

Карпущенко Николай Иванович родился в 1936 г. В 1960 г. окончил с отличием факультет СЖД НИИЖТа, в 1960–1963 гг. работал в Называевской и Входнинской дистанциях пути ЗСЖД дорожным мастером, заместителем начальника дистанции пути, 1963–1966 гг. — аспирант НИИЖТа (научный руководитель В.Г. Альбрехт), кандидат технических наук (1967 г.), доцент (1969 г.). 1981–2001 гг., а затем с 2003 г. — заведующий кафедрой «Путь и путевое хозяйство» СГУПС, доктор технических наук (1985 г.), профессор, почетный железнодорожник (1986 г.), академик Российской академии транспорта (1991 г.), заслуженный деятель науки РФ (2004 г.). Область научных интересов: надежность пути, совершенствование рельсовых скреплений, взаимодействие пути и подвижного состава. Автор более 200 научных работ.

УДК 625.14

Н.И. КАРПУЩЕНКО

ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ ВЕРХНЕГО СТРОЕНИЯ ПУТИ

В статье рассмотрена история развития конструкции бесстыкового пути в СССР и РФ, роль ученых НИИЖТа–СГУПС в решении этого вопроса, а также вопросов совершенствования конструкции промежуточных рельсовых скреплений для сложных условий эксплуатации.

Путь — базовый элемент инфраструктуры железнодорожного транспорта. Затраты на его устройство и техническое обслуживание зависят от трех основных факторов: уровня воздействия подвижного состава; соответствия конструкции условиям эксплуатации; качества материалов верхнего строения (ВСП), качества ремонтов и текущего содержания. Поэтому одной из основных приоритетных задач управления путевым комплексом является создание такой конструкции пути, которая обеспечивает минимум упомянутых совокупных затрат при обеспечении безопасности движения поездов.

С одной стороны, конструкция должна быть достаточно надежной и долговременно стабильной, чтобы расходы на промежуточные ремонты и текущее содержание не были велики. С другой стороны, ее мощность и расходы на устройство не должны быть избыточными. Решение этой задачи включает в себя типизацию элементов ВСП и конструкций пути в целом в зависимости от условий эксплуатации.

С введением в действие приказа МПС № 12Ц от 16.08.94 и «Положения о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах РФ» [1] дифференциация конструкций ВСП уменьшилась. «Технические условия на работы по ремонту и планово-предупредительной выправке пути» от 2003 г. (ЦПТ-53) [2] предписывают на всех главных и приемоотправочных путях 1–4-х классов укладывать новые или старогодные рельсы типа Р65. Эпюра шпал на путях 1–3-х классов одинаковая, род балласта — также. В качестве основного принят бесстыковой путь на железобетонных шпалах.

Применение бесстыкового пути в СССР по сравнению с зарубежными странами было связано с рядом особенностей: как правило, значительные амплитуды температурных колебаний рельсов (до 115 °С и более), большие осевые нагрузки массового вида экипажей-полувагонов и цистерн, наибольшие в мире абсолютные перевозки пылящих грузов (угля, руды и т.д.), при которых

полностью используется грузоподъемность вагонов и интенсивно засоряется балластный слой.

На наших дорогах до 50-х гг. применялись скрепления костыльного типа и относительно легкие рельсы (до 1956 г. самыми тяжелыми были рельсы Р50). Вышеуказанные климатические, эксплуатационные и хозяйственные особенности заставили практических и научных работников путевого хозяйства искать оригинальные методы решения проблемы применения бесстыкового пути [3].

После Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. практическая укладка и исследования в области бесстыкового пути в значительной мере были связаны с деятельностью М.С. Боченкова.

Михаил Боченков еще будучи студентом НИИЖТа начал исследования работы железнодорожного пути в районах с суровыми климатическими условиями и высокой грузонапряженностью. В период дипломного проектирования М.С. Боченков разработал оригинальную конструкцию бесстыкового пути с непрерывной (автоматической) разрядкой температурных напряжений, а также технологию его укладки.

Такой путь был уложен в 1949 г. на станции Инская. Итоги двухлетней эксплуатации бесстыкового пути такой конструкции были доложены в ЦП МПС. После этого было дано разрешение на укладку бесстыкового пути М.С. Боченкова на главном пути, что и было осуществлено в 1951 г. на перегоне Инская — Издревая.

На этом участке были проведены исследования по установлению работоспособности конструкции, определению угона рельсов по опорам, продольных сил, возникающих при проходе по рельсам подвижного состава. М.С. Боченковым впервые установлено влияние продольной жесткости пути на величину угона рельсов [3, 4].

Положительные результаты исследований бесстыкового пути на опытных участках бывшей Томской дороги, а также стремление производить эксперименты вблизи большого промышленного и научного центра — Москвы послужили основанием для укладки (с 1954 г.) бесстыкового пути с автоматической разрядкой температурных напряжений на участке Московско-Курской дистанции пути.

М.С. Боченков был назначен зам. начальника Московско-Курской дистанции пути по опытным работам.

Плети в бесстыковом пути с непрерывной разрядкой температурных напряжений соединялись друг с другом при помощи уравнильных приборов, так как температурные перемещения каждого конца составляли 50–60 см и более.

В бесстыковом пути с непрерывной разрядкой температурных напряжений рельсовые плети лежали на подкладках практически свободно и при проходе поезда плетью угоняло на величину до 15–20 мм. Поэтому середина плети при помощи пружин соединялась с противоугонным основанием. В момент прохода поезда при продольном смещении рельсов пружины сжимались и давали возможность реализоваться угону. После ухода поезда свободная от колесной нагрузки рельсовая плеть возвращалась пружинами в первоначальное положение. Пружины с одной стороны прикреплялись к подошве рельса, а с другой — упирались в стояки ростверка железобетонного фундамента, установленного в земляном полотне, или в коромысло вала и фундамент при противоугонном устройстве торсионного типа.

В техническом отношении недостатком этой конструкции явилась необходимость наличия возвращающего устройства и уравнильных приборов. Однако эти два элемента создают неоднородность пути и являются неблагоприятными в отношении безопасности движения поездов. Специалисты, занимавшиеся проблемами бесстыкового пути, понимали, что указанные узлы нуждались в улучшении и до их отработки нецелесообразно было переходить к массовой укладке бесстыкового пути этого типа.

Коллективными усилиями научных работников лаборатории бесстыкового пути ВНИИЖТа, вузов, а также производителей был создан в СССР бесстыковой путь температурно-напряженного типа, принципиально отличающийся от применяемого за рубежом. Плетей бесстыкового пути температурно-напряженного типа на наших дорогах имеют длину 800 м. Первоначально плети соединяли друг с другом (как это имело место за границей) с помощью уравнильных приборов острякового типа. М.С. Боченков одним из первых установил, что температурные деформации плетей в течение года не превышают 25–30 мм, и пришел к выводу о целесообразности соединения плетей не при помощи уравнильных приборов, а уравнильных рельсов с болтовыми стыками. Соединение плетей при помощи комплекта уравнильных рельсов проще, дешевле, а главное — надежнее уравнильных приборов. Такой способ соединения плетей позволяет делать разрядку температурных напряжений в любое время, в любых производственных ситуациях, при разнице температур укладки и разрядки до 40 °С. Для отечественных дорог обеспечение возможности при любых условиях выполнять путевые работы, требующие снятия температурных напряжений, являлось очень важным. Поэтому способ соединения плетей при помощи уравнильных рельсов был принят на наших дорогах как типовой.

Диапазон научных интересов М.С. Боченкова был широк и охватывал исследования по работе длинных рельсов, угону пути, разработку нормативов по закреплению пути и др.

При выборе длины плетей полагали, что незначительное число стыков, остающихся в пути при плетях 800 м, не будет существенно влиять на работу бесстыкового пути, а также исходили из наиболее распространенной длины приемоотправочных путей (850 м).

Стремление улучшить работу бесстыкового пути побудило производителей укладывать плети бесстыкового пути свыше нормативной длины (длиной 800–950 м). Реализация увеличения длины плетей сверх нормативной была технически осуществимой и экономически выгодной при применении способа ликвидации мест излома плетей при помощи электроконтактной сварки машинами ПРСМ — методом предварительного изгиба плети [5].

Еще в 2000 г. годовой прирост полигона бесстыкового пути на сети дорог России достиг 2,81 тыс. км. В последующие годы он колебался от 3,14 до 3,76 тыс. км в год (рис. 1). К 01.01.06 протяженность этой конструкции достигла 63,17 тыс. км, что составило 51,6 % длины главных путей.

Полигон бесстыкового пути в последние годы, в том числе и в 2006 г., расширялся преимущественно за счет северных территорий европейской части России, а также Сибири и Дальнего Востока.

