

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ И НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ УПРУГИХ КЛЕММ ПРОСТОГО И СЛОЖНОГО ОЧЕРТАНИЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ СКРЕПЛЕНИЙ РЕЛЬСОВОГО ПУТИ И СТРЕЛОЧНЫХ ПЕРЕВОДОВ МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Розглянуто проблему створення пружного рейкового скріплення для швидкісного руху поїздів. Викладені методи дослідження навантаженості та пружно-деформованого стану пружних клем. Наведені результати досліджень впливу параметрів та форми пружних клем на їх працездатність.

DETERMINATION OF LOADINGS AND THE TENSELY-DEFORMED STATE OF RESILIENT TERMINALS OF SIMPLE AND DIFFICULT OUTLINE OF THE INTERMEDIATE CLAMPING OF RAIL WAY AND POINTER TRANSLATIONS BY THE METHOD OF EVENTUAL ELEMENTS

The problem of creation of the resilient rail fastening is considered for speed motion of trains. Laid out methods of research of loadings and resiliently-deformed state of resilient terminals. Resulted results of researches of influencing of parameters and form of resilient terminals on their capacity.

Вопросам создания и внедрения конструкций упругих промежуточных скреплений и упругих клем этих скреплений уделено большое внимание. Во многих работах [1-48, 54] опубликованы результаты исследований и проведена регистрация технических условий, которые направлены на создание элементов упругих промежуточных скреплений и упругих клем.

В настоящей работе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния упругих клем различных конструкций упругих промежуточных скреплений рельсового пути и стрелочных переводов, создаваемых Отделом проблем рельсового транспорта Института геотехнической механики им. Н.С. Полякова Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины) и Научно-конструкторским технологическим бюро путевого хозяйства “Укрзалізниці” (НКТБ ЦП УЗ) в период 1994-2004 г.г. под научным руководством и с непосредственным участием автора настоящей статьи [1-33]. Для оценки напряженно-деформированного состояния упругих клем различного очертания и формы в данной работе использовался метод конечных элементов (МКЭ) [49].

С помощью МКЭ учтены геометрические формы и реальные условия работы конструкции, распределение внешних нагрузок, условия закрепления, а также механические свойства используемых материалов.

Моделирование работы клем при эксплуатационных нагрузках выполнялось с применением специализированного проектно-вычислительного комплекса SCAD.

Расчетные модели каждой из исследуемых клем приведены ниже.

В результате расчетов были определены перемещения узловых точек при действии эксплуатационных нагрузок, а также усилия и напряжения в конечных элементах.

Для оценки прочности элементов конструкции, работающих в условиях сложного напряженного состояния, характеризующегося главными напряжениями σ_1 , σ_2 , и σ_3 , использована гипотеза (теория прочности), которая предусматривает возможность сопоставления некоторого эквивалентного напряжения σ_e с пределом σ_0 , который соответствует простому одноосному растяжению. Условие, характеризующее отсутствие предельного состояния в материале, представляется в виде:

$$\sigma_e = f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, k_1, \dots, k_n) \leq \sigma_0^+, \quad (1)$$

где k_1, \dots, k_n – некоторые константы, зависящие от используемой теории прочности [49].

В расчете использовалась теория октаэдрических касательных напряжений или удельной потенциальной энергии формоизменения, которая нашла широкое применение для оценки прочности упруго-пластичных материалов и хорошо подтверждается экспериментально. Согласно этой теории σ_e находится из соотношения:

$$\sigma_e = \sigma_1 = \left\{ \frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] \right\}^{1/2}, \quad (2)$$

а условие прочности может быть записано в виде:

$$\sigma_e \leq [\sigma], \quad (3)$$

где $[\sigma]$ – допускаемые напряжения для материала, из которого изготовлена конструкция клеммы.


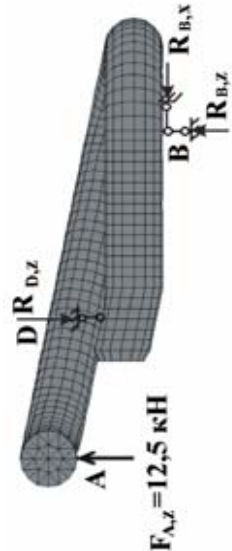
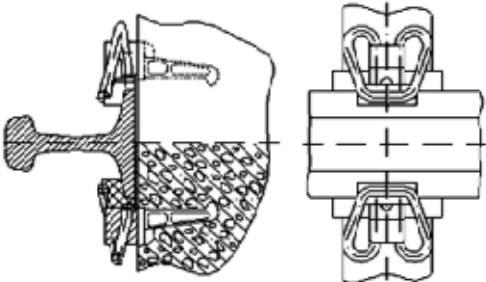
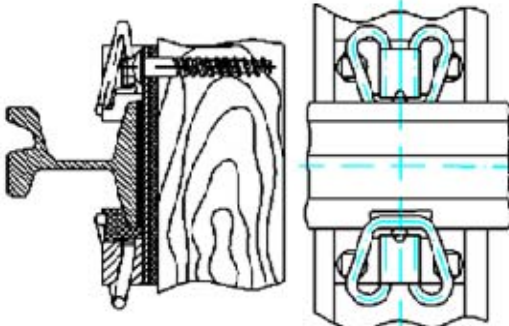
При этом, допустимые напряжения для исследуемых клемм приняты с пределом текучести – $[\sigma_{T,02}] = 1570$ МПа и пределом прочности – $[\sigma_b] = 1710$ МПа, твердостью по Бранеллю (НВ) не более –47-50, в соответствии с материалом высокопрочной и пружинной стали марки 60 С 2 А [50].

В основу исследований положено требование, что усилие прижатия подошвы рельса одной клеммой должно быть равно нормативной нагрузке – 12,5 кН, а величина усилия прижатия рельса двумя клеммами равна соответственно – 25 кН [51-52].

При значительном многообразии экспериментальных и промышленных образцов упругих клемм и упругих промежуточных креплений, разработанных в Украине [1-33], их можно разделить на три основные группы, представленные в табл. 1.

