зерен щебня тоже самое низкое. Гораздо более высокую радиальную прочность имеет трехосная георешетка (ей свойственна треугольная структура), у которой ребра соединяются между собой под углом 60°.

*Прочность на изгиб* характеризует упругость георешетки в вертикальном направлении. Эту прочность определяют при испытании на изгиб образца длиной 864 мм и шириной, равной размеру ячеек. Горизонтальные нагрузки георешетка выдерживает благодаря своей прочности на растяжение, а вертикальные — изгибной прочностью.

Ввиду того что георешетка является плоскообъемным изделием, ее прочность на изгиб значительно ниже, чем на растяжение. Большой прочностью обладает георешетка с более высокими ребрами. По прочности на изгиб георешетки подразделяют на жесткие и гибкие.

*Прочность георешетки в целом* в принципе определяется способом соединения ребер, т. е. типом георешетки (рис. 6). Ребра могут быть соединены механическим, химическим или термическим способом, а могут быть просто переплетены. Прочность георешетки в значительной степени определена процентным соотношением значений прочности ребер и узлов. Если прочность узлов ниже 90% прочности ребер, значительно ухудшается общее действие георешетки. Соединения (узлы), ослабленные в процессе эксплуатации, не обеспечивают прочности решетки и устойчивости слоя щебня.

*Жесткость при кручении*, также называемую формоустойчивостью ячеек георешетки, проверяют путем скручивания ее в горизонтальной плоскости. Принцип испытания заключается в измерении угла, на который поворачивается узел решетки при вращающем моменте 0,5–2,5 Н·м. Оценивают формоустойчивость по кривой, отображающей зависимость вращающего момента от угла поворота, определяя величину угла, соответствующую моменту, равному 2 Н·м.

Некоторые специалисты считают, что жесткость при кручении может стать излишним параметром, не коррелированным с функцией георешетки. В процессе распределения нагрузок в плоскости георешетки в ней, помимо прочего, возникают *горизонтальные силы*, действующие на ребра. В результате происходит горизонтальный изгиб ребер, что может привести к возникновению вращающего момента в узлах. Это было установлено при испытаниях, поэтому жесткость при кручении

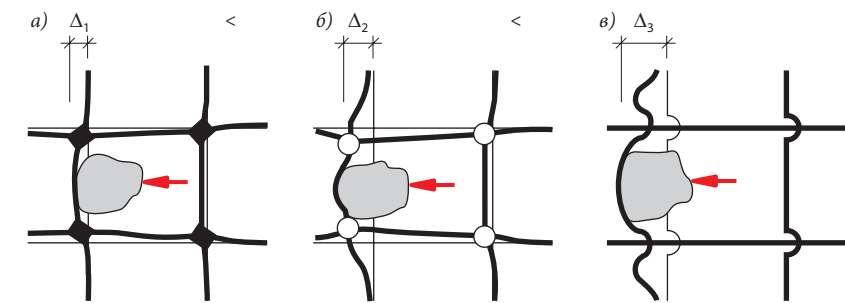


Рис. 6. Возможная горизонтальная деформация георешетки: а – сплошной жесткой (деформация  $\Delta_1$  минимальна); б – без жестких связей ( $\Delta_2 > \Delta_1$ ); в – подвижной нежесткой (переплетенной,  $\Delta_3 > \Delta_2$ )

остаётся важным параметром для оценки работы георешетки.

### Оценка влияющих параметров

На георешетку, установленную в подпальном основании, действуют статические (постоянные) и циклические (динамические) силы.

*Статические (предварительные) напряжения* возникают после укладки армирующего слоя и уплотнения щебня, т. е. на первичном этапе заклинивания зерен в ячейках георешетки. Это напряженное состояние сохраняется, если на конструкционный слой не действует нагрузка. Статические напряжения зависят от условий и интенсивности взаимодействия решетки и щебня, а также от способа уплотнения. Чем выше напряжения в состоянии покоя, тем выше уровень заклинивания гранул и напряжения в них при уплотнении балласта и, следовательно, сильнее взаимодействие георешетки и насыпного материала. Таким образом,

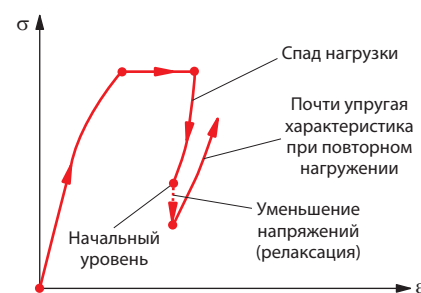


Рис. 7. Временная диаграмма циклически нагружаемой георешетки в армируемом слое

георешетка работает и при отсутствии нагрузки.

Для оценки действия георешетки большое значение имеет параметр длительной прочности, исследуемый в условиях циклирования нагрузки, при котором условия длительной ползучести сменяются режимом релаксации (снижения нагрузки). На рис. 7 приведена диаграмма такого циклического нагружения георешетки в армируемом слое. Релаксация происходит при снижении напряжений  $\sigma$ , ограниченном растяжении материала решетки и предельной деформации  $\epsilon$  армируемого слоя, допускаемой для участка определенной категории.

