

ИССЛЕДОВАНИЕ НАГРУЖЕННОСТИ, ПРОЧНОСТИ И ДЕФОРМАЦИИ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

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.

Рассмотрена проблема создания упругого рельсового скрепления для скоростного движения поездов. Изложены методы исследования нагруженности и напряженно-деформированного состояния упругих клемм. Представлены результаты исследований влияния параметров и формы упругих клемм на их работоспособность.

The problem of creation of resilient rail fastening is considered for high-speed train services. The article describes the research methods of loading and resiliently-deformed state of resilient terminals and presents the results of investigation of the influence of parameters and form of the resilient terminals on their capacity.

Для повышения надежности и работоспособности рельсового пути, снижения динамического взаимодействия пути и подвижного состава, а также для уменьшения капитальных затрат и эксплуатационных расходов в международной и отечественной практике получили широкое применение упругие элементы промежуточных скреплений, в особенности упругие клеммы простого и сложного очертания или формы.

Вопросам создания и внедрения конструкций упругих промежуточных скреплений и упругих клемм этих скреплений уделено большое внимание. В ряде работ [1–48; 54] опубликованы результаты исследований и разработаны технические условия, которые направлены на создание элементов упругих промежуточных скреплений и упругих клемм.

В настоящей работе представлены результаты исследования напряженно-деформированного состояния упругих клемм различных конструкций упругих промежуточных скреплений рельсового пути и стрелочных переводов, создаваемых ИГТМ НАН Украины и НКТЬ ЦП УЗ в период 1994–2004 гг. [1–33].

Для оценки напряженно-деформированного состояния упругих клемм различного очертания и формы в данной работе использовался метод конечных элементов (МКЭ) [49; 55].

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

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

Для оценки прочности элементов конструкции, работающих в условиях сложного напряженного состояния, характеризующегося главными напряжениями $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$, 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

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

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 упругопластичных материалов и хорошо подтверждается экспериментально. Согласно этой теории σ_e находится из соотношения

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

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.

Допустимые напряжения для исследуемых клемм приняты с пределом текучести

$$[\sigma_{т,02}] = 1570 \text{ МПа}$$

и пределом прочности

$$[\sigma_{\epsilon}] = 1710 \text{ МПа,}$$

твердостью по Бринеллю (НВ) не более – 47...50, в соответствии с материалом высокопрочной и пружинной стали марки 60С2А [50].

В основу исследований положено требование, что усилие прижатия подошвы рельса одной клеммой должно быть равно нормативной нагрузке – 12,5 кН [51; 52; 55].

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 на рис. 1–7.

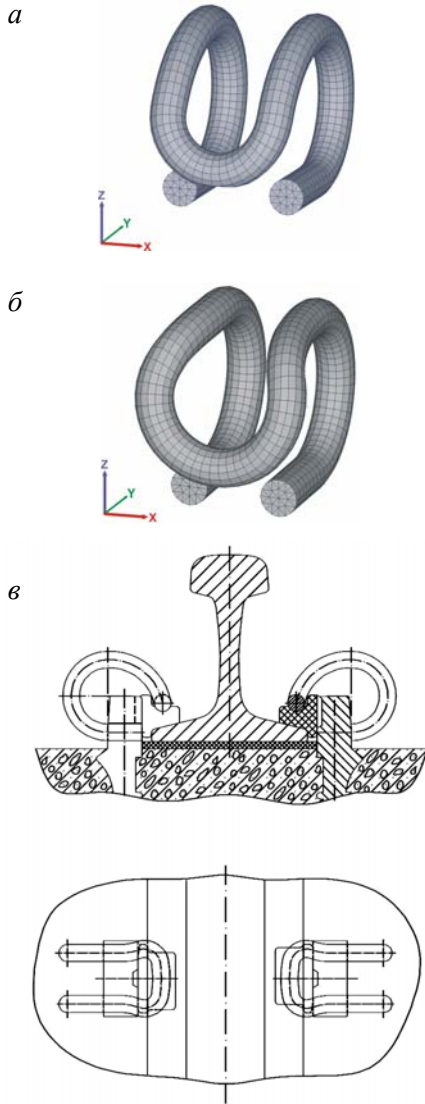


Рис. 1. Крепления типов КПП-1 и КПП-5:
а – клемма типа КПП-1; б – клемма типа КПП-5;
в – крепления типов КПП-1 и КПП-5