Таблица 1 – Упругие клеммы и упругие промежуточные скрепления, разработанные в Украине

№ п/п	Конструкция промежуточного скрепления	Тип скрепления	Тип упругой клеммы	Внешний вид клемм и схемы их нагружения	Схема узла скрепления	Размер от оси прикрепителя, мм	
						до точки кон-такта клем-мы и по-дошвы рельса	до точки кон-такта клеммы и шпалы (упорки)
1	2	3	4	5	6	7	8
ПЕРВАЯ ГРУППА							
1	Безболтовое клеммное анкерное скрепление с упругими клеммами	КПП-1	КП-1			37	16
2	(анкер забетонирован в железобетонную шпалу)	КПП-5	КП-5			37	16

1	2	3	4	5	6	7	8
3		КШПТ-7	КШПТ-7	 		58	24
4	<p>Безбол- товое клеммно- подкла- дочное скреп- ление с упругими клеммами (подклад- ки прикреп- ляются к шпале независи- мо от клеммы)</p>	КШПДТ-7	КШПТ-7			58	24

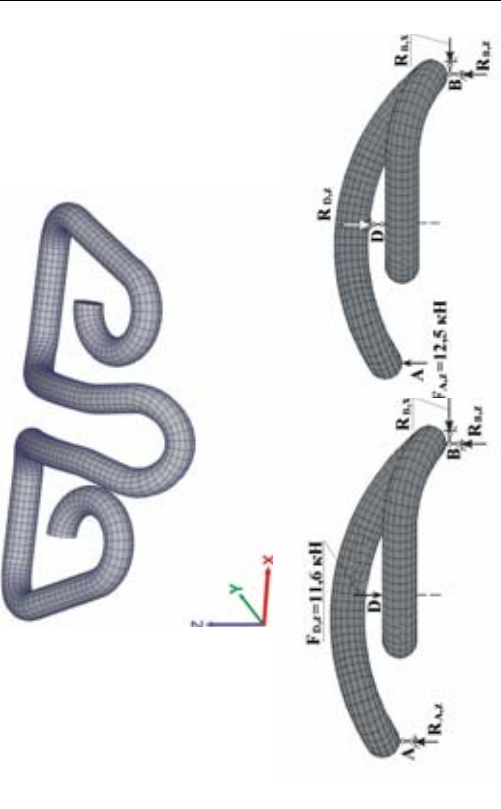
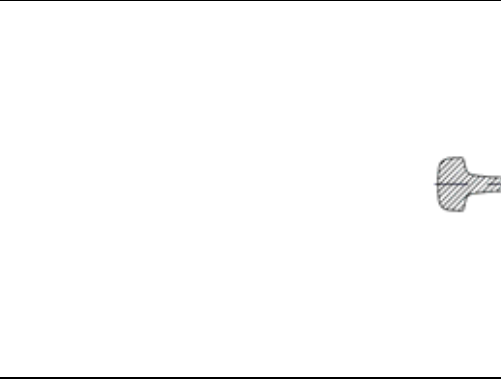
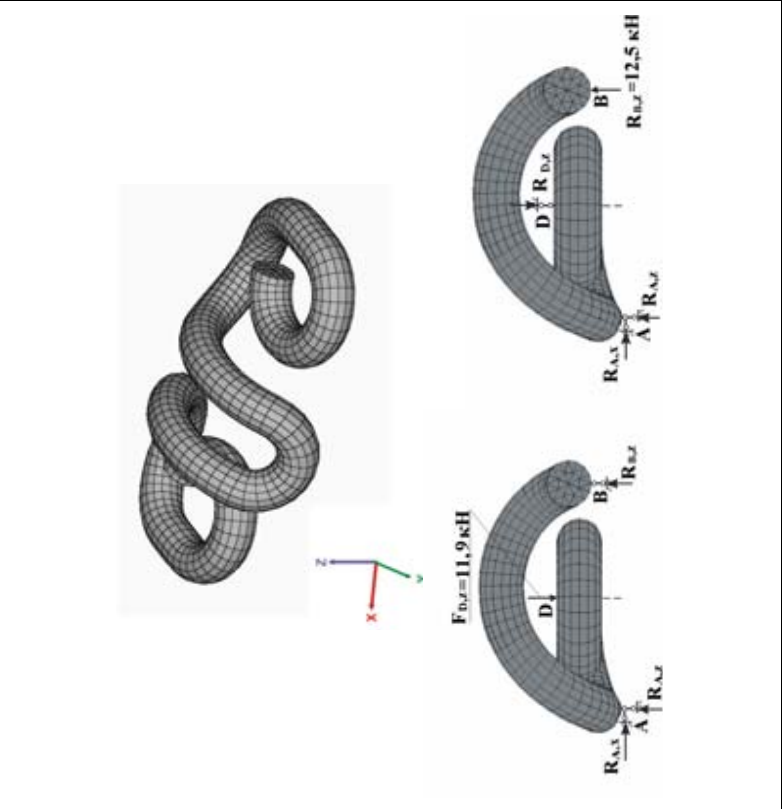
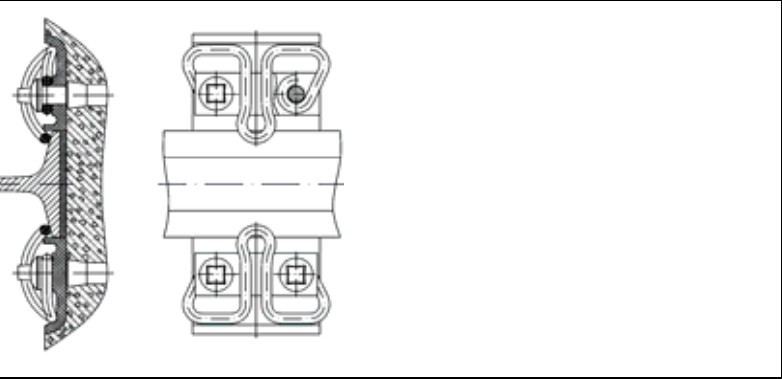
1	2	3	4	5	6	7	8
5	Безболтовое клеммно-подкладочное скрепление с упругими клеммами (подкладки прикреплются к брусу независимо от клеммы)	Стрелочная часть	КП-3			81	157
6		Контррельсовая часть	КП-3			81	157