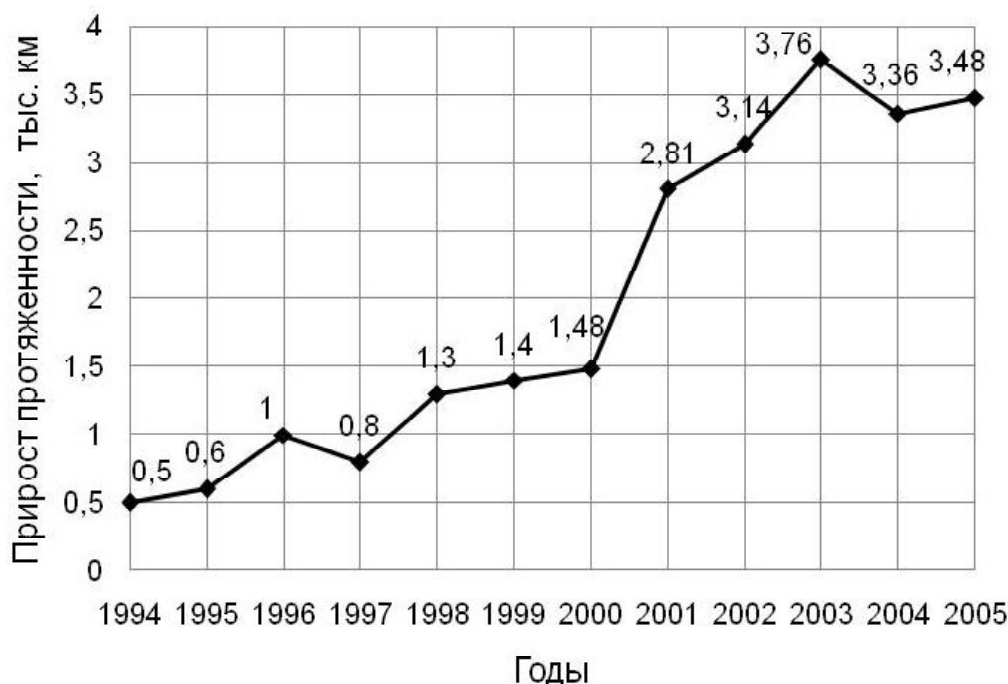


Рис. 1. Прирост протяженности бесстыкового пути

Наиболее слабым местом бесстыкового пути, где наблюдается его быстрое расстройство, повышенный выход рельсов, элементов промежуточных креплений, шпал, образование выплесков, являются уравнильные пролеты и примыкающие к ним «дышащие» участки плетей. Длина «дышащего» участка плети при содержании пути в соответствии с существующими требованиями в европейской части России не должна превышать 50–60 м, а на дорогах Сибири и Дальнего Востока — 80–90 м. Однако в реальных условиях она может достигать соответственно 70–90 м и 120–150 м. Это объясняется не только быстрым расстройством стыковых и промежуточных креплений, интенсивным выходом подрельсовых и нашпальных прокладок в зоне уравнильных пролетов и на подвижных участках плетей, но и большими суточными и годовыми амплитудами температуры рельсов [6].

Все это подтверждает опыт эксплуатации. Выход рельсов из строя в зонах уравнильных пролетов в расчете на 1 км в 10–12 раз выше, чем на 1 км плетей. Интенсивность ослабления креплений, повреждение амортизирующих прокладок, излом подкладок в 2,0–2,2 раза, а в самих стыках в 5–7 раз больше. Выплески появляются примерно в 3 раза быстрее. В целом затраты труда на текущее содержание указанных зон и концов плетей при их протяженности 12–15 % составляют в разных условиях от 40 до 70 %, что на единицу длины в 4–12 раз больше, чем на плетях [7].

И еще один показатель. Доля сходов порожних вагонов в кривых участках бесстыкового пути в период 1999–2006 гг. составила 6 % при средней доле его протяженности на сети дорог в этот период 37 %, т.е. на единицу длины сходы случались в 10 раз реже по сравнению со звеньевым путем на деревянных шпалах.

Кардинальное решение проблемы — увеличение длины плетей. Однако все уравнильные пролеты сразу не ликвидируешь, да и не везде это пока

целесообразно. Дороги постоянно наращивают объемы увеличения длины плетей электроконтактной сваркой. При этом как вновь укладываемые, так и эксплуатируемые плети длиной до 800 м сваривают в плети длиной до блок-участка и перегона.

Преимущества бесстыкового пути заключаются и в укладке плетей на железобетонных шпалах. Это обеспечивает практическое отсутствие негодных шпал; невозможность напрессовки льда и грязи между подошвой рельса и подкладкой, раскантовки рельса; большую сопротивляемость появлению неисправностей рельсовой колеи в плане; лучшую стабильность ширины колеи; увеличение межремонтных сроков.

Однако, как и у любой конструкции, помимо плюсов есть у бесстыкового пути и минусы, которые могут проявиться при непонимании или пренебрежении особенностями его укладки и содержания.

В бесстыковом пути наиболее опасны изломы плетей. С 1999 г. по 2004 г. их количество на 1000 км сократилось с 3,6 до 1,7 (рис. 2), хотя этот показатель не утешительный. Отмеченное произошло прежде всего за счет уменьшения числа изломов из-за коррозии подошвы рельсов (дефект 69) — с 80 в 1999 г. до 38 в 2004 г. Почти на прежнем уровне осталось число изломов по дефектам сварки и контактно-усталостным повреждениям.

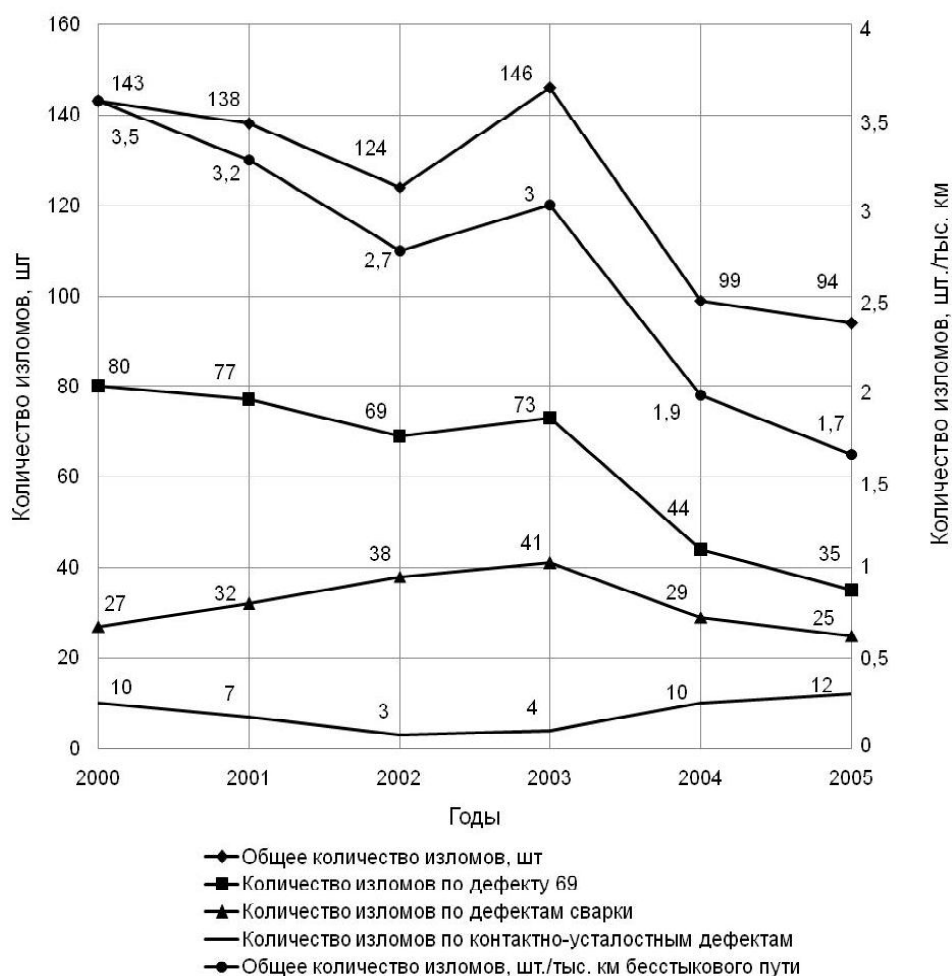


Рис. 2. Изменение числа изломов плетей

Для уменьшения изъятия рельсов по контактно-усталостным дефектам и предотвращения изломов плетей в каждом РСП целесообразно внедрить установки, обеспечивающие отбраковку рельсов по неметаллическим включениям. Чтобы предупредить изломы из-за коррозии подошвы, на первом этапе нужно повысить качество ее дефектоскопирования, затем создать более надежные средства выявления дефекта 69, а потом устранить и саму причину коррозии. Для этого, например, полезно рассмотреть возможность перехода от объемной закалки всего рельса к закалке только головки.