К первой группе относятся безболтовые клеммно-анкерные крепления с упругими клеммами типов КП-1; КП-5 (рис. 1, а, б) и КПП-7 (рис. 2, а) [1–5], фиксация которых осуществляется в головке независимого анкера. При этом, в креплениях типов КПП-1, КПП-5 (рис. 1, в), и КППТ-7 (рис. 2, б) [21–23; 25; 26] анкеры омоноличены в железобетонных шпалах [15], а в креплении типа КППДТ-7 (рис. 2, в) головки анкеров приварены к подкладке.

Крепление подкладки в этом креплении осуществляется к деревянной шпале с помощью шурупов.

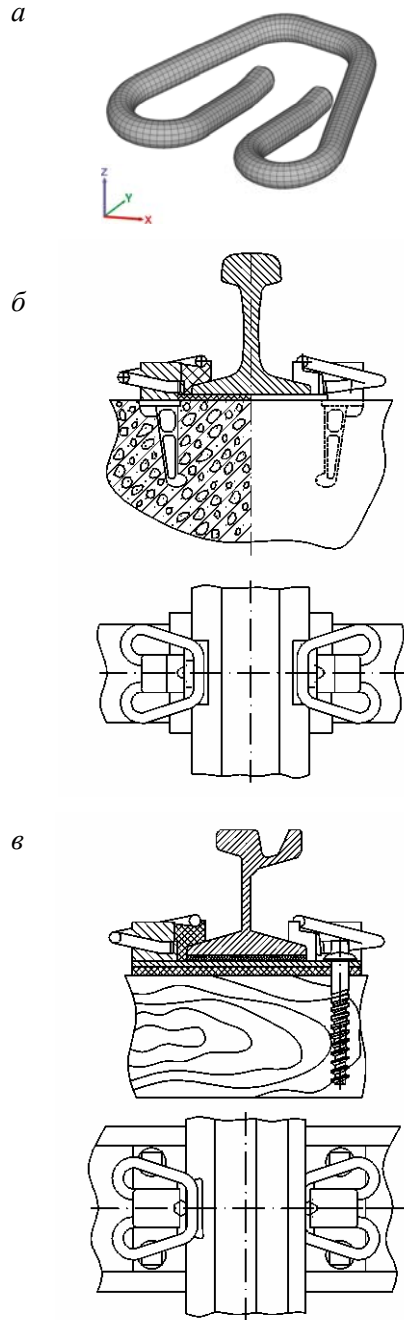


Рис. 2. Крепления типа КППТ-7 и КППДТ-7:
а – клемма типа КППТ-7; б – крепление типа КППТ-7;
в – крепление типа КППДТ-7

К этой группе следует также отнести безболтовое клеммно-подкладочное скрепление в стрелочной и контррельсовых частях стрелочных переводов, где используются относительно плоские клеммы типа КП-3 (рис. 3, а) [19–20; 24]. Крепление этих клемм осуществляется непосредственно с помощью специальных упорных проемов в зоне стрелочных подкладок подушек или контррельсовых подкладок и стоек контррельсов (рис. 3, б, в).