Вторая группа

7	Клеммно-болтовое с упругими клеммами (подкладки прикреплены к шпале независимо от клемм)	КПП-2	КП-2			28	20
---	------------------------------------------------------------------------------------------	-------	------	--	--	----	----

1	2	3	4	5	6	7	8
8		КППД-2	КП-2			28	20
9			КП-2-1				28
10		КПП-2	КП-2-2				28

1	2	3	4	5	6	7	8
ТРЕТЬЯ ГРУППА							
11	Клеммно-шурупные с упругими клеммами (одна часть клеммы прикрепляется шурупам и к шпале, а другая часть клеммы прижимается к подше рельса, а третья – опирается на шпалу через прокладку)	КПП-13	КП-13			34	40
12		КПП-13-1	КП-13-1			60	56
13		КПП-13-2	КП-13-2			48	56
14		КПП-13-3	КП-13-3			45	60

1	2	3	4	5	6	7	8
15		КПП-14-1	КП-14-1	 <p> $F_{D,1} = 11,6 \text{ кН}$ $F_{A,1} = 12,5 \text{ кН}$ </p>		61	60
16		КПП-14-2	КП-14-2	 <p> $F_{D,2} = 11,9 \text{ кН}$ $R_{B,2} = 12,5 \text{ кН}$ </p>		43	35

1	2	3	4	5	6	7	8
17		КПП-15	КП-15			61	61
18		КПП-15-1	КП-15-1			61	61
19		КПП-15-2	КП-15-2			61	61

Для определения рациональных параметров упругих клемм и креплений проведено исследование нагруженности и напряженно-деформированного состояния клемм новых конструкций типов КП-1; КП-5; КПТ-7; КП-3; КП-2; КП-13; КП-14, КП-15 и им аналогичных. При этом предусмотрены варианты исследований с учетом изменений как различной формы изгиба прутка, так и изменением расстояний от оси прикрепителей до центров мест опирания на подошву рельса, а также на шпалу через прокладку. Рассмотрены также варианты с различным диаметром прутка. Всего использовано двадцать основных вариантов, представленных в табл. 1.

Упругие клеммы типа КП-1 и КП-5.

Исследования проводились для двух видов нагружения. Во-первых – для «рабочего» режима, когда в точке контакта средней части клеммы (носика) и подошвы рельса прикладывалась «рабочая» нормативная нагрузка ($R_A z$) величиной 12,5 кН, а на опорах формировалась реактивная нагрузка ($R_B z$) и ($R_C z$). Во-вторых – для «монтажного» режима, когда к свободному от фиксации концу клеммы прикладывалась «монтажная» горизонтальная (поперечная) нагрузка ($N_A x$), обеспечивающая технологическое поперечное перемещение свободного конца клеммы на величину 16,5 мм (см. табл. 1). При этом, вертикальные перемещения (z) точки контакта клеммы с рельсом соответственно для клемм типов КП-1 и КП-5 равнялись 6,41 мм и 6,15 мм, а перемещения (y), направленные от рельса по оси (Y) соответственно равнялись ($-2,5$ мм) и ($-2,36$ мм).

Максимальные напряжения в «рабочем режиме» нагружения силой величиной 12,5 кН для обоих типов клемм отличаются незначительно и составляют в клемме типа КП-1 величину 1580 МПа, а в клемме типа КП-5 величину 1557 МПа.

Максимальные напряжения в «монтажном режиме» нагружения для обеспечения общей деформации (технологической раздвижки) 16,5 мм, составляют в клемме типа КП-1 величину $\sigma^{IV} = 1450$ МПа, а в клемме типа КП-5 величину $\sigma^{IV} = 1340$ МПа.

Величина технологической «монтажной» поперечной нагрузки при установке клемм в рабочее положение с раздвижкой концевых участков на величину 16,5 мм составила для клемм типа КП-1 величину 7,35 кН, а для клемм типа КП-5 величину 6,63 кН.

Основные характеристики нагруженности и напряженно-деформированного состояния клемм типов КП-1 и КП-5 сведены в табл. 2.

Величина поперечной жесткости между концевыми участками клемм в «монтажном режиме» в клеммах КП-1 и КП-5 равна 0,45 кН/мм и 0,40 кН/мм соответственно.

Исследования показали, что увеличение диаметра средней части клеммы типа КП-5 по сравнению с клеммой типа КП-1 приводит к уменьшению поперечной жесткости клеммы типа КП-5, а следовательно к уменьшению величины поперечной нагрузки и уменьшению максимальных напряжений, поскольку величина деформации одинакова для каждой клеммы (16,5 мм)

Таблица 2 - Характеристика напряженно-деформированного состояния и нагруженности упругих клемм

