



УДК 625.143

Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм современных рельсовых скреплений с анализом их напряженно-деформированного состояния

М. А. Карюкин

Сибирский государственный университет путей сообщения, Российская Федерация, 630049, Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191

Для цитирования: Карюкин М. А. Многовариантное моделирование параметров конструкции упругих клемм современных рельсовых скреплений с анализом их напряженно-деформированного состояния // Известия Петербургского университета путей сообщения. — СПб.: ПГУПС, 2023. — Т. 20. — Вып. 3. — С. 507–518. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-507-518

Аннотация

Цель: Определить влияние геометрических параметров наиболее распространенной упругой прутковой клеммы современных промежуточных рельсовых скреплений — В-образной клеммы (типа ЖБР и АРС) на изменение ее напряженно-деформированного состояния. Предложить дальнейшее направление совершенствования конструкции упругих прутковых клемм рельсовых скреплений для увеличения надежности конструкции. **Методы:** В статье приведены результаты многовариантного моделирования геометрических параметров клемм (ЖБР — 20 шт., АРС — 13 шт.) с анализом их напряженно-деформированного состояния, с использованием методов программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys Workbench. **Результаты:** Анализ конструкции современных скреплений показал, что интервалы варьирования геометрических параметров клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) имеют небольшие пределы и существенные ограничения, связанные с требованиями обеспечения прочности, упругости и работоспособности всего скрепления. Выявлена необходимость рассмотрения вариантов с вертикальными радиусами менее 60 мм, что влечет за собой необходимость коренного изменения самой формы клемм. **Практическая значимость:** Анализ расчетов многовариантных моделей показал степени влияния интервалов варьирования геометрических параметров прутковых клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) на напряженно-деформированное состояние. Установлено, что для дальнейшего увеличения упругости клемм необходима разработка нового типа рельсового скрепления с принципиально иной формой (отличной от современной В-образной формы) упругой клеммы, не обладающей современными конструктивными ограничениями в геометрических параметрах.

Ключевые слова: Железнодорожный путь, рельсовое скрепление, программно-вычислительный комплекс, SolidWorks, Ansys, геометрические параметры, напряжения.

Введение

В качестве современных промежуточных рельсовых креплений для сети Российских железных дорог можно выделить крепления типа ЖБР и АРС [1–6]. Данные крепления имеют схожую конструкцию клеммы — В-образную упругую прутковую клемму [7] (рис. 1).

Дальнейшее совершенствование конструкции упругих клемм рельсовых креплений [2, 6, 8] подразумевает определение их наиболее оптимальных геометрических параметров, обеспечивающих наибольший упругий ход уса клеммы при сохранении прочности и надежности конструкции.

Поскольку главным параметром для упругих клемм является усталостная прочность, при проведении исследования граничным условием считается непревышение предела текучести выбранного материала.

Материалы и методы исследования

Определение наиболее оптимальных геометрических параметров выполняется в результате анализа напряженно-деформированного состояния [9] упругих прутковых клемм, проводилось на основе многовариантного компьютерного моделирования с использованием программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys Workbench.

SolidWorks использовался в качестве графического редактора для построения трехмерных моделей упругих В-образных прутковых клемм (тип ЖБР — 20 шт., тип АРС — 13 шт.). Подготовленные трехмерные модели подгружались в качестве объектов исследования в Ansys Workbench для последующей оценки напряженно-деформированного состояния на основе анализа методом конечных элементов.