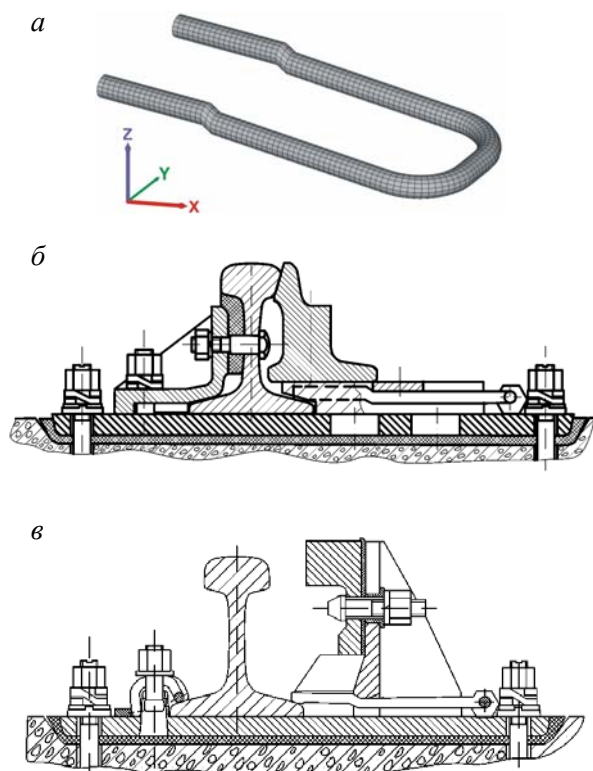


Рис. 3. Скрепления типа КПП-3:
а – клемма типа КП-3; б – скрепление в стрелочной части;
в – скрепление в контррельсовой части

Ко второй группе относятся клеммно-болтовые промежуточные скрепления с упругими клеммами типа КП-2 (рис. 4, а) [19; 20], крепление которых осуществляется с помощью клеммных болтов, фиксируемых в ребрах подкладок. Крепление подкладок к железобетонным шпалам или брусьям осуществляется с помощью закладных болтов, к примеру, в скреплении типа КПП-2 (рис. 4, б) или к деревянным шпалам, а также брусьям, где крепление подкладок осуществляется с помощью шурупов, к примеру, в скреплении типа КППД-2 (рис. 4, в) [32].

Упругие клеммы типа КП-2 могут иметь различную форму или диаметр прутка, например, в исследуемых клеммах типа КП-2-1 и КП-2-2.

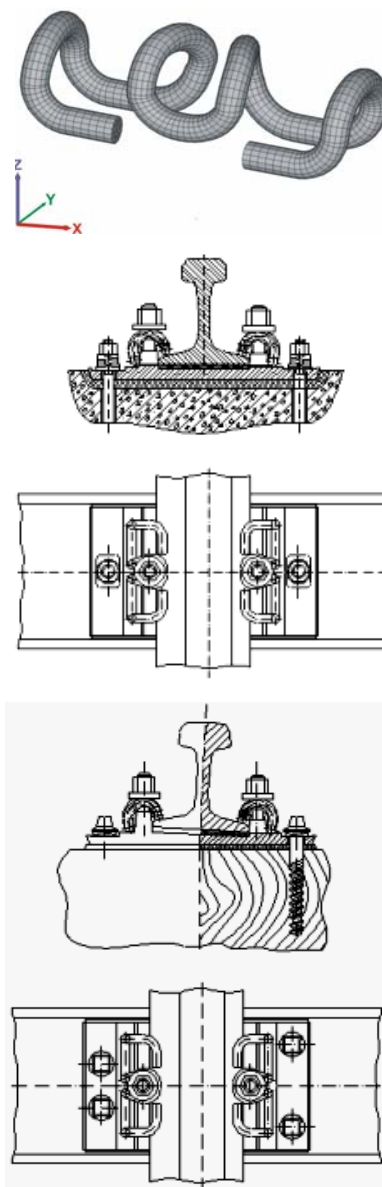


Рис. 4. Скрепление типа КПП-2:
а – скрепление типа КПП-2; б – скрепление
типа КППД-2; в – клемма типа КП-2