№ п/п	Тип клеммы	Максимальные эквивалентные напряжения (МПа)	Максимальные перемещения клеммы в точке контакта с подошвой рельса по направлениям координатных осей, мм			Жесткость клеммы в точке контакта с подошвой рельса, кН/мм	Требуемая сила затяжки шурупа или болта, кН	Перемещения клеммы под головкой шурупа или болта, мм	Жесткость клеммы под головкой шурупа или болта, кН/мм	Сила нагружения клеммы на шпалу через прокладку, кН
			X	Y	Z					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	КП-1, Ø 16 мм «рабочий режим»	1580	0	-2.5	6.41	1.95	-	-	-	?
1	КП-1, Ø 16 мм «монтажный режим»	1450	-	-	-	-	7.35 (поперечная монтажная нагрузка)	8.25 x 2 (поперечные перемещения от монтажной нагрузки)	0.45 (поперечная жесткость клеммы)	
	КП-5, Ø 16 мм «рабочий режим»	1557	0	-2.36	6.15	2.03	-	-	-	?
2	КП-5, Ø 16 мм «монтажный режим»	1340	-	-	-	-	6.63 (поперечная монтажная нагрузка)	8.25 x 2 (поперечные перемещения от монтажной нагрузки)	0.40 (поперечная жесткость клеммы)	
3	КПТ-7, Ø 16 мм	2239	0	-3.2	14.4	0.868	-	-	-	?
4	КП-2, Ø 14 мм	2268	-0.32	-0.42	11.7	1.07	28.1	-10.4	2.7	15.6
5	КП-2-1, Ø 13 мм	2209	-0.52	-0.29	14.3	0.87	26.1	-13.2	1.98	13.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
6	КП-2-2, Ø 14 мм	1989	-0.43	-0.48	11.0	1.14	27.3	-9.95	2.74	14.8
7	КП-3, Ø 16 мм	1491	-0.08	-0.21	5.78	2.16	19.3	-3.9	4.95	6.8
8	КП-13, Ø 16 мм	1544	0	0.46	8.3	1.51	11.91	-5.82	2.05	11.32
9	КП-13-1, Ø 16 мм	2683	0	1.71	26.1	0.48	13.5	-14.0	0.96	14.5
10	КП-13-2, Ø 16 мм	2366	0	0.26	19.5	0.64	10.6	-11.7	0.91	8.7
11	КП-13-3, Ø 16 мм	2195	0	0.97	18.0	0.69	10.9	-10.0	1.09	9.3
12	КП-14-1, Ø 14 мм	3674	0	1.62	43.9	0.28	11.6	-23.1	0.5	10.7
13	КП-14 -2, Ø 16 мм	1499	0	0.16	6.75	1.85	11.9	-4.11	2.9	11.3
14	КП-15, Ø 14 мм	2098	0	0.44	11.91	1.05	10.41	-9.38	1.11	8.32
15	КП-15-1, Ø 14 мм	1754	0	0.69	7.23	1.73	10.05	-6.7	1.5	7.6
16	КП-15-2, Ø 16 мм	1249	0	-0.16	4.82	2.59	10.05	-4.21	2.39	7.6

Учитывая преимущества показателей напряженно-деформированного состояния клемм типа КП-5 по сравнению с клеммами типа КП-1, отмеченные ранее в п.п. 1-3 клеммы типа КП-5 имеют лучшую работоспособность, в особенности при циклическом «монтажном» нагружении при технологической «сборке-разборке» узла промежуточного скрепления на звеносборочных базах и в эксплуатационных условиях на рельсовом пути.

Упругие клеммы типа КРТ-7.

Для определения нагруженности и напряженно-деформированного состояния этой упругой клеммы нагружение осуществлялось нормативной нагрузкой равной 12,5 кН, приложенной в средней части (носика) клеммы, где имеется место контакта клеммы и подошвы рельса посредством изолирующего вкладыша.

От действия нормативной нагрузки между средней частью клеммы и подошвой рельса происходит вертикальная деформация точки взаимного контакта клеммы и подошвы рельса на величину $z=14,4$ мм, а максимальные эквивалентные напряжения, равные $\sigma^{IV}=2239$ МПа. При этом имеет место перенапряжение клеммы в опасном сечении, поскольку допустимые напряжения по пределу текучести $[\sigma_{T,02}]=1570$ МПа и по пределу прочности $[\sigma_B]=1710$ МПа.

При уменьшении величины прижатия клеммы до 9,55 кН вместо 12,5 кН величина деформации в зоне контакта клеммы и подошвы рельса составляет 11,0 мм, а напряжение $\sigma^{IV}=1710$ МПа, что соответствует пределу прочности $[\sigma_B]=1710$ МПа.

Упругие клеммы типа КП-3.

В результате исследований получены величины перемещений клеммы типа КП-3 в «монтажном» режиме, включая точку опирания в стойку контррельса или в консоли подкладки-подушки, где условно воздействует сила, равная 19,3 кН, которая формирует прижатие концов клеммы к подошве рельса нормативной силой, равной 12,5 кН. При этом, величина условной вертикальной деформации клеммы в точке контакта равна $-3,9$ мм. Жесткость клеммы в этой точке равна 4,95 кН/мм. Максимальные эквивалентные напряжения равны $\sigma^{IV} = 1491$ МПа и не превышают допустимых $[\sigma_{T,02}]=1570$ МПа.

При воздействии нормативной нагрузки, равной 12,5 кН в месте контакта клеммы и подошвы величина вертикальных перемещений концевых участков клеммы равна $z = 5,78$ мм. Жесткость клеммы в точке контакта с подошвой рельса, равна величине 2,16 кН/мм.

Величины жесткости клемм в точках взаимного контакта клеммы с подошвой рельса и с опорными элементами на подкладках-подушках или стойках контррельсов несколько завышены, особенно в точках опирания в проемах подкладки-подушки и стойки контррельса. Такое значение жесткости 4,95 кН/мм в зонах размещения проемов для опирания клеммы требует, прежде всего, высокой точности обработки и соблюдения координат фиксированного положения клеммы в проеме.

Упругие клеммы типа КП-2.

Для базового варианта исследований принята клемма типа КП-2, имеющая диаметр поперечного сечения прутка $\varnothing=14$ мм, а наклон задней стенки к вертикальной плоскости равен углу $\alpha=7^\circ$. В следующих вариантах исследований угол наклона задней стенки клеммы принят $\alpha=0^\circ$. В этих случаях принято условное обозначение клеммы с диаметром прутка $\varnothing=13$ мм и углом $\alpha=0^\circ$, – типа КП-2-1, а с диаметром прутка $\varnothing=14$ мм и углом $\alpha=0^\circ$, – типа КП-2-2.