Из 59 рассматриваемых изломов (выборка) 36 % произошло при перепадах температур относительно температуры закрепления 0–30 °С, т.е. практически в теплую погоду, если учесть, что температура закрепления равна 25–35 °С; 27 % изломов приходится на перепады температур от 31 до 40 °С и 17 % — от 41 до 50 °С. Да и остальные изломы случились при перепадах температур, не превышающих 70 °С. Все это дополнительно подтверждает, что основной причиной изломов по сварному стыку являются не минусовые температуры, а дефекты сварки. Морозы лишь ускоряют развитие «заложенного» при сварке дефекта.

Еще одна крайне важная особенность этой конструкции — возможность потери продольной устойчивости рельсошпальной решетки, так называемого выброса. Выброс — почти мгновенный (около 0,2 с) изгиб путевой решетки, как правило, в горизонтальной плоскости под воздействием продольных сжимающих сил, которые выше критических. (Выброс может быть и на звеньевом пути при накоплении «нулевых» стыковых зазоров.)

Теория выброса изложена в научной и учебно-методической литературе [8]. Остановимся на ряде практических мер обеспечения устойчивости бесстыкового пути.

На прямых участках выброс может произойти при увеличении температуры рельса по сравнению с температурой закрепления Δt_y примерно на 50 °С. В кривых это допускаемое превышение температуры меньше и зависит от радиуса (при $R = 350$ м $\Delta t_y = 30$ °С).

Фактически Δt_y может оказаться меньше указанных нормативных значений в следующих случаях. Во-первых, при затяжке скреплений с усилием менее 50–60 кН·м на протяжении более 150–200 м. В этом случае возможен местный угон рельсов с концентрацией продольных сил и сжимающих напряжений на локальных отрезках плетей (рис. 3). Угон должен быть своевременно выявлен по маячным шпалам. Во-вторых, при недостатке балласта как по торцам шпал, так и в шпальных ящиках. В-третьих, при резких отступлениях положения рельсошпальной решетки в плане (углы), которые могут послужить очагом выброса.

Согласно исследованиям ВНИИЖТа, выброс происходит перед поездом или сразу после его прохода. Очевидно, что сдвинуть решетку, на которой находятся вагоны и локомотив, на порядок сложнее, чем свободно лежащую. Наиболее опасен участок перед локомотивом, когда к действующим продольным температурным силам добавляется продольная от движения поезда, а также вибрация пути и обратная волна, т. е. приподнимание рельса на доли миллиметра на этом участке. Поэтому при выбросе, который случается практически в момент концентрации сдвигающих воздействий (т. е. непосредственно перед поездом, но

не под ним), сходят с рельсов, как правило, локомотив или первые 4–5 вагонов. Если сошел вагон в середине или хвосте состава и на пути имеется изгиб рельсошпальной решетки, то это не выброс, а ее сдвиг сверхнормативным воздействием вагона.

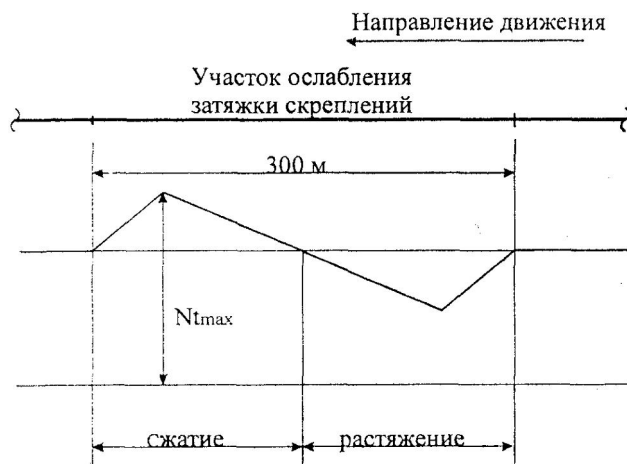


Рис. 3. Перераспределение продольных сил в плети на участке угона

Заканчивая рассмотрение «рельсового вопроса», необходимо отметить, что термоупрочненные рельсы Р65 вполне отвечают условиям эксплуатации бесстыкового пути на дорогах России при соблюдении следующих требований:

- применение для наружных нитей кривых радиусом 500 м и менее плетей, сваренных из рельсов повышенной износостойкости — Р65К (заэвтектоидных);
- использование в регионах Сибири и Дальнего Востока рельсов Р65 низкотемпературной надежности;
- высококачественная сварка;
- своевременная и высококачественная шлифовка.

Успешная эксплуатация бесстыкового пути и расходы на его содержание во многом зависят от качества рельсовых скреплений. В настоящее время на сети дорог России используют четыре типа скреплений на железобетонных шпалах. Это раздельное КБ-65 с жесткими клеммами ПК, применяемое около 50 лет, бесподкладочные с пружинными клеммами — ЖБР-65 с болтовым и шурупным креплением клемм, анкерное безболтовое АРС-4 и подкладочное упругое крепление КН-65. Скрепления ЖБР-65 и АРС-4 начали широко внедрять в последние 5 лет. Их оценка неоднозначна как у конструкторов и исследователей, так и у путейцев-эксплуатационников.

Недостатки скрепления КБ хорошо известны: многодетальность, высокая металлоемкость, большой разброс ширины колеи, малый срок службы резиновых прокладок, плохая работа в кривых. Кроме того, требуют постоянного обслуживания резьбовые соединения (около 15 тыс. на 1 км), при несоблюдении этого условия нарушается температурный режим бесстыкового пути.

Скрепление КБ-65, прообразом которого послужило немецкое крепление «К», выполнило свою функцию и устарело минимум на 20 лет.

Первые серьезные попытки внедрить упругое крепление на железобетонных шпалах предприняли в 70-х гг. прошлого столетия, когда разработали и уложили в путь скрепления типа ЖБ, ЖБР (аналоги французского скрепления RN),

клеммы «Краб» в креплении КБ. По совокупности характеристик все они не удовлетворяли условиям эксплуатации.

Второй этап — начало 90-х гг., когда попробовали наладить производство клеммы ОП-105 — аналога Skl-12 — сначала в Магнитогорске, а затем в Брянске. Попытка обойти патент Vossloh по конфигурации клеммы и незнание ноу-хау изготовления не позволили до настоящего времени создать надежную конструкцию. Нельзя назвать полностью удачным опыт выпуска этой клеммы, также без участия патентовладельца, в Белоруссии. В этот период уложили опытную партию шпал со креплением типа АРС на Юго-Восточной дороге.

Третий этап — 1998 г. — начало освоения ЖБР-65 с переходом на массовое внедрение в 2001 г.

Главный вывод, вытекающий из краткого исторического экскурса, — упругое крепление совсем не простая конструкция. Нужны целенаправленные исследования как в области взаимодействия пути и подвижного состава, так и технологии изготовления [9].

В противовес описанному опыту следует отметить успехи некоторых зарубежных фирм, которые захватили практически весь мировой рынок сбыта упругих креплений. Это, в первую очередь, фирмы Vossloh и Pandrol. Они десятилетиями работают в этом направлении, имеют собственные конструкторские, научно-исследовательские подразделения, испытательную базу. Их изделия применяются почти во всех климатических поясах, при всех скоростях, грузонапряженностях, осевых нагрузках.

Одна из наиболее известных отечественных конструкций — крепление АРС, появившееся также благодаря целенаправленной кропотливой работе в течение не одного десятка лет; это лишний раз подтверждает, что создание упругого крепления требует самого серьезнейшего подхода.

Новые конструкции промежуточных рельсовых креплений

Сегодня в России разработаны и находятся на разных стадиях внедрения несколько конструкций упругих промежуточных креплений с упругими клеммами (табл. 1): КБ-65, ЖБР-65, ЖБР-65П, АРС-4, КН-65, КН-65ШД, КНУ-65, КНУ-65ШД и другие.

Для широкого внедрения подготовлены наиболее перспективные крепления — ЖБР-65, АРС-4, КН-65.