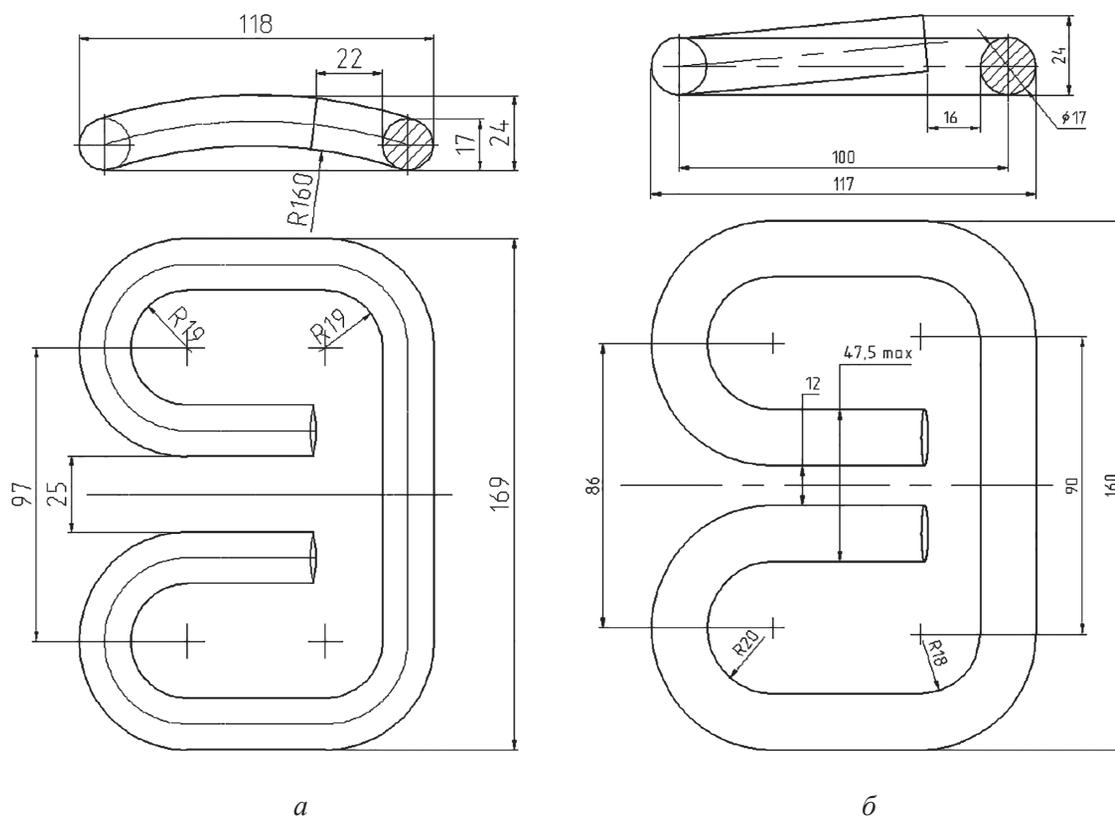


Рис. 1. Типовые геометрические размеры упругих клеммы:
 а — клемма ЖБР-3; б — клемма АРС

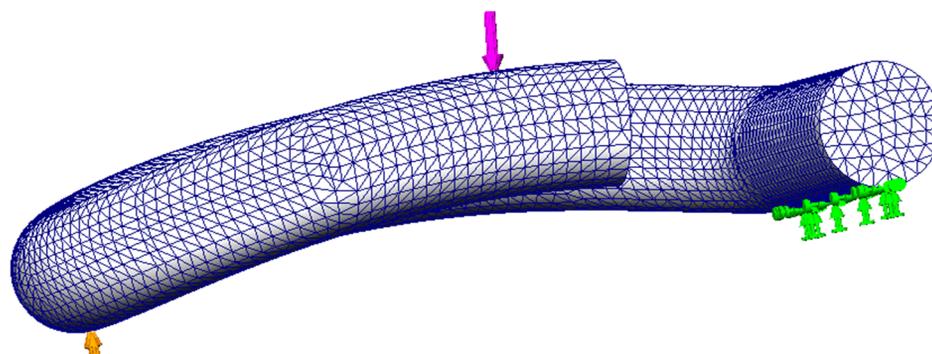


Рис. 2. Расчетная модель на примере клеммы ЖБР

При компьютерном моделировании клемм ЖБР и АРС использовалась сталь марки 60С2А с пределом текучести 1570 МПа.

Для обеспечения стабильного положения бесстыковой плети относительно железобетонных шпал необходимо, чтобы погонное сопротивление смещению плети составляло 25 кН/м [10], что определяет усилие прижатия упругих клемм — 20 кН.

В качестве граничных условий используются жесткая заделка на основании нарельсовой части клеммы и ролик/ползун на основании нашпальной части (рис. 2).

Результаты исследования

Результаты исследования напряженно-деформированного состояния упругих В-образных клемм приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Сравнение напряженно-деформированного состояния типовых упругих клемм ЖБР и АРС

Параметр	Упругая прутковая клемма	
	ЖБР-3	АРС
Максимальное напряжение, МПа	1451	1506
Максимальное перемещение концов усов клеммы, мм	7,84	8,95
Перемещение усов клеммы в точке приложения силы, мм	6,15	7,47

Анализ напряженно-деформированного состояния современных клемм креплений ЖБР и АРС с типовыми геометрическими параметрами, по данным табл. 1: перемещение усов клеммы ЖБР на 17 % ниже, чем клеммы АРС, максимальные напряжения в клемме ЖБР на 4 % ниже, чем в АРС.

Как уже говорилось ранее, клеммы креплений ЖБР и АРС имеют схожую конструкцию, поэтому в дальнейшем обозначим два типа конструкций В-образных клемм:

- тип А — В-образная клемма с криволинейными очертаниями боковых частей и усов (соответствует клемме ЖБР-3);
- тип Б — В-образная клемма с прямолинейными очертаниями боковых частей и усов (соответствует клемме АРС).

Анализ влияния геометрических параметров упругих прутковых В-образных клемм на их напряженно-деформированное состояние

Рассмотрено влияние трех варьируемых геометрических параметров упругих прутковых клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) на внутренние напряжения клемм и перемещение усов клеммы.

Типовые размеры упругих прутковых клемм приведены в табл. 2, для клеммы АРС через дробь указан радиус сопряжения прямолинейного нарельсового и бокового участков (рис. 1).

ТАБЛИЦА 2. Типовые размеры клемм

Тип клеммы	Диаметр прутка, мм	Вертикальный радиус, мм	Горизонтальный радиус, мм
А (ЖБР-3)	17	160	19
Б (АРС)	17	∞	20/18

Прутковые клеммы с указанными в табл. 2 типовыми геометрическими размерами будут обозначаться базовым нулевым вариантом (0 вариант).

Результаты исследования многовариантных моделей клеммы типа А (23 шт.) — В-образной клеммы с криволинейными очертаниями боковых частей и усов представлены на рис. 3–8.

Влияние вертикальных радиусов на напряженно-деформированное состояние клеммы типа А

В ходе моделирования В-образной клеммы с криволинейными очертаниями боковых частей и усов (тип А) построено 13 вариантов клеммы с различными вертикальными радиусами (рис. 3, 4).

Влияние 7 вариантов вертикальных радиусов (120–180 мм) на изменение перемещения усов клеммы типа А и максимальные напряжения оказалось незначительным (в пределах 1 %). При величине вертикального радиуса более 180 мм форма клеммы типа А становится наиболее приближенной к плоской, как у клеммы типа Б. Поэтому в расчетах вертикальные радиусы более 180 мм для В-образной конструкции клемм не рассматриваются.

Влияние других 6 вариантов вертикальных радиусов (в интервале 60–110 мм) с большей кривизной показало, что перемещение усов клеммы и максимальные внутренние напряжения увеличиваются на 5–6 %.