По результатам приведенных выше исследований этих клемм получено, что при обеспечении требуемой величины нормативной нагрузки, равной 12,5 кН, в месте контакта концевых участков клеммы и подошвы рельса, величина наибольших эквивалентных напряжений (σ^{IV}) для всех исследуемых вариантов клемм превышает допустимые напряжения. Так, величина максимальных эквивалентных напряжений по IV теории прочности для вариантов клемм типа КП-2 и КП-2-1 составила соответственно 2268 МПа и 2204 МПа, при допустимых напряжениях по пределу текучести $[\sigma_{T, 02}] = 1570$ МПа и по пределу прочности $[\sigma_B] = 1710$ МПа. Для варианта клеммы типа КП-2-2, с учетом диаметра прутка $\varnothing=14$ мм и угла наклона задней стенки клеммы, равному нулю ($\alpha=0^\circ$), максимальное эквивалентное напряжение по IV теории прочности составило 1989 МПа. Полученная величина напряжения, при этом, на 20 % меньше, чем в предыдущих вариантах, однако превышает допустимые напряжения.

Установлено, что величины деформаций клемм типов КП-2; КП-2-1 и КП-2-2 в месте контакта с клеммными болтами, при равных условиях создания нагрузки, равны соответственно $z = -10,7$ мм; $z = -13,2$ мм и $z = -9,95$ мм, а сила затяжки клемм клеммными болтами равна, соответственно, 28,1 кН; 26,1 кН и 27,3 кН. Жесткость клемм в точке затяжки клеммных болтов равна 2,7 кН/мм; 1,98 кН/мм и 2,74 кН/мм. Величины деформаций концевых участков клеммы в месте контакта с подошвой рельса, при равных условиях нагружения нормативной нагрузкой величиной 12,5 кН, равны, соответственно, $z=11,7$ мм; $z=14,8$ мм и $z=11,0$ мм. Жесткость клемм в точке контакта концевых участков клемм и подошвы рельса равны 1,07 кН/мм; 0,87 кН/мм и 1,14 кН/мм.

Из приведенных результатов видно, что форма и геометрические параметры клемм типов КП-2-1 и КП-2-2 являются более рациональными по сравнению с клеммой типа КП-2, поскольку расположение задних участков клемм в вертикальной плоскости ($\alpha=0^\circ$) позволяет уменьшить изгибающий и крутящий моменты, создаваемые прикладываемым усилием затяжки клеммного болта. Это приводит к снижению максимальных эквивалентных напряжений в наиболее напряженной точке задней стенки клеммы, а также к перераспределению суммарных эквивалентных напряжений.

Отсутствие разрушения клемм типа КП-2-2 в эксплуатации происходит в связи с недожатием клемм до нормативной величины силы прижатия к подошве рельса $R_{A, Z} = 12,5$ кН. Для обеспечения работы клеммы с соблюдением фактических эквивалентных напряжений, не превышающих предел текучести $[\sigma_{T, 02}] = 1570$ МПа, изменятся все показатели работы клеммы. В этом случае величина прижатия клеммой подошвы рельса уменьшится до 9,86 кН вместо

12,5 кН, а перемещение клеммы под головкой болта уменьшится до 7,85 мм, вместо 11,0 мм и сила затяжки болта уменьшится до 21,5 кН, вместо 27,3 кН.

Дальнейшее совершенствование конструкции клемм по аналогии с исследуемым образцом клемм типа КП-2-2 привело к улучшению их работоспособности в эксплуатационных условиях [7, 13, 17, 19, 20].

Упругие клеммы типа КП-13 упругого скрепления типа КПП-13 впервые опубликованы в 2003 г. в работе [5] и так условно названы автором по первому упоминанию. В 2003 г. в технических условиях [54] конструкция этой клеммы названа КП-7.

В данной работе представлены исследования напряженно-деформированного состояния нескольких видов клемм этого типа, которые выполнены из круглого прутка $\varnothing = 16$ мм и имеют сложную пространственную форму. Клеммы этого типа, а также упругого промежуточного скрепления типа КПП-13 являются принципиально новой конструкцией [5].

По результатам исследований получено, что создание нормативной нагрузки в местах прижатия клемм к подошве рельса величиной 12,5 кН обеспечивается посредством воздействия от крепежителей (шуруп или болт) на клеммы типов КП-13; КП-13-1; КП-13-2 и КП-13-3 монтажной нагрузки равной, соответственно, 11,91 кН; 13,5 кН; 19,5 кН и 7,92 кН. При этом величины вертикальных упругих перемещений в местах действия крепежителей для указанных типов клемм равны – 5,82 мм, – 14,0 мм, – 11,3 мм и – 10,0 мм, а величины жесткости клемм в местах действия крепежителей, также равны 2,05 кН/мм; 0,96 кН/мм; 1,72 кН/мм; 0,79 кН/мм. Величины наибольших эквивалентных напряжений (σ^{IV}) в опасном сечении клеммы для исследуемых вариантов соответственно указанной выше последовательности, равны 1544 МПа; 2683 МПа; 2360 МПа и 2195 МПа.

Величины деформаций участков клемм в месте контакта с подошвой рельса при одинаковых условиях нагружения нормативной нагрузкой 12,5 кН, равны, для указанных клемм, соответственно, 8,3 мм; 26,1 мм; 19,5 мм и 18,0 мм, а жесткости клемм в точке их контакта с подошвой рельса равны 1,51 кН/мм; 0,48 кН/мм; 0,64 кН/мм и 0,69 кН/мм.

Форма, плавные переходы кривизны и геометрические параметры клеммы типа КП-13 являются более рациональными, по сравнению с исследуемыми клеммами аналогичной формы типов КП-13-1; КП-13-2 и КП-13-3 по состоянию напряженно-деформированного состояния и нагруженности на крепежители. При этом, наибольшие эквивалентные напряжения (σ^{IV}) в опасном сечении клеммы типа КП-13 равны 1544 МПа при допустимых напряжениях по пределу текучести $[\sigma_{T, 02}] = 1570$ МПа. В остальных трех типах клемм наибольшие напряжения в опасных точках превышают допустимые.

Нагруженность на крепежители в скреплении типа КПП-13 с клеммой типа КП-13 составляет 11,91 кН, в то время, как в остальных конструктивных решениях клемм нагрузки находятся в пределах 7,92-19,5 кН. При этом, нагруженность на крепежители увеличивается с увеличением численного отношения

общей величины расстояния между точкой опирания клеммы на подошву рельса и точкой опирания клеммы на шпалу (посредством прокладки) до величины расстояния между осью прикрепителя и точкой опирания клеммы на шпалу.