Таблица 1

Характеристика конструкций промежуточных креплений

Показатель	Тип крепления				
	КБ-65	ЖБР-65	АРС-4	КН-65	КН-65 ШД
1. Количество резьбовых соединений, шт.	4	2	—	2	2
2. Общее количество деталей в комплекте крепления, шт.	23	17	10	17	11
3. Количество металлических деталей, шт.	19	12	5	11	7
4. Масса узла крепления, кг	13	8,5	8,4	12,3	12
5. Масса металлических деталей, кг	12,1	7,7	7,4	11,2	10,8
6. Регулировка по высоте, мм	12	10	20	10	10

Бесподкладочное крепление с упругой прутковой клеммой ЖБР-65. В отличие от известных зарубежных аналогов (Skl-8, Skl-14) конструкция крепления ЖБР-65 приспособлена к отечественным условиям производства, эксплуатации и текущего содержания.

Модернизацией крепления ЖБР-65 являются шурупно-дюбельный вариант ЖБР-65ШД и подкладочный вариант ЖБР-65П.

Скрепление КН-65 (рис. 4) подкладочное, имеющее упругие пружинные клеммы, предназначено для укладки в прямых и кривых участках бесстыкового пути и на участках с высокими осевыми нагрузками от подвижного состава. Технологично и экономично в изготовлении (используются детали типового крепления КБ-65, при этом ликвидированы 2 трудоемких паза в реборде, 2 клеммных болта и их пружинные шайбы и гайки).

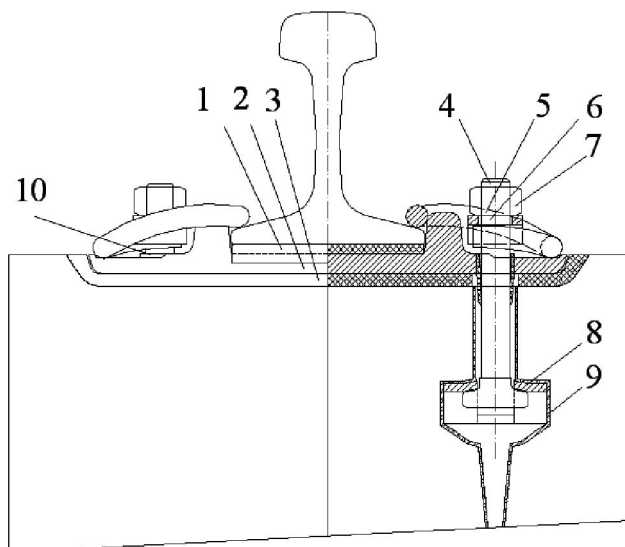


Рис. 4. Скрепление КН-65:

1 — упругая подрельсовая прокладка; 2 — металлическая подкладка; 3 — напшальная прокладка; 4 — закладной болт; 5 — упругая прутковая клемма; 6 — скоба; 7 — гайка; 8 — шайба седловидная; 9 — изолирующий пустообразователь; 10 — заглушка резиновая

В разработке и внедрении этого крепления приняли участие работники СГУПС: профессор Н.И. Карпущенко, доценты Н.И. Антонов, Д.В. Величко и специалисты Горновского завода спецжелезобетона В.А. Отмахов и А.Я. Михин. Экономическая эффективность его применения в типовой конструкции бесстыкового пути за межремонтный цикл составляет не менее 400 тыс. р./км на грузонапряженных участках.

В 2003 г. проведены усталостные испытания креплений КН-65 на стенде «АПАТЭК» испытательного центра ЦАГИ в г. Жуковский. Результаты испытаний обоих узлов креплений под нагрузкой 12 т в условиях, моделирующих взаимодействие бесстыковой рельсовой нити с грузовым составом в крутой кривой радиусом 350 м при наработке 5,5 млн циклов, оказались весьма положительными. Все детали после окончания испытаний оказались целыми. Ослабление затяжки болтов было незначительным.

С 2002 г. крепление проходит полигонные испытания на Экспериментальном кольце ВНИИЖТа, к осени 2006 г. на участке со креплением КН-65 пропущено 800 млн т бр. Скрепления находятся в хорошем состоянии. Ширина колеи — в пределах допусков, прижатие рельсов к шпалам стабильно, угон пути отсутствует, рельсовые цепи работают безотказно.

К 2007 г. на Западно-Сибирской железной дороге было уложено 126 км пути со креплением КН-65, в том числе на Среднесибирском и Транссибирском направлениях.

Скрепление уменьшает динамические силы взаимодействия пути и подвижного состава, за счет этого экономия затрат на выправку пути в плане и профиле, обеспечивает снижение периодичности подтягивания болтов не менее чем в 2 раза.

На опытных участках, уложенных на Западно-Сибирской дороге со креплением КН-65, получены данные (наблюдения проводились совместно с путеобследовательской станцией ПС-1), свидетельствующие о хорошем состоянии пути. Ширина колеи находится в пределах допуска, прижатие рельсов к шпалам стабильное, угона пути нет, рельсовые цепи работают безотказно.

В 2006 г. комиссия ЦП ОАО «РЖД» признала крепление КН-65 выдержавшим приемочные испытания. Конструкторской документации присвоена литера «А».

В 2007 г. проведено комиссионное обследование участков пути со креплением КН на ЗСЖД. Комиссия ЦП ОАО «РЖД» на основании анализа материалов эксплуатационных, полигонных испытаний и личного изучения работы крепления сделала вывод, что это крепление является надежной, стабильной в эксплуатации и весьма технологичной при производстве путевых работ конструкцией. Западно-Сибирской железной дороге поручено подготовить предложения для ЦП ОАО «РЖД» по освоению массового производства этого крепления для укладки в различных эксплуатационных условиях.

Дальнейшая модернизация креплений КН-65 заключается в совершенствовании формы металлической подкладки (рис. 5), а также в коренном совершенствовании крепления — разработке перспективного крепления КНУ-65, шурупно-дюбельных вариантов КН-65ШД (рис. 6) и КНУ-65ШД.

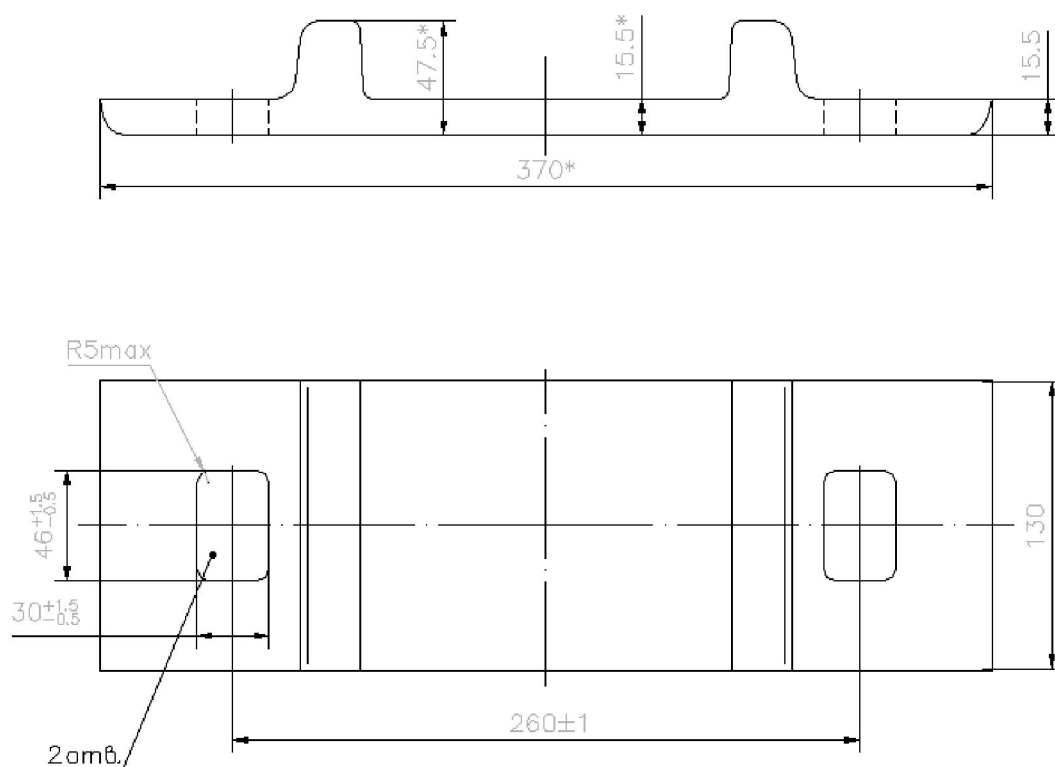


Рис. 5. Модернизированная подкладка КН

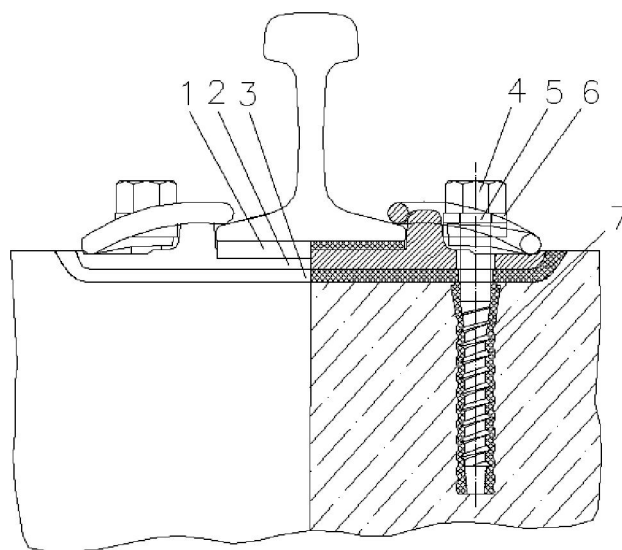


Рис. 6. Скрепление КН-65ШД:

1 — подрельсовая прокладка; 2 — подкладка металлическая; 3 — нашьпальная прокладка; 4 — шуруп путевой; 5 — пружинная прутковая клемма; 6 — скоба прижимная; 7 — дюбель

Анализ многочисленных конструкций рельсовых креплений на железобетонных шпалах показал, что актуальной остается задача повышения надежности и долговечности рельсовых креплений. Развитие промежуточных рельсовых креплений с упругими элементами происходит в направлении совершенствования и внедрения подкладочных, бесподкладочных, анкерных, а в перспективе безболтовых и безрезьбовых конструкций рельсовых креплений.

Сравнительные полигонные испытания креплений

На Экспериментальном кольце ВНИИЖТа (ст. Щербинка) продолжают сравнительные полигонные испытания опытных участков звеньевое пути с рельсовыми креплениями АРС-4, КБ-65, ЖБР-65, КН-65, ЖБР-65П, КНУ-65. Здесь осуществляется движение опытного состава массой около 10 тыс. т с осевыми нагрузками до 300 кН при установленной скорости движения 70 км/ч.

Опытный участок пути имеет следующие основные характеристики: рельсы типа Р65 длиной 25 м; железобетонные шпалы с эпюрой 2000 шт./км; щебеночный балласт; круговая кривая $R = 400$ м; уклон $i = +1,4$ ‰; участок разбит на опытные микроучастки протяженностью по 50 м: АРС-4, КБ-65, ЖБР-65, КН-65, а также опытные микроучастки КНУ-65 — 25 м, ЖБР-65П — 12,5 м.

На момент осмотра наработка тоннажа по участкам АРС-4, КБ-65, ЖБР-65, КНУ-65 составила 786,0 млн т брутто, КН-65 — 554,3 млн т брутто, ЖБР-65П — 486,2 млн т брутто.

Основные показатели, полученные после пропуска по опытным участкам тоннажа 800 млн т брутто, приведены в табл. 2 и 3.

Таблица 2

Основные показатели работы креплений

Показатель		Участки с наработкой тоннажа 800 млн т бр.				Участки с наработкой тоннажа 500 млн т бр.	
		АРС-4	КБ-65	ЖБР-65	КНУ-65	КН-65	ЖБР-65П
Длина участка, м		50	50	50	50	25	12,5
Средняя ширина колеи, мм	0 млн т	1524,2	1525,6	1521,6	1521,0	1523,9	1524,2
	500 млн т	1538,5	1538,6	1532,5	1529,9	1529,0	1529,5
	800 млн т	1532,9	1534,1	1532,8	1528,1	—	—
Среднеквадратическое отклонение	0 млн т	0,98	0,66	1,80	1,72	1,11	1,25
	500 млн т	2,23	2,41	4,65	2,69	3,21	0,76
	800 млн т	2,34	2,06	2,82	2,86	—	—
Средняя подуклонка рельсовых нитей	наружная	1/29,6	1/23,8	1/25,9	1/21,3	1/21,2	1/27,8
	внутренняя	1/29,0	1/27,5	1/22,7	1/26,6	1/22,2	1/22,0

Таблица 3

Ведомость отказов элементов пути за весь период сравнительных полигонных испытаний рельсовых креплений, имеющих наработку тоннажа 800 млн т бр.

Наименование элементов рельсовых креплений	Тоннаж, млн т брутто	Отказы элементов рельсовых креплений							
		АРС-4 (50 м)		КБ-65 (50 м)		ЖБР-65 (50 м)		КНУ (25 м)	
		шт.	%	шт.	%	шт.	%	шт.	%
Клеммы	100	4	1	0	0	1	1	0	0
	500	4	1	1	1	4	1	1	1
	800	7	2	1	1	5	2	1	1
Подрельсовые прокладки	100	7	4	11	6	13	7	Не осматривались	
	500	82	41	251	126	243	122		
	800	106	53	274	137	339	170		
Анкеры	100	0	0	Нет				Нет	
	500	0	0						
	800	1	1						
Изолирующие уголки АРС-4 (наружные)	100	200	100	Нет				Нет	
	500	941	471						
	800	1110	555						
Нашпальные прокладки КБ	100	Нет		91	46	Нет		0	0
	500			621	311			0	0
	800			753	377			0	0
Упругие прокладки ЖБР-65 (наружные)	100	Нет				169	85	Нет	
	500					259	130		
	800					298	149		
Металлические подкладки	100	Нет		0	0	Нет		3	4
	500			12	6			5	6
	800			20	10			7	9
Железобетонные шпалы	100	1	1	6	6	32	32	1	2
	500	2	2	9	9	36	36	1	2
	800	4	4	11	11	45	45	1	2

Анализ данных табл. 2 и 3 показывает, что в крутой кривой ширина рельсовой колеи меньше расстраивается на участках с подкладочными креплениями. Наиболее стабильной она оставалась на участках КНУ-65, КН-65 и ЖБР-65.

Подуклонка рельсовых нитей также стабильнее на участках с подкладочными креплениями, в первую очередь, со креплением КН-65. Более интенсивное изменение подуклонки в бесподкладочных креплениях связано с их меньшей жесткостью и интенсивным износом подрельсовых прокладок.

На всех сравниваемых участках пути происходили отказы элементов в узлах креплений. Очень большое количество отказов произошло на участках: АРС-4 — 1223 (в основном — изолирующие уголки), КБ-65 — 1048 (нашпальные прокладки), ЖБР-65 — 647 (упругие и подрельсовые прокладки).

Значительно меньше отказов произошло на участках подкладочных креплений, в том числе: КНУ-65 — 8 шт. (участок протяженностью 25 м), ЖБР-65П (12,5 м) — 12 шт., КН-65 (50 м) — 95 шт. При этом участки КН-65 и ЖБР-65П имеют наработку тоннажа примерно 500 млн т.

Следует отметить, что состояние элементов креплений существенно зависит от применяемых подрельсовых и наспальных прокладок. Лучше всех отработали резинокордовые и армированные полимерными волокнами прокладки производства ООО «Союзспецмаш» (г. Барнаул). Например, за весь период испытаний (800 млн т) в креплении КНУ-65 не зафиксировано ни одного отказа наспальной прокладки данного производителя.

Анализ сравнительных полигонных испытаний рельсовых креплений с упругими клеммами показал хорошую надежность подкладочных вариантов — креплений КН-65 и КНУ-65.

Сравнение креплений по интегральным критериям

Выбор интегральных параметров рельсовых креплений на стадии проектирования или модернизации является сложной задачей. Имеющиеся ограничения на ряд параметров и наличие неоднозначных связей между ними и показателями динамических качеств приводят к процедуре отыскания некоторых компромиссных значений этих параметров. Определение оптимальных величин указанных параметров может быть выполнено с помощью различных методов. Следует, однако, иметь в виду, что при выборе оптимальных параметров рельсовых креплений необходимо учитывать ряд параметрических и функциональных ограничений, определяющих границы изменения как оптимизируемых параметров, так и вспомогательных критериев оптимизации.

Оптимальные значения параметров сообщают некоторой целевой функции минимальное значение.

Если оптимизируемая система имеет несколько частных независимых критериев, то многокритериальную задачу часто сводят к однокритериальной путем введения обобщающего критерия. Используя принцип справедливой абсолютной уступки [10], можно составить аддитивный критерий оптимальности $F(\bar{x})$ в виде взвешенной суммы нормированных частных критериев:

$$F(\bar{x}) = \sum_{i=1}^m \lambda_i U_i(\bar{x}), \quad (1)$$

где λ_i — весовой коэффициент i -го критерия; $U_i(\bar{x})$ — нормированный частный критерий данной системы; m — число частных критериев.