Влияние диаметра прутка на напряженно-деформированное состояние клеммы типа А

Результаты моделирования клемм типа А с 5 вариантами диаметра прутка приведены на рис. 5, 6.

Диаметр сечения прутка 17 мм является наиболее удачным, поскольку максимальные напряжения в клеммах меньших диаметров превышают



Рис. 3. Зависимость напряжений от вертикального радиуса для клеммы типа А

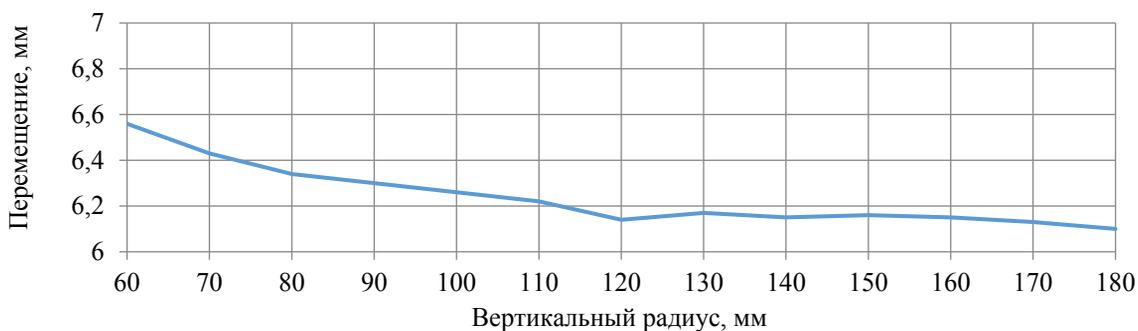


Рис. 4. Зависимость перемещений от вертикального радиуса для клеммы типа А

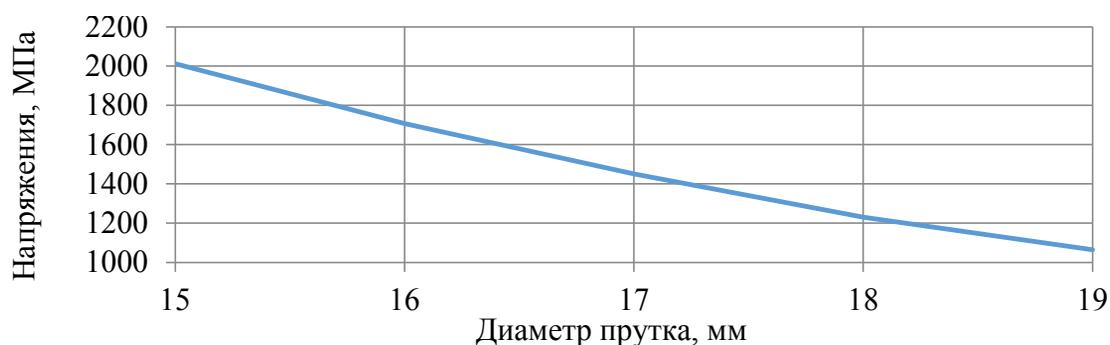


Рис. 5. Зависимость напряжений от диаметра прутка для клеммы типа А

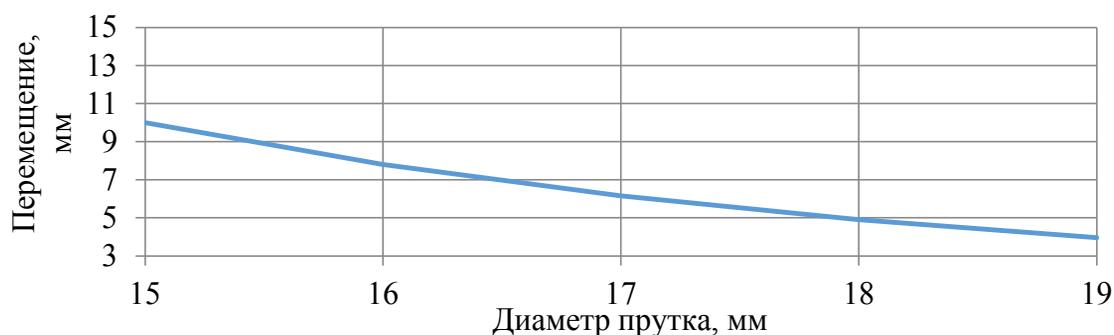


Рис. 6. Зависимость перемещений от диаметра прутка для клеммы типа А

предел текучести стали, а большие диаметры, 18 и 19 мм, снижают упругие перемещения усов клеммы на 20,3 % и 35,7 % соответственно.

Влияние горизонтального радиуса на напряженно-деформированное состояние клеммы типа А

На рис. 7, 8 представлены результаты моделирования клеммы типа А с 4 вариантами горизонтальных радиусов.

Увеличение горизонтального радиуса до 20 мм обеспечивает немного больший упругий ход уса клеммы (6,5 мм), что на 5 % больше в сравнении с базовым вариантом. Представляется полезным дальнейшее увеличение горизонтального радиуса клеммы, вплоть до смыкания двух горизонтальных радиусов в один радиус 41,5 мм за счет прямого бокового участка клеммы.

С использованием программно-вычислительных комплексов SolidWorks и Ansys определено,

что типовые сочетания геометрических параметров клеммы типа А являются оптимизированными и обеспечивают сравнительно наибольшую величину упругого хода уса клеммы при сравнительно меньших внутренних напряжениях, не превышающих предел текучести выбранного материала.

Результаты исследования многовариантных моделей клеммы типа Б (22 шт.) представлены на рис. 9–14.