Клемма типа КП-13 имеет наибольшую жесткость в зоне действия прикрепителя (2,05 кН/мм) в связи с малой величиной перемещения клеммы в этом месте (– 5,82) мм при нагрузке от прикрепителя величиной 11,91 кН. Жесткость клемм в зоне прикрепителя для остальных типов этой модели находится в пределах 0,79-1,00 кН/мм.

Клеммы типа КП-13 имеют наибольшую жесткость в зоне совместного контакта с подошвой рельса (1,51 кН/мм) в связи с малой величиной деформации (8,3 мм) от действия нормативной нагрузки 12,5 кН. Жесткость остальных клемм в зоне их контакта с подошвой рельса находится в пределах 0,48-0,69 кН/мм. Малая величина жесткости этих клемм и большая величина перемещений связана с большой величиной расстояния между точкой опирания клеммы на подошву рельса и точкой опирания на шпалу равной 104-116 мм при том, что у клеммы типа КП-13 это расстояние равно величине 74 мм.

Упругие клеммы типа КП-14.

В работе представлены исследования двух видов клемм этого типа, которые выполнены из круглого прутка диаметром 14 мм и 16 мм и имеют сложную пространственную форму. Клеммы этих типов КП-14-1 и КП-14-2 являются также принципиально новой конструкцией.

При исследовании создание нормативной нагрузки в местах контакта клеммы к подошве рельса величиной 12,5 кН обеспечивалось при воздействии от прикрепителей на клеммы типа КП-14-1 и КП-14-2 «монтажной» нагрузки, равной, соответственно, 11,6 кН и 11,9 кН. При этом величины вертикальных упругих перемещений в местах действия прикрепителей равны –23,10 мм и –4,11 мм, а величины жесткости клемм в местах действия прикрепителей также, равны 0,5 кН/мм и 2,9 кН/мм.

Величины эквивалентных напряжений (σ^{IV}) в опасном сечении клеммы для исследуемых вариантов клемм равны, соответственно, 3674 МПа и 1499 МПа.

Величины деформации участков клемм в месте контакта с подошвой рельса при одинаковых условиях нагружения нормативной нагрузкой величиной 12,5 кН равны для исследуемых типов клемм, соответственно, 43,9 мм и 6,75 мм, а жесткости клемм в этих местах равны 0,28 кН/мм и 1,85 кН/мм.

Форма и геометрические параметры клеммы типа КП-14-2 являются более рациональными по сравнению с аналогичными клеммами типа КП-14-1, по состоянию напряженного состояния клемм. При этом, напряжения (σ^{IV}) в клемме типа КП-14-2 равны 1499 МПа и не превышают допустимых напряжений по пределу текучести $[\sigma_{T, 02}] = 1570$ МПа. В клемме типа КП-14-1 максимальные напряжения значительно превышают допустимые (3674 МПа \geq 1570 МПа).

Нагруженность на прикрепители в скреплениях типа КП-14-1 и КП-14-2 составляют, соответственно, 11,6 кН и 11,9 кН и разница между нагрузками незначительна в связи с незначительной разницей в соотношениях между расстоя-

нием между точками опирания клеммы на подошву рельса и на шпалу и расстоянием между точками опирания клеммы на шпалу и на прикрепитель.

Упругие клеммы типа КП-15.

В работе представлены исследования трех вариантов клемм этого типа, которые выполнены из прутка диаметром 14 мм и 16 мм. Клеммы этих типов КП-15; КП-15-1 и КП-15-2 являются также принципиально новой конструкцией.

При исследовании создание нормативной нагрузки величиной 12,5 кН в местах контакта клеммы с подошвой рельса обеспечивалось при воздействии прикрепителями на клеммы типов КП-15; КП-15-1 и КП-15-2 «монтажной» нагрузки, равной, соответственно, 10,41 кН; 10,05 кН и 10,05 кН. При этом величины вертикальных упругих перемещений в местах действия прикрепителей равны – 9,38 мм; –6,7 мм и – 4,21 мм, а величины жесткости клемм в местах действия прикрепителей также равны 1,11 кН/мм; 1,5 кН/мм и 2,39 кН/мм.

Величины эквивалентных напряжений (σ^{IV}) в опасном сечении каждой из исследуемых клемм равны 2098 МПа; 1754 МПа и 1249 МПа.

Величины деформации клемм в месте контакта с подошвой рельса при одинаковых условиях нагружения нормативной нагрузкой 12,5 кН для исследуемых типов клемм, соответственно, равны 11,91 мм; 7,23 мм и 4,82 мм, а жесткость клемм в этих местах равны 1,05 кН/мм; 1,73 кН/мм и 2,59 кН/мм.

Установлено, что при одинаковых величинах расстояний между прикрепителем и точками опирания клеммы на подошву рельса и шпалу для исследуемых вариантов имеет место уменьшение максимальных напряжений в клеммах типов КП-15-1 и КП-15-2 (1754 МПа и 1249 МПа) по сравнению с клеммами типа КП-15 (2098 МПа). Причиной этому является уположивание формы боковых частей этих клемм с их понижением по сравнению с формой, имеющей приподнятость к верху боковых частей у клемм типа КП-15. Уменьшение напряжений у клемм типа КП-15-2 (1249 МПа) по сравнению с клеммами типа КП-15-1 (1754 МПа) связано с увеличением диаметра прутка до 16 мм, вместо 14 мм, поскольку все остальные геометрические параметры этих клемм одинаковы.

Нагруженность на прикрепители в исследуемых типах клемм, в основном, одинакова (10,41 кН; 10,05 кН; 10,05 кН). Причиной этому является одинаковые расстояния между прикрепителями и точками опирания клемм на подошву рельса (61 мм) и опирания на шпалу (61 мм).