Различная значимость частных критериев учитывается с помощью весовых коэффициентов или коэффициентов важности λ_i , причем

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i = 1.$$

Обоснованное определение λ_i связано с серьезными трудностями и обычно сводится к экспертной оценке λ_i .

Дальнейшая оптимизация параметров рельсовых креплений производится на основе отыскания паретовского (по имени В. Парето) множества решений и ранжирования его по критерию суммарных допустимых потерь:

$$F_j = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \tilde{U}_i^2},$$

где $\tilde{U}_i$ — приведенные значения i -го частного критерия в j -й эффективной или паретовской точке,

$$\tilde{U}_i = \frac{U_i - U_i^*}{U_i^{**} - U_i^*},$$

$U_i^* = \min U_i$ и $U_i^{**} = \max U_i$ — минимально и максимально допустимые значения i -го частного критерия; для нормированных критериев $U_i^{**} = [U_i]$, здесь $[U_i]$ — допустимые по нормам значения соответствующего частного критерия; m — количество частных критериев оптимизации.

При оптимизации параметров рельсовых креплений задача сводится к выбору n таких значений x_i ($i = 1, 2, \dots$) параметров, которые должны обеспечить минимум всех частных критериев оптимизации. При этом целевая функция $F(\bar{x})$ будет векторной:

$$F(\bar{x}) = \bar{F}[U_1(\bar{x}), \dots, U_m(\bar{x})], \quad (2)$$

минимизация которой заключается в определении

$$U_i(\bar{x}) \rightarrow \min_{\bar{x} \in D}, i = 1, 2, \dots, m,$$

где D — множество допустимых значений переменной $\bar{x} = (x_1, \dots, x_n)$, определяемой в общем случае системой равенств и неравенств:

$$D: \begin{cases} h_j(\bar{x}) = 0, j = 1, \dots, l; \\ g_j(\bar{x}) \geq 0, j = l + 1, \dots, p. \end{cases}$$

Решение многокритериальной задачи, вообще говоря, не однозначно и лежит на так называемом переговорном множестве Парето [6]. Считается, что точка с координатами $\bar{X}'$, безусловно, лучше, чем точка с координатами $\bar{X}$, если при всех $i = 1, 2, \dots, m$ выполняется условие (2) и хотя бы при одном значении имеет место строгое равенство. Если же не существует точки, безусловно, лучшей, то точка называется эффективной или паретовской, а также нехудшей точкой. Нахождение множества Парето при значительном числе критериев представляет собой сложную задачу.

Для получения однозначного решения свертка частных критериев $U_i(\bar{x})$ на полученном паретовском множестве производится с помощью критерия суммарных допустимых потерь в соответствии с (1) или (2).

Ранжируя точки в порядке возрастания на каждом этапе оптимизации, выделим на паретовском множестве подмножество лучших (в смысле $F_j \rightarrow \min$) решений. После этого переходим к однокритериальной оптимизации по основным критериям $U_i(\bar{x})$ ($i = 1, \dots, m_i$), где m_i — количество основных критериев с использованием целевой функции (2) и зависимости (1).

Для апробации представленной методики проведем расчет рациональных параметров рельсовых креплений для железобетонных шпал КБ-65, ЖБР-65, АРС-4, КН-65 и КНУ-65.

Показатели эффективности рельсовых креплений см. в табл. 4. Такой набор параметров можно рассматривать как наиболее полный из множества учитываемых при проектировании и эксплуатации показателей.

Таблица 4

Показатели эффективности рельсовых креплений

Критерий эффективности	Диапазон изменения критерия	Тип креплений				
		КБ	ЖБР	АРС	КН	КНУ
1. Расчетные нагрузки на узел крепления, кН						
1.1. Вертикальная от подвижного состава	70–100	100	70	70	100	100
1.2. Поперечная от подвижного состава	50–70	60	50	50	60	70
1.3. Монтажная на подошву рельса	20–30	25	25	20	20	25
1.4. Погонное сопротивление перемещениям, кН/м	20...30	25	20	20	20	25
2. Стабильность						
2.1. Точность сборки рельсошпальной решетки, проц.	90–100	85,5	90,9	97,2	86	90
2.2. Стабильность сохранения ширины колеи (уширение в мм на 100 млн т)	1...2	19	14	17	2,5	2
2.3. Стабильность натяжения прикрепителей (ослабление на 100 млн т бр.)	20–25	50	25	25	25	20
3. Надежность, доли						
3.1. Схемная надежность	0,90–1,0	0,99	0,90	0,98	0,97	0,99
3.2. Наименьшая надежность элементов	0,80–1,0	0,95	0,80	0,80	0,97	0,99
3.3. Сохранность при сходе колес с рельсов	0,5–0,8	0,8	0,6	0,5	0,75	0,8
4. Пространственная жесткость, кН/мм						
4.1. Вертикальная	40–80	60	40	40	50	60
4.2. Горизонтальная по головке рельса	20–30	20	25	25	20	20
4.3. Горизонтальная по подошве рельса	30–35	30	40	60	30	30
4.4. Жесткость клеммы (двухвитковой шайбы) в диапазоне 10–25 кН	5–10	15	6	6	9	8,5
5. Технологичность и экономическая эффективность						
5.1. Технологичность при изготовлении, баллы	1–5	3	3	2	4	4
5.2. Технологичность при сборке РШР, баллы	1–5	5	2	5	4	4
5.3. Технологичность при смене рельсов и разрядке напряжений, баллы	1–5	5	2	2	4	4
5.4. Регулировка рельсов по высоте, мм	10–15	10	10	15	10	15
5.5. Экономическая эффективность за межремонтный период, баллы	1–5	1	3	2	3	4

Результаты многокритериальной оптимизации, где паретовские решения определены как частные критерии оптимизации по пяти параметрам для пяти рельсовых креплений, представлены в табл. 5.

Таблица 5

Результаты оптимизации параметров рельсовых креплений

Параметр	Паретовские решения (частные критерии) для креплений				
	КБ	ЖБР	АРС	КН	КНУ
1. Расчетные нагрузки на рельс	0,742	0,316	0,5	0,5	0,707
2. Стабильность	0,235	0,414	0,77	0,37	0,535
3. Надежность	0,889	0,192	0,462	0,797	0,951
4. Пространственная жесткость	0,126	0,606	0,684	0,764	0,592
5. Технологичность и экономическая эффективность	0,707	0,391	0,661	0,645	0,806
Целевая функция $F(\bar{x})$	0,540	0,384	0,616	0,615	0,718

Анализ частных критериев, входящих в целевую функцию, показывает, что по восприятию расчетных нагрузок на узел крепления лучшими являются КНУ и КБ. По стабильности сохранения параметров рельсовой колеи лучшие — крепления АРС и КНУ, а по показателям надежности лучшими оказались крепления КНУ, КБ и КН.

Пространственная жесткость узла крепления характеризуется многими неоднозначными показателями. Паретовские решения продемонстрировали примерно одинаковые частные критерии для всех креплений, за исключением КБ. Для этого крепления не приемлема высокая жесткость двухвитковых шайб в

диапазоне нагрузок 10–25 кН по осям монтажных болтов. Это один из главных недостатков крепления КБ.

По технологичности изготовления, монтажа, эксплуатации и экономической эффективности лучшими оказались крепления КНУ и КБ.

Решая задачу однокритериальной оптимизации и используя при этом паретовские решения, определим целевую функцию как векторный функционал из 20 частных критериев. Лучшим по всем указанным критериям является крепление КНУ-65 (рис. 7).

