

Оценка надежности рельсовых скреплений и рациональные сферы их применения при реконструкции пути

Поступила	29.06.2018
Рецензирование	21.08.2018
Принята к печати	03.09.2018

Промежуточные рельсовые скрепления, являясь главным связующим узлом, соединяющим рельсы и подрельсовое основание, должны обладать высокой безотказностью для обеспечения должной прочности и устойчивости железнодорожного пути. Среди современных промежуточных скреплений, используемых на сети ОАО «РЖД» и обладающих таким свойством, наиболее распространены скрепления семейства ЖБР и АРС. Исследования, приведенные в данной статье, позволили составить структурные схемы для расчета надежности этих скреплений, определить зависимость между наработанным тоннажем и безотказной работой, рассчитать затраты на содержание пути с разными видами скреплений и дать рекомендации по рациональному применению в различных условиях эксплуатации. Для расчета надежности скреплений использованы статистические данные наблюдений. Вероятность безотказной работы узлов рельсовых скреплений определена в соответствии со структурными схемами. Из анализа полученных данных следует, что наибольшей вероятностью безотказной работы обладают скрепления ЖБР-65ПШМ, а наименьшей – скрепления АРС. Невысокая надежность скрепления АРС объясняется низкой надежностью изолирующих уголков с обеих сторон подошвы рельса. Значительное влияние на объем укладки и сферу применения различных типов рельсовых скреплений оказывает стоимость скреплений в смонтированном состоянии. Наименьшую стоимость одной железобетонной шпалы, укомплектованной двумя узлами скреплений, имеет случай применения скрепления ЖБР-65Ш, а наибольшую – ЖБР-65ПШМ. На основе рассчитанной надежности узлов скреплений, долговечности их элементов и стоимости содержания даны рекомендации по применению исследуемых видов скреплений на участках пути с различными эксплуатационными условиями (в зависимости от грузонапряженности и радиусов кривых). Определено, что наибольшую область применения имеют скрепления ЖБР-65ПШМ.

Ключевые слова: промежуточные скрепления, ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ, АРС-4, надежность, отказы.

Рельсовое скрепление – важнейший элемент верхнего строения пути, в существенной степени определяющий эксплуатационную надежность рельсовой колеи. От свойств промежуточного скрепления зависит пространственная жесткость рельсошпальной решетки, условия ее взаимодействия с подвижным составом и, наконец, стоимость технического содержания пути на всех этапах жизненного цикла.

В настоящее время на сети дорог ОАО «РЖД» используется более 20 типов промежуточных скреплений, из которых большая часть уже устарела, поэтому рассмотрим только три перспективных типа скреплений, которые применяют при капитальном ремонте и реконструкции пути в последние годы.

По протяженности пути с упругими скреплениями на отечественной сети лидируют ЖБР различной модификации (подкладочные и бесподкладочные) и АРС [1].

Все указанные скрепления имеют пружинную клемму в качестве главного прикрепителя, которая различается формой, упругими свой-

ствами и способом фиксации подошвы рельса на шпале. Существует несколько модификаций скрепления ЖБР. Наиболее распространенными являются бесподкладочный вариант шурупно-дюбельного типа – ЖБР-65Ш (рис. 1) и подкладочный – ЖБР-65ПШМ (рис. 2) [2].

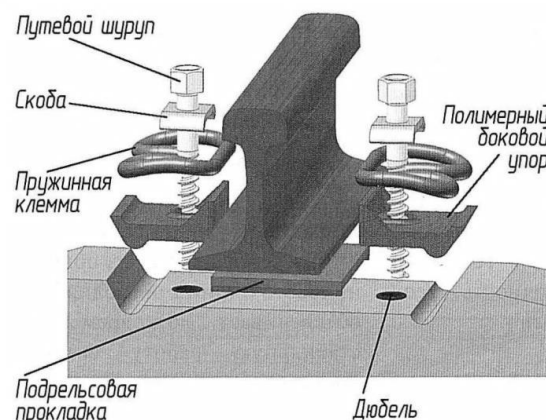


Рис. 1. Бесподкладочное скрепление ЖБР-65Ш

В бесподкладочном скреплении ЖБР-65Ш в качестве прикрепителя пружинной клеммы используется путевой шуруп ЦП54, вкручива-

емый в дюбель железобетонной шпалы с усилием 22–25 кгс·м. В качестве упорного элемента крепление ЖБР-65Ш может иметь полимерный боковой упор (см. рис. 1) или упорную скобу, как в варианте ЖБР-65 (в настоящее время модификация ЖБР-65Ш с упорной скобой не выпускается).