Если предварительное напряжение в результате релаксации ослабевает, георешетка прекращает передачу в армируемый слой вертикальных напряжений от проходящего подвижного состава. Она больше не действует как связывающая арматура, а только выполняет роль мембраны, которая может активизироваться при возрастающей деформации слоя.

Вторичный уровень сцепления и заклинивания зерен щебня в ячейках георешетки достигается в процессе эксплуатации под действием *циклической нагрузки от прохождения поездов*. На этом этапе, кроме того, постепенно повышается плотность опорного слоя вследствие исключения стойкой пластической деформации зерен. Следовательно, на георешетку, смонтированную в армируемый слой, действуют

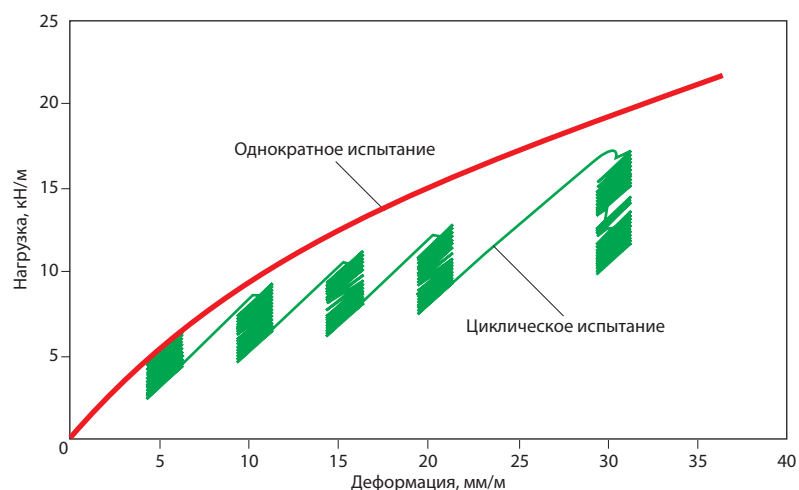


Рис. 8. Зависимости, полученные при долговременных и циклических испытаниях георешетки

статические нагрузки, к которым добавляются циклические нагрузки от проходящего подвижного состава. Для этих нагрузок характерны краткосрочность воздействия, быстрый рост и спад.

Исходя из указанных реальных нагрузок георешетки в конструкции пути, необходимо для установления технических параметров, определяющих нормальное функционирование георешетки, провести следующие испытания:

- длительные с релаксацией, проводимые с целью создания максимальной статической нагрузки, т. е. предварительного напряжения в георешетке;
- краткосрочные (мультициклические) с диапазоном нагрузок, лежащим между максималь-

ными статической и циклической нагрузками.

При испытаниях на релаксацию сила, действующая на георешетку, должна расти до тех пор, пока не будет достигнут режим стабильной деформации решетки. Параметры деформации следует определять, создав нагрузку, близкую к реально действующей в условиях эксплуатации. Для этого сначала решетку следует нагрузить так, чтобы были достигнуты статические предварительные напряжения, после чего приложить быстро возрастающую нагрузку, аналогичную передаваемой проходящим поездом (рис. 8). Последняя позволит определить параметры динамической деформации георешетки: динамическую прочность при растяжении,

динамическое сопротивление кручению и др.

Испытания под воздействием долговременных и циклических нагрузок следует проводить при температурах, которые присущи данной конструкции и соответствуют определенным климатическим условиям. Физико-механические свойства полимеров, из которых изготовлена георешетка, в большой степени зависят от температуры. Для георешетки из полипропилена, установленной в нижнем строении пути, где она взаимодействует с балластом верхнего строения пути и температура колеблется в пределах от  $-10$  до  $+30$  °С, изменение прочности при растяжении может достигать 70%. В то же время у георешетки, погруженной в земляное полотно, в диапазоне температур от  $-5$  до  $+25$  °С снижение прочности составляет 45%.

### Эффективное использование георешеток в подшпальном основании

Добиться наилучшего взаимодействия георешетки и щебня, а также обеспечить оптимальные параметры недостаточно, для того чтобы гарантировать эффективность армируемого слоя. Кроме этого, необходимо получить такое распределение внутренних напряжений в георешетке, при котором ее деформация будет минимальной. Возникающие в ней напряжения уменьшаются с увеличением глубины расположения (рис. 9). Эти изменения напряжений обусловлены распределением нагрузок и снижением деформации промежутков между зернами на глубине, что сказывается негативно на сцеплении гранул щебня и их зажатии в ячейках георешетки.