Влияние диаметра прутка на напряженно-деформированное состояние клеммы типа Б

Результаты исследования клеммы типа Б с 6 вариантам диаметра прутка представлены на рис. 9, 10.

Как и следовало ожидать, результаты моделирования клеммы с измененными диаметрами прутка для клеммы типа А и типа Б схожи. Оптимальный диаметр сечения прутка — 17 мм.

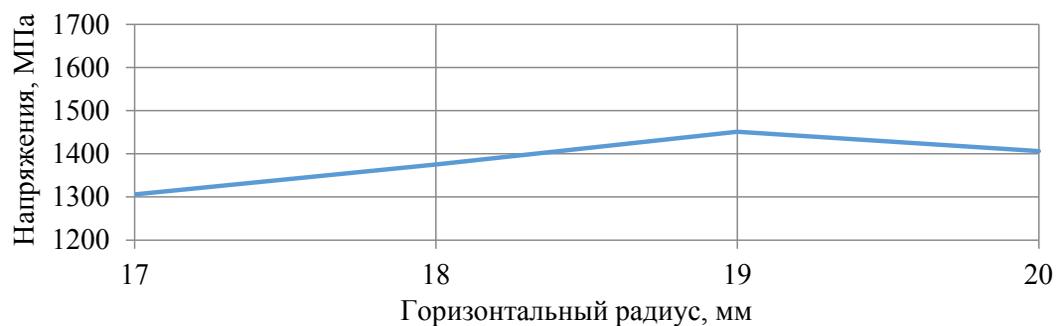


Рис. 7. Зависимость напряжений от горизонтального радиуса для клеммы типа А

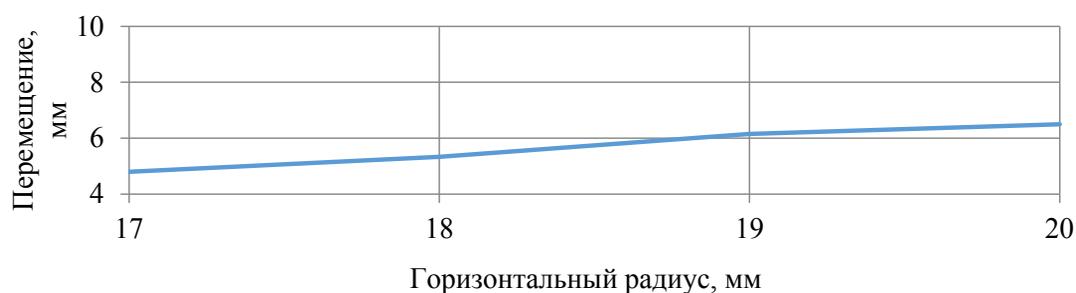


Рис. 8. Зависимость перемещений от горизонтального радиуса для клеммы типа А



Рис. 9. Зависимость напряжений от диаметра прутка для клеммы типа Б

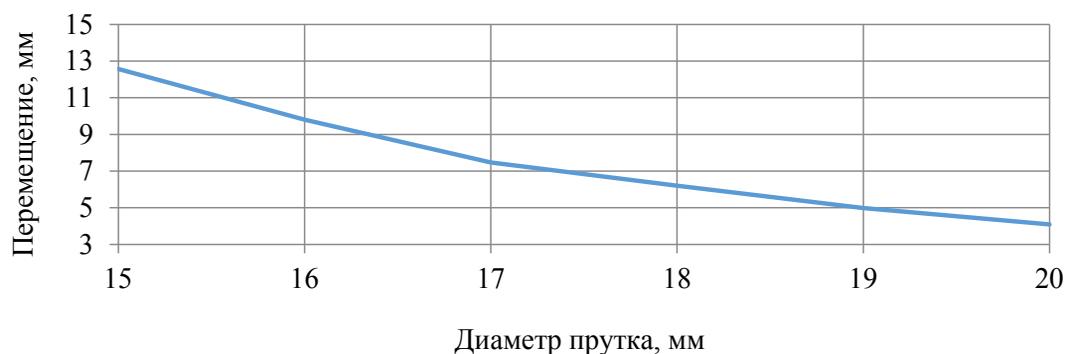


Рис. 10. Зависимость перемещений от диаметра прутка для клеммы типа Б

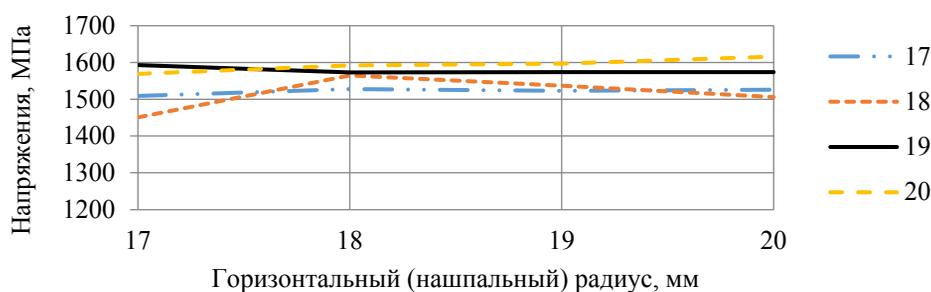


Рис. 11. Зависимость напряжений от горизонтального радиуса (нашпального) с учетом 4 нарельсовых радиусов клеммы типа Б