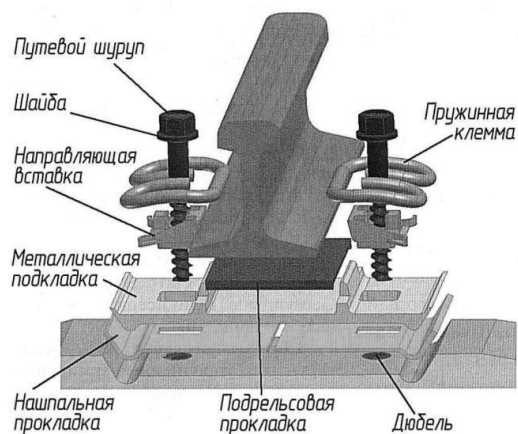


Рис. 2. Подкладочное крепление ЖБР-65ПШМ

Подкладочное крепление ЖБР-65ПШМ (см. рис. 2) применяется в кривых малых радиусов. Металлическая подкладка значительно усиливает узел крепления и стабилизирует упорную рельсовую нить, воспринимающую боковые нагрузки. Можно регулировать ширину колеи разворотом (или заменой) напильных прокладок, имеющих разную толщину внешних кромок.

Анкерное крепление АРС, приведенное на рис. 3 и 4, не имеет болтов и шурупов, а следовательно не требует сезонной протяжки прикрепителей. Прижатие рельса к шпале

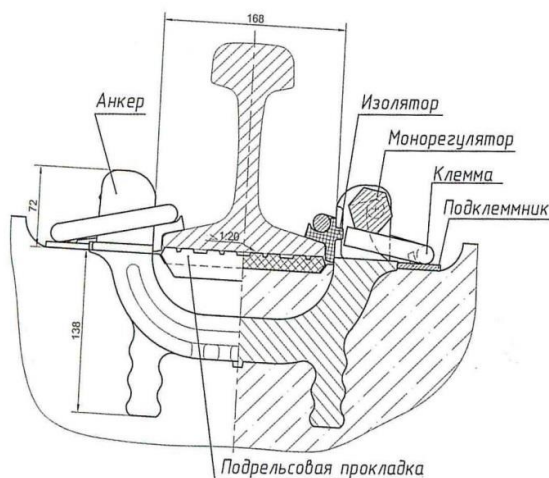


Рис. 3. Анкерное крепление АРС

обеспечивает В-образная пружинная клемма, надетая на головку анкера, замоноличенного в железобетонной шпале. Узел крепления состоит из несъемного анкера, замоноличенного в теле шпалы, подрельсовой амортизирующей прокладки, двух подклеммников, двух пружинных клемм, двух изоляторов и двух эксцентриковых монорегуляторов [3].

Все элементы крепления имеют малый вес и легко монтируются.

Бесподкладочное шурупно-дюбельное крепление ЖБР-65Ш является самым распространенным. Основные недостатки данного крепления:

- малый ресурс полимерных деталей (упругих прокладок, боковых упоров);
- выход из строя путевых шурупов и пружинных клемм;
- нестабильность ширины рельсовой колеи в кривых малых радиусов.

В кривых участках пути работа крепления ЖБР-65Ш вызывала особенно много нареканий: наблюдался излом шурупов и разрушение упругих прокладок под упорными скобами.

Проблема неудовлетворительного поведения крепления ЖБР-65Ш в кривых малого радиуса была решена с появлением подкладочного крепления ЖБР-65ПШМ (см. рис. 2), которое зарекомендовало себя с лучшей стороны и получило положительные отзывы с дорог. Конструктивное преимущество нового крепления заключается в наличии подкладки, которая прикрепляется к шпале двумя шурупами. Это