Клемма типа КП-15-2 имеет малые перемещения и повышенную жесткость в месте контакта ее с подошвой рельса (4,82 мм и 2,59 кН/мм), а также в месте контакта с прикрепителем (–4,21 мм; 2,39 кН/мм), несмотря на то, что максимальные напряжения меньше допустимых (1249 МПа < 1570 МПа). Клемма типа КП-15 имеет хорошие показатели перемещений и жесткости в месте контакта с подошвой рельса (11,91 мм; 1,05 кН/мм) и в месте контакта с прикрепителем (–9,38 мм; 1,11 кН/мм), однако максимальные напряжения превышают допустимые (2098 МПа > 1570 МПа). Клемма типа КП-15-1 по напряженно-деформированному состоянию имеет промежуточное положение между клеммами типа КП-15 и КП-15-2, однако, максимальные напряжения превышают

допустимые, т. е $1754 \text{ МПа} > 1570 \text{ МПа}$).

Заклучение

С помощью метода конечных элементов проведены прецизионные теоретические исследования нагруженности и напряженно-деформированного состояния большого количества вариантов упругих клемм, имеющих различные параметры, форму и пространственную траекторию геометрической оси прутка клемм применительно к конструктивным решениям промежуточных рельсовых скреплений путевой структуры. Полученные результаты позволили решать ряд задач механики прочности рельсовых скреплений: установление рациональных параметров конструкции, определение характеристик упругости, получение показателей нагруженности и напряженности, выявление мест возможных разрушений и причин накопления остаточных деформаций и разрушений элементов промежуточных скреплений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Говоруха В.В. Создание и внедрение упругих элементов промежуточного скрепления рельсового пути // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 2 – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, 2003. – С. 162-171.
2. Говоруха В.В. Современные конструкции промежуточных рельсовых скреплений // Геотехническая механика. – Вип. 31. – Д.: Полиграфист, 2002. – С. 49-77.
3. Говоруха В.В. Упругие элементы промежуточных рельсовых скреплений // Геотехническая механика. – Вип. 31. – Д.: Полиграфист, 2002. – С. 78-94.
4. Говоруха В.В. Создание стрелочной железобетонной и смежной продукции для скоростного движения поездов // Геотехническая механика. – Вип. 31. – Д.: Полиграфист, 2002. – С. 201-207.
5. Говоруха В.В. Экспериментальные исследования показателей прочности упругих промежуточных скреплений рельсового пути // Геотехническая механика. – Вип. 43. – Д.: Полиграфист, 2003. – С. 187-195.
6. Булат А.Ф. Закономерность разрушения эластомеров при длительном циклическом нагружении / Булат А.Ф., Говоруха В.В., Дырда В.И. // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины им. Н.С. Полякова – Вип. 52. – Д., 2004. – С 3-95.
7. Костюк М.Д. Стрілочні переводи і суміжне устаткування для швидкісного руху поїздів / Костюк М.Д., Говоруха В.В // Залізничний транспорт України. – 2002. – № 3. – С. 15-17.
8. Костюк М.Д., Сучасна конструкція суміщеної рейкової колії 1520 та 1435 мм із залізобетонними шпалами та проміжним пружним рейковим скріпленням / Костюк М.Д., Говоруха В.В // Строительство: Сб. научн. тр. ДИИТ. – Вип. 10. – Д., 2002. – С. 72-75.
9. Кірпа Г.М. Інтеграція залізничного транспорту України у європейську транспортну систему: Монографія. – Д.: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна, Арт-Прес, 2003. – С. 211-214.
10. Деклараційний патент на винахід: № 49743 А. Україна (UA). Кл. E01B7/20. Вузол кріплення рамної рейки / Говоруха В.В., Костюк М.Д., Тараненко С.Д. – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
11. Деклараційний патент на винахід: № 49745 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Клема рейкового скріплення / Говоруха В.В., Костюк М.Д., Дубневич Я.В. – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
12. Деклараційний патент на винахід: № 49747 А. Україна (UA). Кл. E01B5/18. Контррейковий вузол / Говоруха В.В., Костюк М.Д., Тараненко С.Д. – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
13. Деклараційний патент на винахід: № 49768 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Рейкове скріплення / Говоруха В.В., Костюк М.Д. – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
14. Деклараційний патент на винахід: № 55333 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Пружинна клема рейкового скріплення / Говоруха В.В., Костюк М.Д., Дубневич Я.В. – Бюл. № 3. – 17.03.2003.