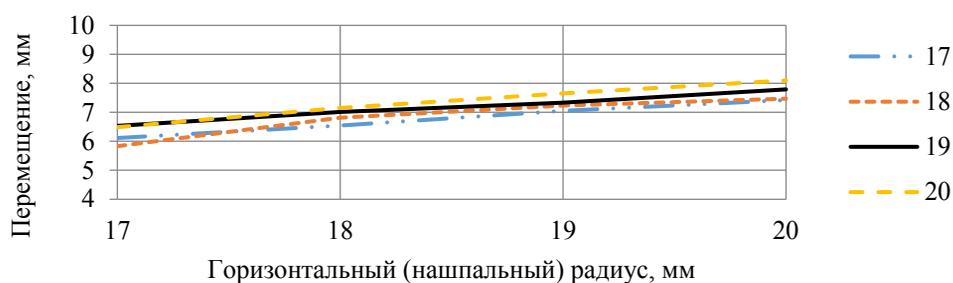


Рис. 12. Зависимость перемещений от горизонтального радиуса (нашпального) с учетом 4 нарельсовых радиусов клеммы типа Б

Влияние горизонтальных радиусов на напряженно-деформированное состояние клеммы типа Б

Конструкция клеммы типа Б имеет различные радиусы сопряжения бокового и нашпального участка и бокового и нарельсового участка. При моделировании клеммы типа Б рассматривались 4 различных сочетания горизонтальных радиусов (рис. 11, 12).

Другими словами, детальнее рассмотрены зависимости напряженно-деформированного состояния от изменения горизонтальных радиусов клеммы, с учетом варьирования размеров отдельно для нарельсового и нашпального радиусов.

Определено, что изменение радиуса сопряжения прямолинейного нарельсового и бокового участков (нарельсового радиуса) оказывает большее влияние на изменение внутренних напряжений клеммы АРС, чем радиус сопряжения нашпального участка и уса клеммы (нашпаль-

ный радиус), при этом перемещения изменяются незначительно.

В то же время изменение радиуса сопряжения нашпального участка и уса клеммы (нашпальный радиус) в большей степени влияет на величину максимальных перемещений, при этом внутренние напряжения изменяются незначительно.

Определение оптимальных геометрических параметров упругих В-образных клемм на основе анализа сборных вариантов.

Проведено определение оптимальных геометрических параметров упругих клемм с криволинейными очертаниями боковых частей и усов (тип А) и прямолинейными очертаниями боковых усов (тип Б) на основе анализа сборных вариантов.

На основе полученных ранее зависимостей влияния геометрических параметров прутковых клемм типа А на их напряженно-деформирован-

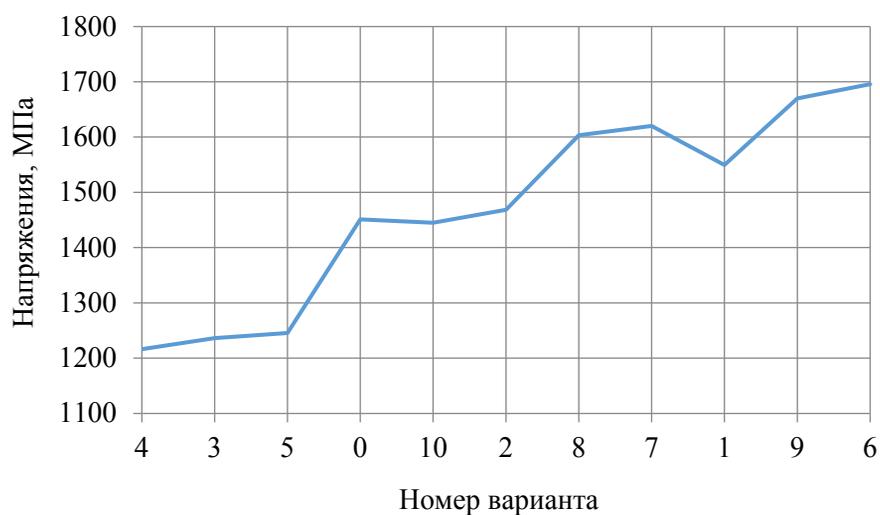


Рис. 13. Сравнение перемещений в сборных вариантах клеммы типа А

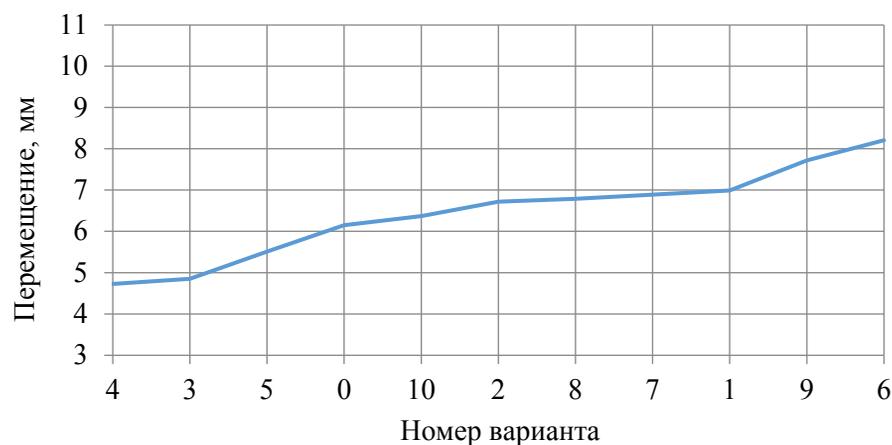


Рис. 14. Сравнение напряжений в сборных вариантах клеммы типа А

ТАБЛИЦА 3. Сборные варианты геометрических параметров клеммы типа А

Номер варианта	Диаметр прута, мм	Вертикальный радиус, мм	Горизонтальный радиус, мм	Напряжения, МПа	Перемещения, мм
0	17	160	19	1451	6,15
1	17	60	20	1549	6,99
2	17	80	20	1468	6,72
3	18	70	18	1236	4,85
4	18	90	18	1217	4,73
5	18	100	20	1246	5,51
6	16	80	20	1696	8,21
7	16	90	18	1620	6,89
8	16	110	18	1603	6,79
9	16,5	60	20	1670	7,72
10	17,5	60	20	1445	6,37