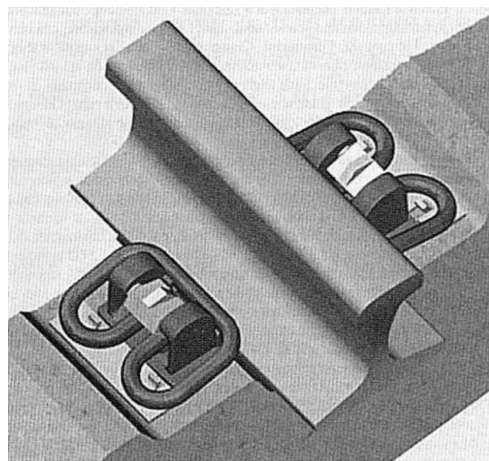


Рис. 4. Крепление АРС в сборе на третьей позиции монорегулятора

способствует более надежной фиксации узла скрепления и повышению стабильности ширины колеи. Недостатком данного скрепления является ограниченная возможность регулировки ширины колеи (не более 4 мм) за счет разворота упругих прокладок. В настоящее время ведется работа, направленная на упрощение этой операции и увеличение диапазона регулировки ширины колеи свыше 4 мм.

Основные недостатки скрепления АРС-4:

– крайне низкий срок службы изоляторов (боковых амортизаторов) в кривых радиусом 650 м и менее;

– износ площадки монорегулятора (в третьей позиции) от усов клеммы;

– отсутствие механизированного инструмента для монтажа и демонтажа скрепления, что приводит к высоким трудозатратам при содержании пути.

Скрепление АРС-4 укладывается преимущественно при реконструкции пути в европейской части страны, так как данный тип скрепления не выдерживает тяжелых условий эксплуатации Восточного полигона. В кривых малого радиуса на грузонапряженных участках происходит интенсивный износ изоляторов, приводящий к сверхнормативному уширению колеи и, соответственно, к работам по устранению уширения. Стабильная работа АРС-4 отмечена в прямых и кривых участках пути радиусом более 650 м.

Для оценки надежности таких изделий используют вероятностные характеристики случайной величины наработки T объекта от начала его эксплуатации до первого отказа. Для объектов верхнего строения пути чаще всего наработка выражается в миллионах тонн брутто пропущенного груза или в единицах времени работы.

Функцией надежности называют функцию, выражающую вероятность того, что случайная наработка до отказа T будет не менее заданной наработки на интервале $(0; t)$, отсчитываемой от начала эксплуатации, т. е.

$$P(t) = P(T \geq t). \quad (1)$$

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением

$$\bar{P}(t) = \frac{N(t_i)}{N_0}, \quad (2)$$

где $N(t_i)$ – число безотказно проработавших изделий к моменту наработки t_i ; N_0 – число изделий в начале испытаний.

На практике иногда более удобной характеристикой является функция ненадежности $F(t)$:

$$F(t) = 1 - P(t) = P(T < t). \quad (3)$$

Она характеризует вероятность отказа изделия на интервале $(0; t)$. Функция ненадежности является функцией распределения случайной величины T и в теории вероятностей обозначается $F(t)$. Вероятность отказа по статистическим данным

$$\bar{F}(t_i) = \frac{r(t_i)}{N_0}, \quad (4)$$

где $r(t_i)$ – число отказавших объектов к моменту наработки t_i .

Расчеты ведутся с использованием интегральной функции нормального распределения (нормированной и центрированной):

$$F_0(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{x^2}{2}} dx. \quad (5)$$

Переменная величина этой функции

$$x = (t_i - T_{cp}) / \sigma_t, \quad (6)$$

где t_i – текущее значение наработки, млн т бр.; T_{cp} и σ_t – средняя наработка изделия до отказа и среднее квадратическое отклонение, млн т бр.

Скрепление проектируют так, что обычно у него нет «лишних» деталей. Отказ любой из них снижает эффективность функционирования узла скрепления, вызывает интенсивный износ соседних деталей и повышает расходы на содержание пути. Поэтому, оценивая надежность скреплений различных типов в условиях нормальной эксплуатации, необходимо все элементы считать соединенными последовательно, а вероятность безотказной работы узла такой системы оценивать по формуле [4]

$$P_u(t) = \prod_{i=1}^n P_i(t), \quad (7)$$

где P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента.

Оценивая надежность скрепления в экстремальной ситуации, в которой конструкция может находиться ограниченное время, а затем переходит в аварийное состояние, отдельные цепи элементов можно считать параллельными. Безотказность работы элементов цепи

$$P_u(t) = 1 - \left(1 - \prod_{i=1}^n P_i(t) \right)^2. \quad (8)$$

Частота отказов элементов рельсовых креплений типов ЖБР-ПШМ, ЖБР-65Ш, АРС определяется на основании статистических данных об отказах элементов во время эксплуатации в кривых радиусом 400 м (табл. 1).