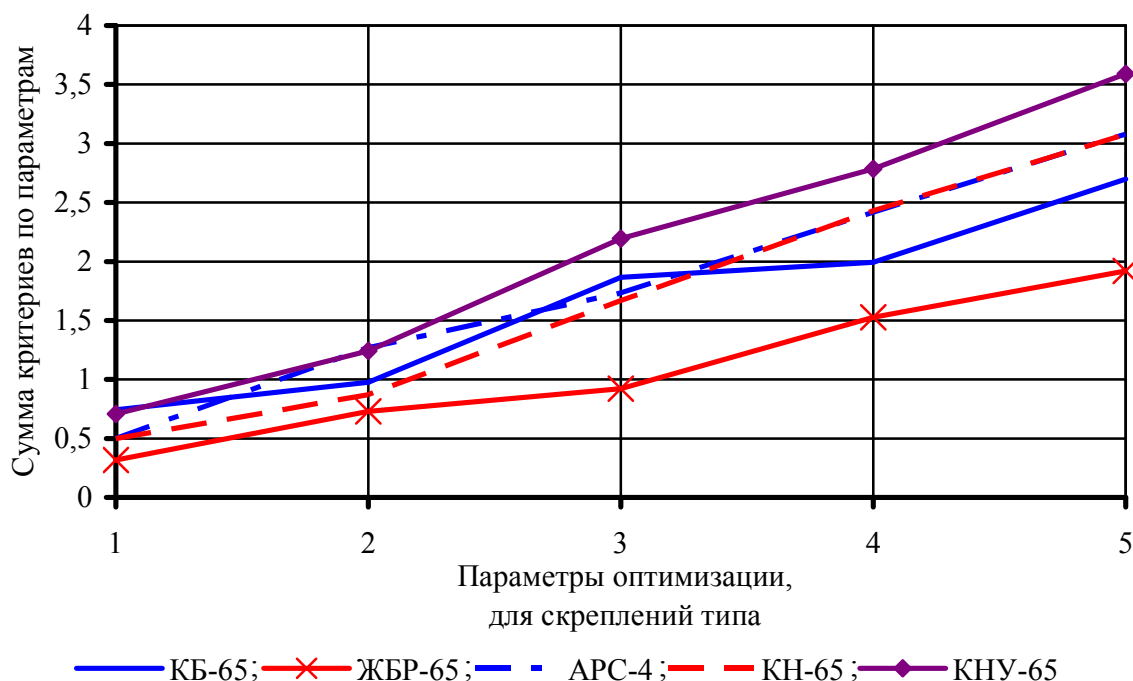


Рис. 7. Сравнение критериев оптимизации рельсовых креплений

Анализ существующих промежуточных рельсовых креплений с упругими клеммами показал основные тенденции в развитии этих элементов конструкции пути.

Скрепления с упругими прутковыми клеммами, безусловно, эффективнее в сравнении со креплением КБ-65.

Наиболее перспективными креплениями на сегодняшний день являются ЖБР-65, АРС-4, КН-65 и КНУ-65 и их варианты.

Одним из основных критериев при выборе упругого рельсового крепления для применения в составе бесстыковой конструкции является надежность, как отдельных элементов, так и всей конструкции в целом.

Критерию надежности в наибольшей степени отвечают крепления подкладочного типа, в частности, крепления КН-65 и КНУ-65.

**Динамические свойства упругих материалов, используемых в
конструкциях верхнего строения пути с улучшенными упругими и
демпфирующими свойствами**

Наиболее точные и достоверные характеристики элементов верхнего строения пути можно получить в результате анализа результатов лабораторных и натурных испытаний, однако существуют аналитические методы, позволяющие оценить основные динамические параметры на стадии проектирования и подготовки к натурным испытаниям.

Наиболее распространенными материалами, используемыми для упругих элементов верхнего строения пути, являются натуральная резина и полимеры. Основные параметры, используемые при динамических расчетах, — жесткости при сжатии, при сдвиге и коэффициенты демпфирования. Излагаемые здесь результаты применимы к прямоугольным в плане прокладкам. Таким образом, представленные ниже формулы можно использовать для определения характеристик подрельсовых, напшальных и подпшальных прокладок.

Одной из основных характеристик синтетической или натуральной резины является модуль сдвига. Для большого количества изделий из резины, применяемых в технике, при постоянных нагрузках или деформациях (для оценочных расчетов) можно принять модуль сдвига $G = 1 \pm 0,2$ МПа. Для динамических нагрузок динамический модуль примерно на 30–50 % больше.

Как правило, упругие характеристики изделий, изготовленных из синтетических материалов, задаются фирмами-изготовителями, тем не менее, представим методику определения упругих свойств прокладок и резиновых опор, которую можно использовать на стадии проектирования.

Горизонтальная жесткость прокладки C_h

Резиновая прокладка может быть представлена как слой, работающий на сдвиг. Поэтому необходимо учитывать горизонтальную жесткость:

$$C_h = \frac{GA}{h}, \quad (3)$$

где G — модуль сдвига; A — площадь слоя резины; h — толщина слоя резины или высота опоры.

Вертикальная жесткость резинового слоя C_z

Вертикальная деформация слоя резины представляет собой сумму перемещений вследствие сдвиговых деформаций и изменения объема резины. Эти два перемещения соответствуют двум упругим элементам, соединенным последовательно, с жесткостями, равными, соответственно, $C_z(\gamma)$ и $C_z(V)$, тогда эффективная жесткость равна:

$$C_z = \frac{C_z(\gamma)C_z(V)}{C_z(\gamma) + C_z(V)}, \quad (4)$$

где $C_z(\gamma)$ — вертикальная жесткость слоя резины без изменения объема, вычисляемая как

$$C_z(\gamma) = 6GS2A/h, \quad (5)$$

S — площадь нагруженной поверхности/площадь ненагруженной боковой деформируемой поверхности — коэффициент формы. Для прямоугольных в плане прокладок или опор (рис. 8) коэффициент формы определяется выражением

$$S = \frac{ab}{2t(a+b)}; \quad (6)$$

$C_z(V)$ — вертикальная жесткость опоры без сдвиговых смещений, вычисляемая по формуле

$$C_z(V) = kA/h, \quad (7)$$

где k — модуль объемного сжатия резины.

Таким образом,

$$C_z(\gamma) = 6GS2Ak/(6GS2 + k) h. \quad (8)$$

Типичные синтетические материалы, используемые для изготовления опор и прокладок, имеют модуль объемного сжатия в пределах 2000...3000 МПа. Учет изменения объема резины при сжатии уменьшает жесткость опор до 20 %.

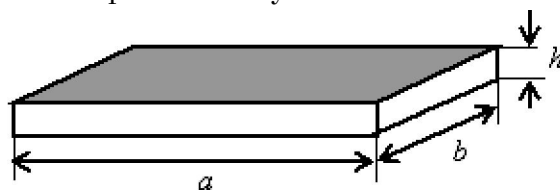


Рис. 8. Схема упругой прокладки

Демпфирующие свойства прокладок

Коэффициент демпфирования (безразмерный коэффициент демпфирования) ξ — отношение между действительным и критическим демпфированием; критическое демпфирование — это граничное демпфирование, при котором процесс перестает быть колебательным. Обычно принимается, что резина обладает вязко-упругими свойствами, т. е. демпфирование зависит от скорости деформации. Обычные прокладки имеют коэффициент демпфирования на уровне 5–10 % от критического.

Эксперименты, выполненные различными исследователями, показывают, что для большинства циклически нагружаемых материалов энергия, поглощаемая за цикл, не зависит от частоты в широком диапазоне частот. В этом случае используется понятие комплексного модуля упругости:

$$G^* = G' + iG'' = |G| (1 + itg\delta) = |G| (1 + i\gamma), \quad (9)$$

где $tg\delta = \frac{G''}{G'}$ — коэффициент потерь (тангенс угла потерь); $i = \sqrt{-1}$ — мнимая единица.

Использование понятия комплексной жесткости в задачах вибрации конструкций представляется удобным потому, что для учета демпфирования необходимо в представленных выше уравнениях умножить параметры, определяющие жесткости, на $(1 + i\gamma)$. Отметим, что для резонансных кривых с равной амплитудой при резонансе коэффициент потерь равен удвоенному коэффициенту вязкости.

При определении коэффициентов безразмерного демпфирования используется выражение:

$$\xi = \frac{tg\delta f_0}{2f}, \quad (10)$$

где f_0 — собственная частота колебаний прокладки; f — частота спектра колебаний подвижного состава, для которой производится расчет.

Способы улучшения виброзащитных свойств конструкций верхнего строения пути

Обзор конструкций верхнего строения пути в различных странах позволяет сделать вывод о том, что наиболее эффективные решения связаны с разъединением элементов конструкции пути и основания резино-полимерными (эластомерными) виброизоляторами.

Следует отметить, что эффективность применения в конструкции пути различных упругих прокладок, амортизаторов и т.п. не является абсолютной, т.е. существуют определенные частотные диапазоны, где возможно даже некоторое увеличение уровня вибрации при наличии данных прокладок.

Перечислим основные способы, позволяющие улучшить упругие и демпфирующие свойства конструкций верхнего строения пути:

- установка подрельсовых подкладок повышенной упругости;
- установка нашпальных прокладок повышенной упругости под рельсовыми подкладками;
- установка подшпальных прокладок;
- укладка подбалластных матов;
- возможна комбинация этих способов.

В настоящее время в европейских странах получили широкое распространение виброзащитные конструкции пути, в которых упругие элементы: подрельсовые прокладки, нашпальные накладки, подшпальные прокладки и подбалластные маты, — выполнены из материала Sylomer (синтетическая вспененная резина). В Австрии и Германии проведена серия испытаний эффективности таких конструкций. В частности, были проведены замеры колебаний в тоннелях вблизи Концертного зала в Мюнхене [16]. На основании анализа результатов испытаний германскими и австрийскими исследователями для оценки эффективности виброзащиты пути в тоннеле с подбалластным матом предложена упрощенная модель [17; 18 и 19] с одной степенью свободы.