ТАБЛИЦА 4. Сборные варианты геометрических параметров клеммы типа Б

Номер варианта	Диаметр прутка, мм	Нашпальный радиус, мм	Нарельсовый радиус, мм	Напряжения, МПа	Перемещения, мм
0	17	20	18	1506	7,47
1	16	17	18	1520	6,34
2	16	18	18	1689	7,47
3	16	18	17	1689	7,52
4	17,5	17	18	1373	5,41
5	17,5	18	18	1135	4,38
6	17,5	18	17	1146	4,4
7	18	17	18	1349	5,19
8	18	18	18	1179	4,92
9	18	18	17	1229	5,11

ное состояние дополнительно проведены расчеты 10 сборных вариантов клеммы типа А.

Под сборными вариантами подразумеваются модели с несколькими измененными геометрическими параметрами (диаметр прутка, вертикальный и горизонтальный радиусы).

Результаты исследования приведены в табл. 3.

На рис. 13, 14 представлено наглядное сравнение сборных вариантов клемм типа А с базовым 0 вариантом.

По результатам анализа напряженно-деформированного состояния определено, что комбинация геометрических параметров для существующей клеммы типа А (ЖБР-3, 0 вариант) является хорошо сбалансированной.

Также определено, что клеммы ЖБР 1, 2 и 10 вариантов могут оказаться альтернативными, близкими по эффективности базовому, 0 варианту, так как они также обеспечивают увеличение упругого хода уса клеммы при сохранении внутренних напряжений, не превышающих значений допускаемых напряжений по пределу текучести стали.

При сравнении 2 и 10 вариантов с 0 базовым наблюдается увеличение упругого хода клеммы на 3 и 10 % соответственно, сопровождающееся небольшим изменением напряжений (1 %). В 1 варианте определено немного большее изменение внутренних напряжений (7 %), при этом упругий ход уса клеммы увеличивается (на 13 %).

На основе полученных ранее зависимостей влияния геометрических параметров прутковых клемм типа Б на их напряженно-деформированное состояние дополнительно проведены расчеты 10 сборных вариантов клеммы типа Б, в которых комбинируются различные варианты диаметра прутка, нашпального и нарельсового радиусов (табл. 4).

Оптимальными величинами для данных параметров является интервал от 17 до 18 мм. Поскольку ранее уже определена доля влияния изменения вертикального радиуса на напряженно-деформированное состояние клеммы, для облегчения анализа результатов рассматривается плоская конструкция В-образной клеммы.

На рис. 15, 16 представлено наглядное сравнение сборных вариантов клемм типа Б с базовым (вариант 0). Для более удобного представления данных расположим графики в порядке возрастания величин напряжений и перемещений.

На графиках наглядно показано, что комбинация геометрических параметров для существующей клеммы типа Б (АРС, 0 вариант) является наиболее удачной, так как обеспечивает наибольшие перемещения в точке приложения силы, сохраняя наименьшие внутренние напряжения.

Близким, но не лучшим в сравнении с базовым 0 вариантом является 1 вариант, который показал ухудшения по напряжениям (1 %) и упругому ходу (15 %).