После определения параметров $T_{ср}$ и σ_t методом квантилей в сочетании с методом наименьших квадратов и вероятности безотказной работы $P_i(t)$ отдельных элементов креплений переходят к определению вероятности безотказной работы узлов креплений. Для этой цели составляются структурные схемы анализа надежности креплений ЖБР-65Ш, ЖБР-ПШМ, АРС.

При составлении структурных схем для подкладочных и анкерных креплений учитывалось то, что подкладки и анкеры объединяют работу прикрепителей (клемм, шурупов). Отказ узла креплений в экстремальных условиях эксплуатации произойдет тогда, когда откажут обе параллельные цепи элементов прикрепителей. У бесподкладочных креплений ЖБР-65Ш отказ узла креплений наступит при отказе любого из его элементов.

Вероятность безотказной работы узлов рельсовых креплений определяем по формулам:

– для узлов креплений ЖБР

$$P_y = \prod_{i=1}^{11} P_i; \quad (9)$$

– для узлов креплений ЖБР-ПШМ

$$P_y = \left(1 - \left[1 - \prod_{i=1}^5 P_i \right]^2 \right) \prod_{i=1}^3 P_i; \quad (10)$$

– для узлов креплений АРС

$$P_y = \left(1 - \left[1 - \prod_{i=1}^5 P_i \right]^2 \right) P_n. \quad (11)$$

Для расчета надежности креплений ЖБР-65Ш, ЖБР-65ПШМ и АРС использованы статистические данные наблюдений, а также опубликованные данные [5, 6].

Вероятности безотказной работы узлов рельсовых креплений, определенные в соответствии со структурными схемами (рис. 5) по формулам (9)–(11), приведены на рис. 6.

Из анализа полученных данных следует, что наибольшей вероятностью безотказной работы обладают крепления ЖБР-65ПШМ, а наименьшей – крепления АРС.

Опыт эксплуатации креплений ЖБР-65Ш на железобетонных шпалах показал, что после пропуска по участку с этими креплениями 400–600 млн т бр. груза происходит отказ 20–30 % полимерных электроизолирующих деталей. Удельное сопротивление подрельсового основания снижается до 0,2–0,25 Ом·км, что ведет к отказу рельсовых цепей. Это подтверждается результатами расчетов, приведенными на рис. 6.

Таблица 1

Частота отказов элементов креплений

Тип крепления	Наработанный тоннаж, млн т бр.	Элемент крепления									
		Шуруп с шайбой (скобой)	Клема	Боковой упор (вставка)	Подрельсовая прокладка	Металлическая подкладка	Нашпальная прокладка	Анкер АРС	Монорегулятор	Угловой изолятор	Подклемник
ЖБР-65Ш	200	0,5	0,3	0,2	0,4						
	400	2,0	0,5	0,8	3,0						
	600	5,0	1,0	2,6	7,0						
	800	7,0	1,8	4,0	10,0						
ЖБР-65ПШМ	200	0,2	0,2	0,1	0,2	0,5	0,0				
	400	0,8	0,5	0,5	1,5	1,5	0,5				
	600	1,3	1,0	1,0	3,0	5,0	1,5				
	800	1,8	1,5	2,0	5,0	7,0	2,0				
АРС	200		0,5		0,3			0,1	0,1	0,3	0,2
	400		0,8		1,6			0,3	0,2	3,0	0,6
	600		1,5		2,7			0,5	0,3	7,5	1,0
	800		2,0		5,0			1,0	0,5	15,0	2,0