Третья группа включает объединенные клеммно-шурупные (или клеммно-болтовые) промежуточные упругие скрепления с парными прикрепителями на каждую клемму, где одна часть клеммы крепится к шпале с помощью шурупа или закладного болта, а две следующие части упираются независимо: одна – в подошву рельса, другая – в шпалу посредством изоляционной прокладки. В этих скреплениях регулируется сила прижатия клеммы с помощью перемещения шурупного или болтового прикрепителя. К этой группе относятся упругие скрепления, условно названные в первом упоминании о их создании автором [5], типов КПП-13 (рис. 5, б); КПП-14 (рис. 6, б) и КПП-15 (рис. 7, б). В этих промежуточных скреплениях упругие клеммы типов КП-13 (рис. 5, а), КП-14 (рис. 6, а) и КП-15 (рис. 7, а) имеют разную форму изгиба прутка

каждой из трех частей клемм. Одна часть располагается под прикрепителем, вторая часть опирается на шпалу посредством изоляционной прокладки и третья часть опирается на подошву рельса. Между этими частями прутков имеет форму переходящей кривизны.

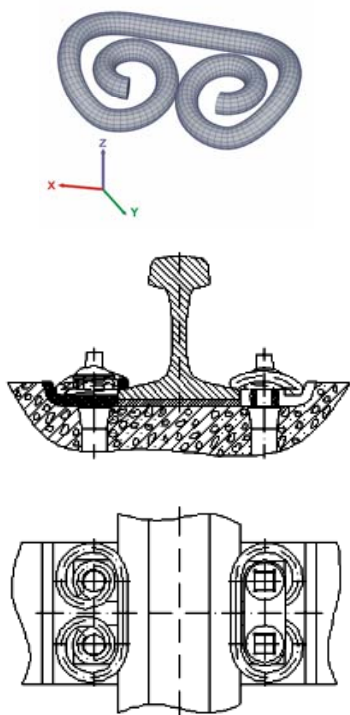


Рис. 5. Крепление типа КПП-13:
а – клемма типа КПП-13; б – крепление типа КПП-13

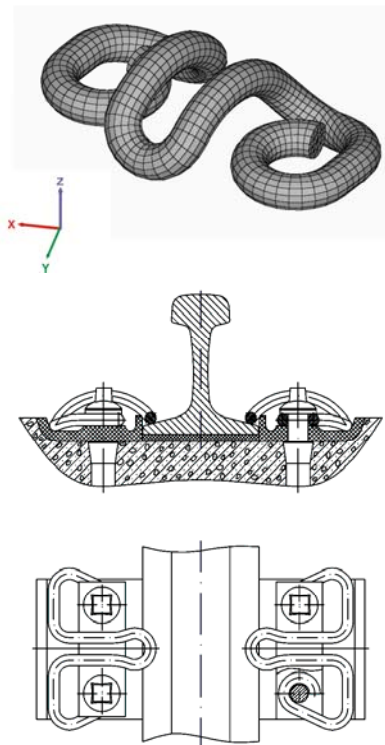


Рис. 6. Крепление типа КПП-14:
а – клемма типа КПП-14; б – крепление типа КПП-14

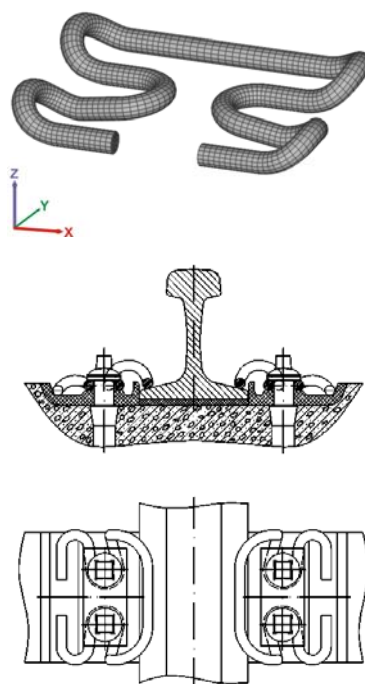


Рис. 7. Крепление типа КПП-15:
а – клемма типа КПП-15; б – крепление типа КПП-15

Для определения рациональных параметров упругих клемм и креплений проведено исследование нагруженности и напряженно-деформированного состояния клемм новых конструкций типов КПП-1; КПП-5; КПП-7; КПП-3; КПП-2; КПП-13; КПП-14, КПП-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. Результаты этих исследований представлены в табл.