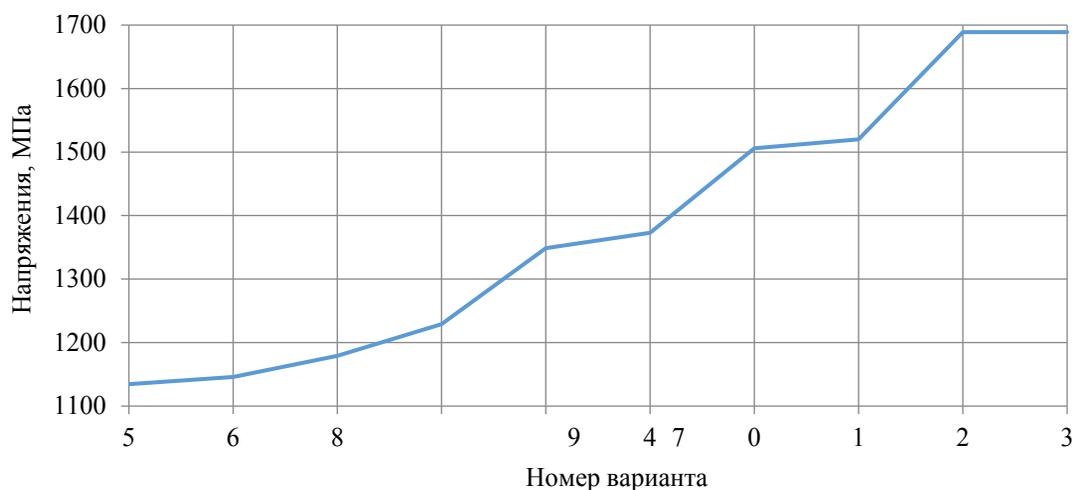


Рис. 15. Сравнение напряжений в сборных вариантах клеммы типа Б

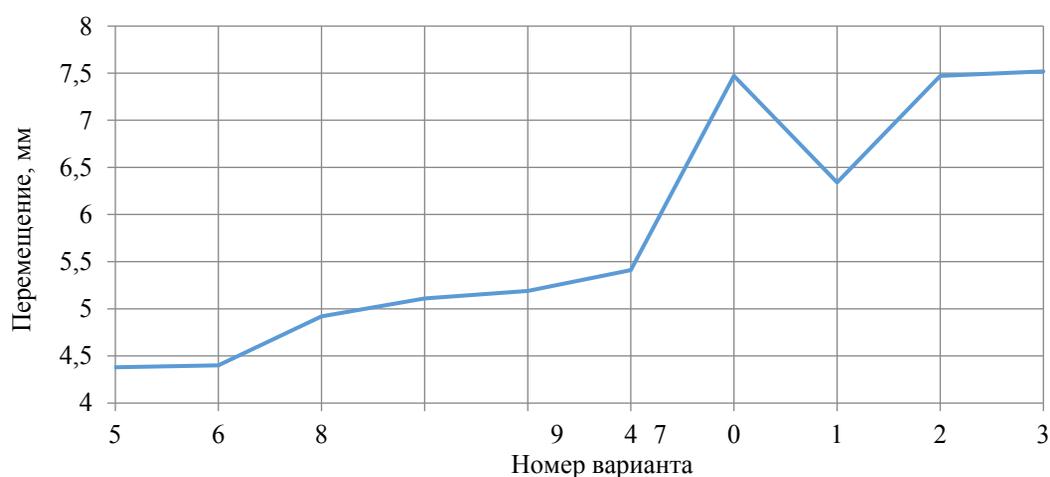


Рис. 16. Сравнение перемещений в сборных вариантах клеммы типа Б

Выводы

1. Анализ конструкции современных промежуточных рельсовых креплений показал, что интервалы варьирования геометрических параметров прутковых клемм (диаметр прутка, вертикальный радиус, горизонтальный радиус) имеют относительно небольшие пределы и существенные ограничения, связанные с требованиями обеспечения прочности, упругости и работоспособности всего узла крепления.

2. Результаты многовариантного моделирования прутковых клемм показали, что относительно небольшие интервалы варьирования изменения геометрических параметров существующих конструкций прутковых клемм имеют

небольшое влияние на изменение их напряженно-деформированного состояния (до 15 % по упругому ходу).

3. Наибольшим влиянием на изменение напряженно-деформированного состояния клемм обладает параметр «диаметр прутка» (до 50 %), но он имеет разнонаправленные требования по обеспечению прочности и упругости. Варьирование параметра вертикального радиуса боковой части клеммы от ∞ до 120 мм (соответственно для АРС и ЖБР) не сильно влияет на внутренние напряжения и упругий ход (в пределах 1 %).

Для дальнейшего совершенствования конструкции клеммы рекомендуется рассмотреть варианты клемм с вертикальными радиусами менее 60 мм,

что влечет за собой необходимость коренного изменения самой формы клемм.

4. Для значительного увеличения надежности клемм необходимы дальнейшие исследования по разработке нового типа рельсового скрепления с принципиально иной формой (отличной от современной В-образной формы) упругой прутковой клеммы.

Библиографический список

1. Крысанов Л. Г. Определение напряженно-деформированного состояния и усталостной прочности клемм ЖБР-3 / Л. Г. Крысанов, А. А. Дорошкевич, А. С. Антипов и др. // Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: сборник научных трудов. Сер.: Труды ВНИИЖТа. — М.: Интекст, 2000. — С. 93–99.

2. Виноградов А. Г. Совершенствование конструкции и технологии изготовления пружинных клемм крепления рельсов: автореф. дисс. ... канд. техн. наук / А. Г. Виноградов. — Магнитогорск: Магнитогорский государственный технический университет им. Г. И. Носова, 2013. — 19 с.

3. Круглов В. М. Испытывается усовершенствованное скрепление / В. М. Круглов, Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев и др. // Путь и путевое хозяйство. — 2007. — № 11. — С. 12–13.

4. Круглов В. М. Модернизированное рельсовое скрепление APC / В. М. Круглов, Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Бога-

чев и др. // Путь и путевое хозяйство. — 2011. — № 3. — С. 10–12.

5. Аксенов Ю. Н. Модернизация рельсового скрепления типа APC / Ю. Н. Аксенов, А. Ю. Богачев, Е. Г. Курзина // Транспорт Российской Федерации. — 2010. — № 3. — С. 72–73.

6. Антонов Н. И. О разработке и внедрении скреплений для суровых условий Сибири / Н. И. Антонов, Д. В. Величко // Путь и путевое хозяйство. — 2020. — № 2. — С. 17–20.

7. Альбом элементов и конструкций верхнего строения пути. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 19.12.2011. — М., 2012.

8. Карпущенко Н. И. Совершенствование рельсовых скреплений / Н. И. Карпущенко, Н. И. Антонов. — Новосибирск: СГУПС, 2003. — 300 с.

9. Деменчук Н. П. Основы теории напряженного и деформированного состояния: учеб. пособие / Н. П. Деменчук, А. А. Прилуцкий. — СПб.: Университет ИТМО, 2016. — 118 с.

10. Инструкция по устройству, укладке, содержанию и ремонту бесстыкового пути. — Утв. распоряжением ОАО «РЖД» от 14.12.2016 № 2544р (ред. от 19.10.2020).