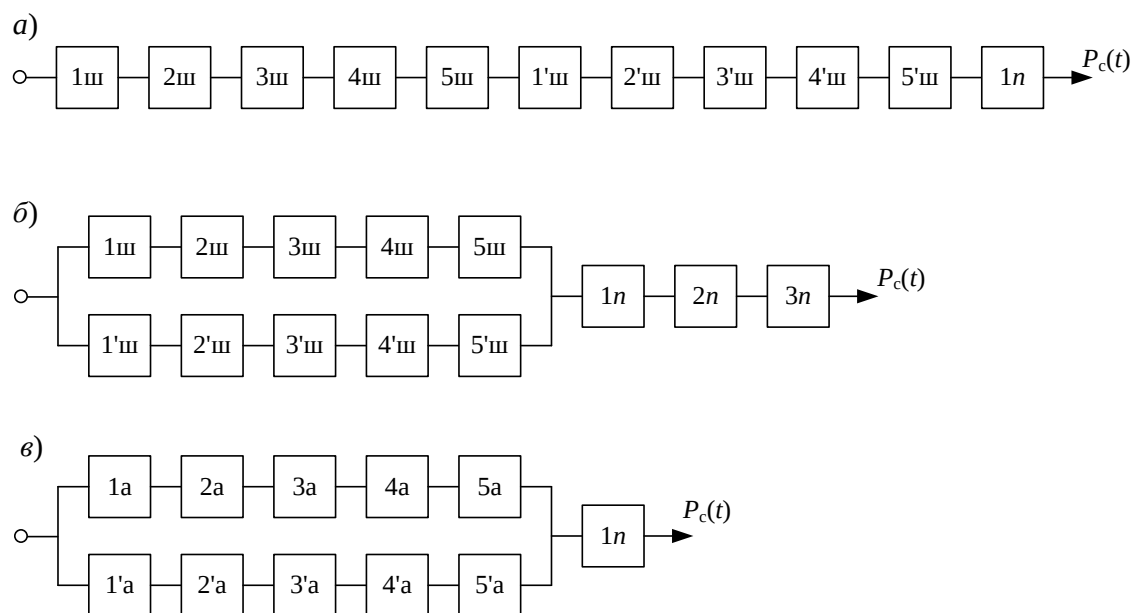


Рис. 5. Структурные схемы для расчета надежности рельсовых креплений:
 а – ЖБР-65Ш: 1ш – шурупы; 2ш – скобы; 3ш – клеммы; 4ш – боковые упоры; 5ш – дюбели; 1н – прокладка;
 б – ЖБР-65ПШМ: 1ш – шурупы; 2ш – шайбы; 3ш – клеммы; 4ш – вставки; 5ш – дюбели; 1н – прокладка; 2н – подкладка; 3н – прокладка нащпальная;
 в – АРС: 1а – анкер; 2а – монорегуляторы; 3а – клеммы; 4а – подклеммники; 5а – изоляторы; 1н – прокладка

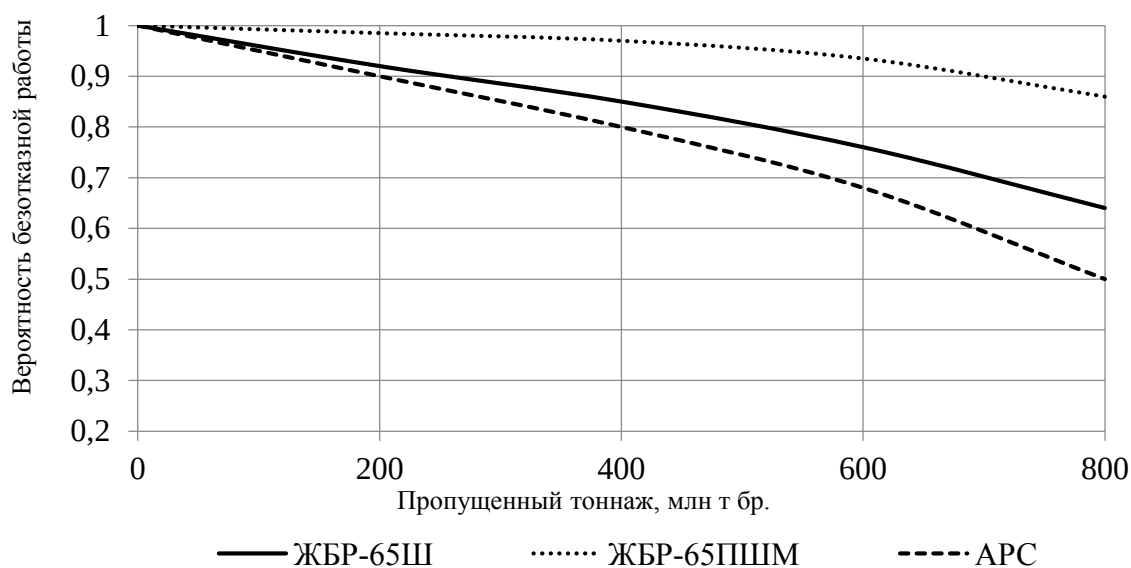


Рис. 6. Вероятности безотказной работы рельсовых креплений

Анализ данных табл. 1 показывает, что значительную частоту отказов у всех креплений имеют подрельсовые прокладки. У бесподкладочных креплений ЖБР-65Ш высокую частоту отказов имеют шурупы и полимерные боковые упоры. Объясняется это худшей схемной надежностью узлов таких креплений по сравнению с ЖБР-65ПШМ:

подкладки крепления ЖБР-65ПШМ объединяют работу двух шурупов и цепи этих элементов являются дублирующими. Большую роль играет также качество изготовления элементов, особенно упругих клемм и прокладок.