Для расчета ослабления ΔL_v уровня вибраций пути, дБ, с подбалластным матом ими предложена формула

$$\Delta L_v = 20 \lg \left| 1 + \frac{\frac{C_s}{C_m}}{1 + \left(\frac{f_0}{f} \right)^2} \right|, \quad (11)$$

где C_s — жесткость балластного слоя; $C_m = C_m'' S_w (1 + i d_m)$ — жесткость эквивалентной пружины, C_m'' — динамическая жесткость подбалластного мата, d_m — тангенс угла потерь материала, из которого выполнен подбалластный мат, S_w — эффективная площадь, на которую распределяется давление балласта, определяемая из условия конического распределения давления; i — мнимая единица; f — частота вибраций; f_0 — резонансная частота, которая для обычного пути с рельсошпальной решеткой при жесткости балластного слоя C_s и неподдрессоренной массой M определяется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_s}{M}}. \quad (12)$$

Кривая эффективности конструкций пути, описываемых системой с одной степенью свободы, имеет вид, представленный на рис. 9, она хорошо согласуется с экспериментальными данными.

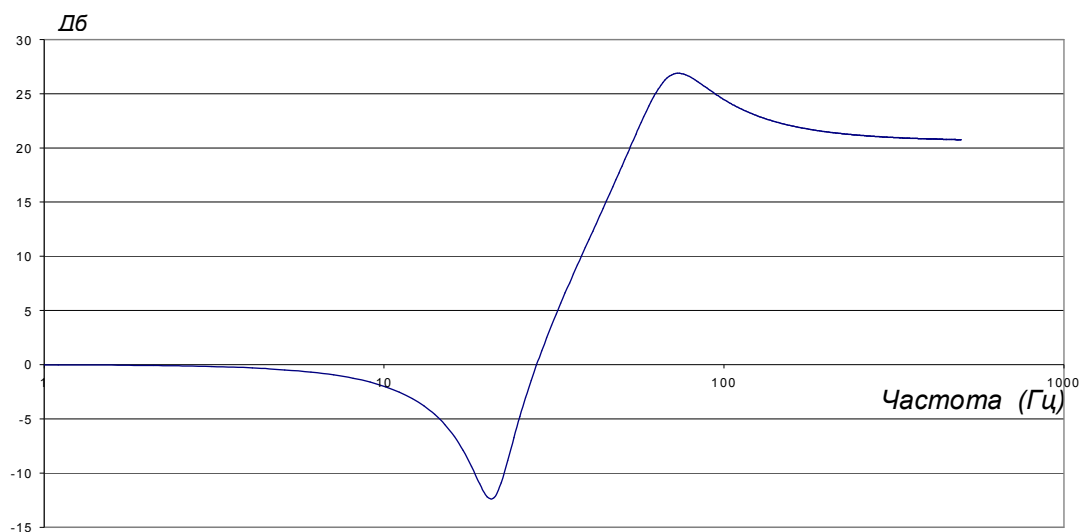


Рис. 9. Кривая эффективности виброзащитной конструкции верхнего строения пути

На низких частотах вплоть до частоты, определяемой выражением $f \leq \sqrt{2}f_0$, наблюдается отрицательный эффект, поэтому чем ниже собственная частота колебаний конструкции, тем лучше ее эффективность с точки зрения виброзащиты. Анализ зарубежного и отечественного опыта позволяет дать следующие оценки реализуемых собственных частот для различных конструкций верхнего строения пути:

- конструкция пути с упругими подрельсовыми и нашпальными прокладками: $f_0 \geq 35$ Гц;
- конструкция пути с упругими подшпальными прокладками: $f_0 \geq 25$ Гц;
- конструкция пути с подбалластными матами: $f_0 \geq 15$ Гц;
- конструкция пути с дополнительной массой (плитой) на упругих опорах: $f_0 \geq 6$ Гц.

Собственная частота вибраций прокладки определяется по статическому перемещению Δ под нагрузкой P_u , приходящейся на одну прокладку,

$$\Delta = \frac{P_u}{C_z} \text{ и } f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta}}, \quad (13)$$

где g — ускорение свободного падения.

В стандартах некоторых стран резиновые опоры рекомендуется выбирать таким образом, чтобы их относительная деформация составляла 0,015 при воздействии рабочей нагрузки. Тогда $\Delta_l = 0,015h$, где h — высота слоя резины в опоре.

$$\text{Для рабочих нагрузок } P_l: \Delta_l = \frac{P_l}{C_z}; \quad f_l = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta_l}}.$$

Допускаемые максимальные деформации резины при сдвиге γ

Допускаемые деформации резины при сдвиге — важная характеристика резиновых опор. Опоры, используемые в качестве виброизоляторов, должны

выдерживать сдвиговые деформации от собственного веса конструкции и перемещения от динамических воздействий. Приемлемые постоянные деформации сдвига в соответствии со стандартом Bridge Engineer Standards определяются формулой

$$\gamma_w = 0,2\varepsilon_t, \quad (14)$$

где ε_t — кратковременная деформация разрушения при простом растяжении.

На основании анализа зарубежных рекомендаций и отечественных стандартов можно принять, что допускаемая деформация сдвига определяется по формуле

$$\tan \gamma = 0,7. \quad (15)$$

Следовательно, расчетная формула имеет вид:

$$\frac{\text{Перемещение}}{\text{Толщина резины } h} = \tan \gamma \leq 0,7.$$

Литература

1. Положение о системе ведения путевого хозяйства на железных дорогах Российской Федерации / МПС РФ; утв. 27.04.2001 г. М., 2001. 79 с.
2. Технические условия на работы по ремонту и планово-предупредительной выправке пути / ЦПТ-53 МПС РФ. М., 2003. 150 с.
3. Боченков М.С. Проблема создания бесстыкового рельсового пути // Ж.-д. трансп. 1995. № 12. С. 58–64.
4. Боченков М.С. Продольные силы и деформации в бесстыковом пути с автоматической разрядкой температурных напряжений // Вестн. ВНИИЖТа. 1957. № 7. С. 12–15.
5. Технические указания по устройству, содержанию и ремонту бесстыкового пути / МПС России. М.: Транспорт, 2000. 96 с.
6. Виноградов Н.П. Бесстыковой путь: положительные и отрицательные тенденции // Путь и путевое хоз-во. 2005. № 10. С. 22–25.
7. Ермаков В.М. Особенности конструкции, условий ее работы, укладки и содержания // Путь и путевое хоз-во. 2004. № 12. С. 12–17.
8. Грищенко В.А., Пименов И.Я. Расчеты, устройство и содержание бесстыкового пути: Учеб. пособие. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2007. 208 с.
9. Ермаков В.М. О промежуточных рельсовых скреплениях // Путь и путевое хоз-во. 2007. № 4. С. 20–23.
10. Карпущенко Н.И., Антонов Н.И. Совершенствование рельсовых скреплений. Новосибирск, 2003. 300 с.
11. Кузнецов В.В., Еремюшкин А.А. Испытания скреплений продолжаются // Путь и путевое хоз-во. 2006. № 5.
12. Хилл П. Наука и искусство проектирования. М.: Мир, 1973. 264 с.
13. Теория прогнозирования и принятия решений / Под ред. С.А. Саркисяна. М.: Высш. шк., 1977. 352 с.
14. Бургак Г.П., Гойхман Л.В., Савоськин А.Н. Применение принципа согласованного оптимума при выборе параметров рессорного подвешивания // Тр. Акад. ком. хоз-ва им. К.Д. Памерилова. 1980. Вып. 175. С. 112–129.
15. Грибов М.М. Регулируемые амортизаторы радиоэлектронной аппаратуры. М.: Сов. Радио, 1974. 143 с.
16. Muller H.A., Opitz U. and Volberg G. Structure-born sound transmission from the tubes of subway into a building for a concert hall. Proceedings Internoise 80. Miami. Vol. II. 1980. P. 715–718.
17. Kurze U.J., Wettschureck R. Ground vibrations in the vicinity of shallow railroad tunnels and open tracks. Acustica 58 (1985). P. 170–176.
18. Wettschureck R., Kurze U.J. Insertion loss of ballast mats. Acustica 58 (1985). P. 177–182.
19. Wettschureck R. Ballast mats in tunnels — analytical model and measurements. Proceedings Internoise 85. Munich. Vol. I. 1985. P. 721–724.