Дата поступления: 25.07.2023

Решение о публикации: 30.08.2023

Контактная информация:

КАРЮКИН Максим Александрович — ведущий инженер РЦДМ, аспирант кафедры «Путь и путевое хозяйство»; m.caryuckin@yandex.ru

Multivariate Modeling of Design Parameters of Elastic Clips of Modern Rail Fasteners, with Analysis of Their Stress-Strain State

M. A. Karyukin

Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk str., Novosibirsk, 630049, Russian Federation

For citation: Karyukin M. A. Multivariate Modeling of Design Parameters of Elastic Clips of Modern Rail Fasteners, with Analysis of Their Stress-Strain State // *Proceedings of Petersburg Transport University*, 2023, vol. 20, iss. 3, pp. 507–518. (In Russian). DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-507-518

Abstract

Purpose: To determine the influence of geometric parameters on the most common elastic rod clip used in modern intermediate rail fastenings — the B-shaped clip (such as reinforced concrete rail (RCR) clip and anchor rail fastening (ARF)) — on changes in its stress-strain state. To propose a further direction of improving the design of elastic rod clips of rail fasteners to increase the reliability of the structure. **Methods:** The article presents the results of multivariate modeling of the geometric parameters of the clips (RCR — 20 pcs., ARF — 13 pcs.)

with the analysis of their stress-strain state, using the methods of software and computer systems SolidWorks and Ansys Workbench. **Results:** Analysis of the design of modern fasteners has shown that the intervals for varying the geometric parameters of the clips (rod diameter, vertical radius, horizontal radius) have small limits and significant limitations associated with the requirements for ensuring the strength, elasticity and operability of the entire fastening. The necessity of considering options with vertical radii less than 60 mm has been revealed, which entails the need for a radical change in the shape of the clips themselves. **Practical significance:** As a result of the analysis of the calculations of multivariant models, the degrees of influence of the intervals of variation of the geometric parameters of rod clips (rod diameter, vertical radius, horizontal radius) on the stress-strain state have been determined. It is established that in order to further increase the elasticity of the clips, it is necessary to develop a new type of rail fastening with a fundamentally different shape (different from the modern B-shaped) elastic clip that does not have modern design limitations in geometric parameters.

Keywords: Railway track, rail fastening, software and computing complex, SolidWorks, Ansys, geometric parameters, stresses.

References

1. Krysanov L. G., Doroshkevich A. A., Antipov A. S. et al. *Opredelenie napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ustalostnoy prochnosti klemm ZhBR-3* [Determination of the stress-strain state and fatigue strength of ZhBR-3 terminals]. *Povyshenie nadezhnosti raboty verkhnego stroeniya puti v sovremennykh usloviyakh ekspluatatsii: sbornik nauchnykh trudov. Ser.: Trudy VNIIZhTa* [Improving the reliability of the work of the upper structure of the track in modern operating conditions: a collection of scientific papers. Series: Proceedings of VNIIZhT]. Moscow: Intekst Publ., 2000, pp. 93–99. (In Russian)
2. Vinogradov A. G. *Sovershenstvovanie konstruktсии i tekhnologii izgotovleniya pruzhinnykh klemm krepleniya rel'sov: avtoref. diss. ... kand. tekhn. nauk* [Improving the design and technology of manufacturing spring terminals for fastening rails: author. diss. ... cand. tech. Sciences]. Magnitogorsk: Magnitogorskiy gosudarstvennyy tekhnicheskiy universitet im. G. I. Nosova Publ., 2013, 19 p. (In Russian)
3. Kruglov V. M., Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu. *Ispytyvaetsya usovershenstvovannoe skreplenie* [An improved fastening is being tested]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Path and track facilities]. 2007, Iss. 11, pp. 12–13. (In Russian)
4. Kruglov V. M., Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu. et al. *Modernizirovannoe rel'sovoe skreplenie ARS* [Modernized rail fastening ARS]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2011, Iss. 3, pp. 10–12. (In Russian)
5. Aksenov Yu. N., Bogachev A. Yu., Kurzina E. G. *Modernizatsiya rel'sovogo skrepleniya tipa ARS* [Modernization of rail fastening type ARS]. *Transport Rossiyskoy Federatsii* [Transport of the Russian Federation]. 2010, Iss. 3, pp. 72–73. (In Russian)
6. Antonov N. I., Velichko D. V. *O razrabotke i vnedrenii skrepleny dlya surovyykh usloviy Sibiri* [On the development and implementation of fasteners for the harsh conditions of Siberia]. *Put' i putevoe khozyaystvo* [Way and track facilities]. 2020, Iss. 2, pp. 17–20. (In Russian)
7. *Al'bom elementov i konstruktсий verkhnego stroeniya puti. Utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 19.12.2011* [Album of elements and structures of the track superstructure. Approved Order of Russian Railways OJSC dated December 19, 2011]. Moscow, 2012. (In Russian)
8. Karpushchenko N. I., Antonov N. I. *Sovershenstvovanie rel'sovykh skrepleny* [Improvement of rail fastenings]. Novosibirsk: SGUPS Publ., 2003, 300 p. (In Russian)
9. Demenchuk N. P., Prilutskiy A. A. *Osnovy teorii napryazhennogo i deformirovannogo sostoyaniya: ucheb. posobie* [Fundamentals of the theory of stress and strain: a tutorial]. St. Petersburg: Universitet ITMO Publ., 2016, 118 p. (In Russian)
10. *Instruktsiya po ustroystvu, ukladke, soderzhaniyu i remontu besstykovogo puti. Utv. rasporyazheniem OAO "RZhD" ot 14.12.2016 № 2544r (red. ot 19.10.2020)* [Instructions for the device, laying, maintenance and repair of a seamless track. Approved Order of Russian Railways JSC dated December 14, 2016 № 2544r (revision dated on October 19, 2020)]. (In Russian)

Received: July 25, 2023

Accepted: August 30, 2023

Author's information:

Maxim A. KARYUKIN — Lead Engineer of the RCDM (Center for Diagnostics and Monitoring), Postgraduate Student, Department "Track and Track Management"; m.caryuckin@yandex.ru