Невысокая надежность крепления АРС объясняется низкой надежностью изолирующих уголков с обеих сторон подошвы рельса.

Происходит это из-за высокой горизонтальной жесткости скреплений и недостатков конструкции изоляции подошвы рельса от анкеров и упругих клемм.

Для повышения долговечности рельсовых скреплений необходимо стремиться к обеспечению равноресурсной работы элементов узлов рельсовых скреплений [7–12]. Долговечность элементов скреплений сильно зависит от плана линии [13]. В кривых средних и малых радиусов на узлы скреплений передаются значительные поперечные силы от подвижного состава, вследствие чего износ и выход элементов скреплений в дефектные увеличивается. Поэтому для кривых $R < 350$ м гарантийный ресурс элементов устанавливают $T_r = 350$ млн т бр., для кривых радиусом $350 \leq R \leq 650$ м $T_r = 500$ млн т бр., а для прямых и кривых $R > 650$ м $T_r = 700$ млн т бр.

Массовая замена элементов скреплений требует больших затрат ручного труда, поэтому такие работы следует проводить при выполнении среднего или капитального ремонтов пути. Однако и гарантийный ресурс от производителей элементов, и назначенный от дирекции инфраструктуры ОАО «РЖД» не всегда этой рекомендации соответствуют.

Проблема повышения срока службы узла скрепления в целом и его элементов в частности должна быть решена за счет привлечения инновационных полимерных материалов и улучшения процессов производства.

Значительное влияние на объем укладки и сферы применения различных типов рельсовых скреплений оказывает стоимость скреплений в смонтированном состоянии. Наименьшую стоимость одной железобетонной шпалы, укомплектованной двумя узлами скреплений, имеет случай применения скрепления ЖБР-65Ш, а наибольшую – ЖБР-65ПШМ (табл. 2). Увеличение стоимости этого скрепления связано с монопольной ценовой политикой изготовителя подкладок ООО «Нижнесалдинский металлургический завод».

По стоимости затрат на содержание 1 км пути предпочтительными являются скрепления ЖБР-65ПШМ (рис. 7). Связано это с меньшими по сравнению с АРС-4 расходами на смену полимерных деталей, особенно изолирующих уголков у АРС-4.

Учитывая надежность узлов скреплений, долговечность их элементов и стоимость текущего содержания, в зависимости от грузонапряженности участков и радиусов кривых рекомендованы сферы применения промежуточных рельсовых скреплений (табл. 3). Наиболее широкий диапазон целесообразного и рационального применения имеют скрепления ЖБР-65ПШМ [14].

Выводы

Наиболее распространенными типами скреплений на бесстыковом пути в настоящее время являются: ЖБР-65Ш, АРС-4 и ЖБР-65ПШМ. Для этих скреплений построены структурные схемы и получены формулы для расчета надежности узлов скреплений. Анализ полученных результатов показывает, что наибольшей вероятностью безотказной работы обладают скрепления ЖБР-ПШМ, а наименьшей – скрепление АРС. Невысокая надежность скрепления АРС объясняется низкой надежностью изолирующих уголков с обеих сторон подошвы рельса.

Долговечность элементов скреплений сильно зависит от плана линии. Поэтому для кривых $R < 350$ м гарантийный ресурс элементов устанавливают $T_r = 350$ млн т бр., для кривых радиусом $350 \leq R \leq 650$ м $T_r = 500$ млн т бр., для прямых и кривых $R > 650$ м $T_r = 700$ млн т бр.

Учитывая надежность узлов скреплений, долговечность их элементов и стоимость текущего содержания пути, рекомендованы сферы применения указанных скреплений в зависимости от грузонапряженности участков и радиусов кривых. Наиболее широкий диапазон целесообразного и рационального применения имеют скрепления ЖБР-65ПШМ.

Таблица 2

Базовая стоимость скреплений (без НДС), р.