15. Деклараційний патент на винахід: № 48923 А. Україна (UA). Кл. E01B9/30. Анкер для рейкового кріплення / Говоруха В.В., Костюк М.Д., Дубневич Я.В. – Бюл. № 8. – 15.08.2002.
16. Деклараційний патент на винахід: № 49749 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Пристрій для кріплення рейки / Говоруха В.В., Костюк М.Д., Тараненко С.Д. – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
17. ТУ У 32.30268559.072-2002. Скріплення пружне проміжне типу КППД-2 для рейок типу Р65 на дерев'яних шпалах. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2002. – Д., 2002. – 16 с.
18. ТУ У 88.311.007-97. Клемма пружная КП-1 промежуточного скрепления КПП-1. Опытная партия. Технические условия. Ввод. 1997. – Д., 1997. – 22 с.
19. ТУ У 30268559.021-2000. Клеми пружні для рейкових колій та стрілочних переводів залізничного транспорту. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2000. – Д., 2000. – 29 с.
20. ТУ У 30268559.002-99. Клеми пружні для рейкових колій та стрілочних переводів залізничного транспорту. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 1999. – Д., 1999. – 29 с.
21. ТУ У 35.2-30268559-039-2002. Клеми пружні типу КП-5 проміжного скріплення типу КПП-5. Технічні умови. Введ. 02.12.2002. – Д., 2002. – 42 с.
22. ТУ У 32.30268559.039-2001. Клема пружна КП-5 проміжного скріплення КПП-5. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2001. – Д., 2001. – 18 с.
23. Інструкція по укладанню та утриманню колії на залізобетонних шпалах з пружним скріпленням типу КПП-1, КПП-5. Введ. 2002. – Д., 2002. – 43 с.
24. УЗ.068.00.000 ІМ. Інструкція по складанню пружних колійних скріплень з пружними клемами типу КП-2 та КП-3. Введ. 2002. – Д., 2002. – 16 с.
25. ТУ У 32.30268559.065-2002. Клема пружна типу КППТ-7 проміжного скріплення типу КППТ-7. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2002. – Д., 2002. – 19 с.
26. ТУ У 32.30268559.055-2001. Скріплення пружне проміжне безпідкладочне КППТ-7 для рейок типу Р65 на залізобетонних шпалах. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2001. – Д., 2001. – 15 с.
27. ТУ У 32.30268559.059-2002. Клема пружна типу КППТ-6 проміжного скріплення типу КППТ-6. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2002. – Д., 2002. – 19 с.
28. ТУ У 32.30268559.057-2001. Скріплення пружне проміжне КППТ-9 для рейок типу Р65 на залізобетонних шпалах. На дослідну партію. Введ. 2001. – Д., 2001. – 17 с.
29. ТУ У 32.30268559.063-2002. Клема пружна типу КППТ-9 проміжного скріплення типу КППТ-9. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2002. – Д., 2002. – 18 с.
30. ТУ У 35.2-05411357-002-2004. Скріплення рейкове шумознижуюче для рейок типу Т62. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2004. – Д., 2004. – 19 с.
31. ТУ У 35.2-30268539-091-2002. Клема пружна КП-12 проміжного скріплення КПП-12. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2002. – Д., 2002. – 26 с.
32. ТУ У 32.30268559.072-2002. Скріплення пружне проміжне типу КППД-2 для рейок типу Р65 на дерев'яних шпалах. На дослідну партію. Технічні умови. Введ. 2002. – Д., 2002. – 16 с.
33. ТУ У 35.2-30268559-118-2004. Скріплення проміжні типу КПП-5. Технічні умови. Введ. 18.02.2002. – Д., 2004. – 27 с.
34. Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: сб. научн. тр. ВНИИЖТ / Под ред. М.Г. Крисанова. – М.: Интекст, 2000. – 142 с.
35. Бесстыковой путь / В.Г. Альдрехт, Н.П. Виногоров, Н.Б. Зверев и др.; Под ред. В.Г. Альбрехта, А.М. Когана. – М.: Транспорт, 2000. – 408 с.
36. Управление надежностью бесстыкового пути / В.С. Лысюк, В.Т. Семёнов, В.М. Ермаков, Н.Б. Зверев, Л.В. Башкатова: Под ред. В.С. Лысюка. М.: Транспорт, 1999. – 373 с.
37. Карпущенко Н.И. Совершенствование рельсовых скреплений / Карпущенко Н.И., Антонов Н.И. – Новосибирск: Изд-во СГУСа, 2003. – 300 с.
38. Совершенствование рельсовых скреплений: Тр. ВНИИЖТ / Под ред. Н.В. Петрова. – Вып. № 616. М.: Транспорт, 1979. – 128 с.
39. Технические требования к промежуточным рельсовым скреплениям ЦП 1-86 / ВНИИЖТ МПС. М.: 1987. – 9 с.
40. Железнодорожный путь / Т.Г. Яковлева, Н.И. Карпущенко, С.И. Клинов и др.; Под ред. Т.Г. Яковлевой. 2-е изд., с изм. и доп. М.: Транспорт, 2001. – 407 с.
41. Шахуняну Г.М. Железнодорожный путь. М.: Транспорт, 1987. – 479 с.

42. Ланчаков Э.Т. Напряженно-деформированное состояние пружинных клемм промежуточных безболтовых скреплений // Вопросы пути и его содержания: Сб. научн. тр. Моск. ин-та инженеров ж-д. трансп. – Вып. 491. М.: 1976. – С 134-143.
43. Алексеева Л.П. Исследование параметров пружинной клеммы APC // Вопросы повышения надежности и уровня использования железнодорожного пути: Сб. научн. тр. Моск. ин-та инженеров ж-д. трансп. – Вып. 759. М.: 1984. – С. 52-62.
44. Антонов Н.И. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния упругих клемм рельсового скрепления // Экспериментальные и расчетные методы строительной механики: Межвуз. сб. научн. тр. – Новосибирск, 1997. – С. 18-25.
45. Гучков А.К. Скрепление ЖБР-65 / Гучков А.К., Радчин Ю.Н. // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 2. – С. 14-15.
46. Афанасьев В.Ф. Упругие скрепления для деревянных и железобетонных шпал // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 3. – С. 23-26.
47. Ермаков В.М. Оценка качества и совершенствование элементов верхнего строения / Ермаков В.М., Федин В.М., Борц А.И. // Путь и путевое хозяйство. – 2000. – № 3. – С. 20-23.
48. Петренко С., Владимир Говоруха – путь поиска и свершений на рельсовом транспорте железных дорог, шахт, рудников и карьеров // Вісті Придніпров'я. – № 13/2 (502). 19.02.2004. – С. 20-21.
49. SCAD для пользователя / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.В. Перельмутер, М.А. Перельмутер, А.Н. Трофимчук. – К.: ВВП «Компас», 2000. – 332 с.
50. Марочник сталей и сплавов / В.Г. Сорокин, В.С. Волосникова, С.А. Вяткин и др.: Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. – 640 с.
51. Р 745. Рекомендации по уточнению технических требований на проектирование упругих рельсовых скреплений // Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). Разработано IX Комиссией на совещании с 11 по 16 мая 1987 г. в г. Печ. Дата вступления в силу – 10 сентября 1987 г.
52. Р 745/1. Упругие скрепления рельсов с клеммами типа: SKL 12 (с подкладками), SKL 14 (без подкладок) // Организация сотрудничества железных дорог (ОСЖД). Разработано совещанием экспертов V Комиссии ОСЖД Штреба, 7-9 апреля 1999 г. Дата вступления в силу: 08 октября 1999 г.
53. ТУ 21483238-001-95. Анкер закладной. Технические условия. – Киев, 1995. – 17 с.
54. ТУ У 35.2 - 30268559 – 128Д – 2003. Клема пружна типу КП-7 для нероздільного пружного скріплення. На дослідну партію. Введ. 2003. – Д., 2003. – 19 с.