Характеристика ползучести георешетки (зависимость напряжений и пластической деформации от времени) предполагает деформацию, прогрессирующую по мере

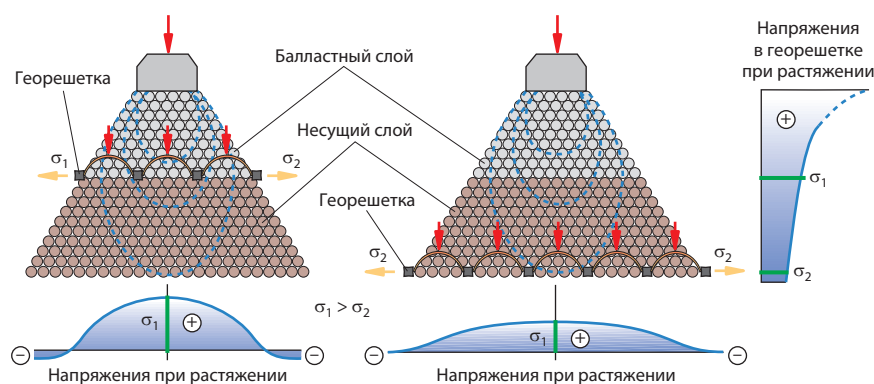


Рис. 9. Влияние глубины укладки георешетки на напряжения, возникающие в ней при растяжении

увеличения времени работы при определенной величине внутренних напряжений растяжения. В связи с этим георешетка более эффективна в местах, где действуют высокие внутренние напряжения. Здесь она обеспечивает максимальное и наиболее продолжительное уменьшение напряжений при ограниченной пластической деформации. Если в месте укладки в георешетке не возникнут достаточно высокие внутренние напряжения, применение ее не будет иметь практического значения, так как она не сможет работать или будет работать неудовлетворительно. При высоких напряжениях георешетка работает, т.е. распределяет нагрузку, уменьшает деформацию слоя, в результате чего увеличивается срок службы пути.

На высокоскоростных участках, где установлены строгие требования, касающиеся деформации пути,

установка армирующей георешетки на уровне верхнего слоя земляного полотна считается оптимальной. Доказано, что продолжительная вертикальная деформация под воздействием циклических нагрузок значительно уменьшается, если железнодорожное полотно содержит армирующий слой.

### Выводы

Функцией георешетки, взаимодействующей со щебнем, является повышение его связующей способности вследствие предотвращения вертикальных и особенно горизонтальных смещений гранул. Лаборатория KŽSATH с помощью динамического вибростенда проводит моделирование динамических сил, возникающих при прохождении поезда с различной скоростью и различной осевой нагрузкой. На основании полученных результатов

можно определить требования, предъявляемые к характеристикам георешетки, и оценить возможности применения новой технологии армирования конструкции пути.

В настоящее время можно определить только общие требования к конструкции георешетки. Что касается способов текущего содержания и ремонта пути, то необходимо следить, чтобы георешетка была проложена как минимум на 0,35 м ниже подошвы шпал. Это позволит избежать ее случайного повреждения при работе путевым инструментом, а также в случае использования шпалоподбивочных или щебнеочистительных машин.

*По материалам компании Váhostav (<http://www.vahostav-sk.sk>), кафедры железнодорожного транспорта университета в Жилине, Словакия (kzd.uniza.sk), Eisenbahntechnische Rundschau, 2010, № 4, S. 176–185.*

## НОВОСТИ

### Полипропиленовые трубы для водоотвода

Компания Rechau (Германия) разработала толстостенные трубы Raudril Rail PP из полипропилена, предназначенные для использования в системах водоотвода земляного полотна. Их можно укладывать в зонах земляного полотна, несущих наибольшие рабочие нагрузки. Трубы Raudril Rail PP получили допуск Федерального бюро железных дорог Германии (EVA).

### Монорельсовая дорога для Бразилии

В городе Манаус (Бразилия, штат Амазонас) планируется построить монорельсовую дорогу протяженностью 20 км с девятью станциями.

Контракт стоимостью 1,46 млрд реалов (918 млн дол. США) заключен с консорциумом, состоящим из компании Scomi (Малайзия) и бразильских CR Almedia, Mendes Junior и Serveng-Civilsan. Расчетная провозная способность линии — 35 тыс. пассажиров в час в одном направлении. Линия должна быть построена в течение 40 мес.

Доля компании Scomi в проекте составляет 342 млн реалов. Scomi поставит десять шестивагонных поездов, выполнит работы по оборудованию депо и проектированию путевой структуры, а также будет осуществлять управление реализацией проекта. Ранее с консорциумом Monotrilho Integração, в состав которого также входит компания Scomi, был заключен контракт на постройку линии монорельсовой дороги в другом бразильском городе — Сан-Паулу.

### Испытания низких шумозащитных стенок

Железные дороги Германии (DB) испытывают низкие шумозащитные стенки (высотой до 70 см) общей длиной 300 м в районе станции Целле. Эти стенки должны снижать уровень шума непосредственно у его источника. Для получения оптимальных результатов длина участков, на которых будут испытывать шумозащитные стенки, выбирается с учетом местных условий. Перед установкой стенок проводят измерения уровня шума, чтобы можно было определить степень его снижения в конкретных точках и в общем по участкам. Их будут сравнивать с результатами измерений, которые выполняют в середине 2012 г. в ходе опытной эксплуатации стенок.