Тип скрепления	Стоимость одной шпалы с двумя собранными узлами	Стоимость 1 км пути с эapurой шпал 2 000 шт./км
ЖБР-65Ш	2 327	4 654 000
ЖБР-65ПШМ	3 052	6 104 000
АРС-4	2 999	5 998 000

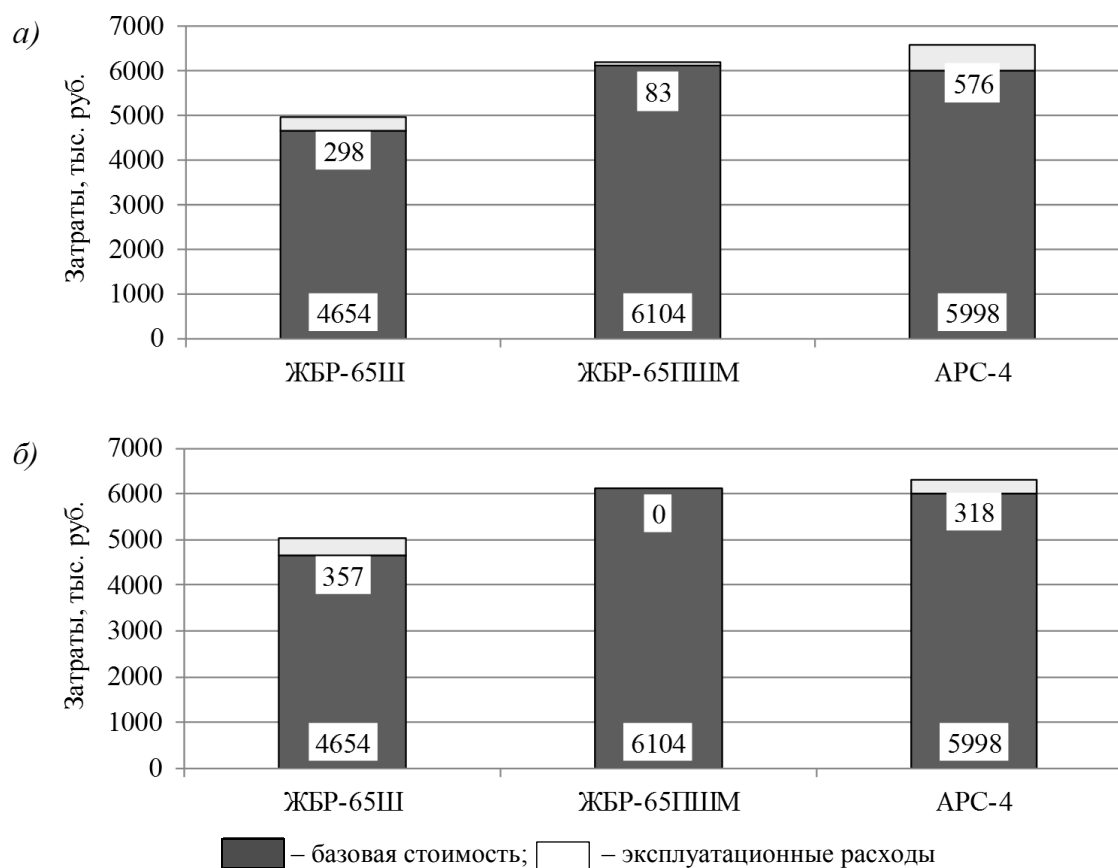


Рис. 7. Затраты на содержание 1 км пути в зависимости от типа креплений и условий эксплуатации. Расчетная стоимость для кривых участков пути радиусом: а – менее 350 м; б – 350 м и более

Таблица 3

Рациональные сферы применения промежуточных рельсовых креплений на сети дорог ОАО «РЖД» в зависимости от радиуса кривых и грузонапряженности

Условия эксплуатации		Тип крепления			
Грузонапряженность, млн т бр. км / км в год	Радиус кривых, м	ЖБР-65Ш	ЖБР-65ПШ	ЖБР-65ПШМ	АРС-4
Более 80	Более 650				
	От 350 до 650				
	Менее 350				
От 50 до 80	Более 650				
	От 350 до 650				
	Менее 350				
До 50	Более 650				
	От 350 до 650				
	Менее 350				

Примечание: ■ – не применять; □ – применять целесообразно; ▒ – рациональное применение