Упругие клеммы типа КПП-1 и КПП-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 величиной 12,5 кН, а на опорах формировалась соответствующая реактивная нагрузка. Во-вторых, для «монтажного» режима, когда к свободному от фиксации концу клеммы прикладывалась «монтажная» горизонтальная (поперечная) нагрузка, обеспечивающая технологическое поперечное перемещение свободного конца клеммы на величину 16,5 мм. При этом вертикальные перемещения (z) точки контакта клеммы с рельсом соответственно для клемм типов КПП-1 и КПП-5 равнялись 6,41 и 6,15 мм, а перемещения (y), направленные от рельса по оси (Y) соответственно $-2,5$ и $-2,36$ мм.

Характеристика напряженно-деформированного состояния и нагруженности упругих клемм

| № п/п | Тип клеммы, мм | Максимальные эквивалентные напряжения, МПа σ^IV | 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 | КП-1, Ø 16 «рабочий режим» КП-1, Ø 16 «монтажный режим» | 1 580 | 0 | -2,5 | 6,41 | 1,95 | - | - | - | - |
| | | 1 450 | - | - | - | - | 7,35 (поперечная монтажная нагрузка) | 8,2×2 (поперечные перемещения от монтажной нагрузки) | 0,45 (поперечная жесткость клеммы) | - |
| 2 | КП-5, Ø 16 «рабочий режим» КП-5, Ø 16 «монтажный режим» | 1 557 | 0 | -2,36 | 6,15 | 2,03 | - | - | - | - |
| | | 1 340 | - | - | - | - | 6,63 (поперечная монтажная нагрузка) | 8,25×2 (поперечные перемещения от монтажной нагрузки) | 0,40 (поперечная жесткость клеммы) | - |
| 3 | КП-7, Ø 16 | 2 239 | 0 | -3,2 | 14,4 | 0,868 | - | - | - | - |
| 4 | КП-2, Ø 14 | 2 268 | -0,32 | -0,42 | 11,7 | 1,07 | 28,1 | -10,40 | 2,70 | 15,60 |
| 5 | КП-2-1, Ø 13 | 2 209 | -0,52 | -0,29 | 14,3 | 0,87 | 26,1 | -13,20 | 1,98 | 13,60 |
| 6 | КП-2-2, Ø 14 | 1 989 | -0,43 | -0,48 | 11,0 | 1,14 | 27,3 | -9,95 | 2,74 | 14,80 |
| 7 | КП-3, Ø 16 | 1 491 | -0,08 | -0,21 | 5,78 | 2,16 | 19,3 | -3,90 | 4,95 | 6,80 |
| 8 | КП-13, Ø 16 | 1 544 | 0 | 0,46 | 8,3 | 1,51 | 11,91 | -5,82 | 2,05 | 11,32 |
| 9 | КП-13-1, Ø 16 | 2 683 | 0 | 1,71 | 26,1 | 0,48 | 13,5 | -14,00 | 0,96 | 14,50 |
| 10 | КП-13-2, Ø 16 | 2 366 | 0 | 0,26 | 19,5 | 0,64 | 10,6 | -11,70 | 0,91 | 8,70 |
| 11 | КП-13-3, Ø 16 | 2 195 | 0 | 0,97 | 18,0 | 0,69 | 10,9 | -10,00 | 1,09 | 9,30 |
| 12 | КП-14-1, Ø 14 | 3 674 | 0 | 1,62 | 43,9 | 0,28 | 11,6 | -23,10 | 0,50 | 10,70 |
| 13 | КП-14-2, Ø 16 | 1 499 | 0 | 0,16 | 6,75 | 1,85 | 11,9 | -4,11 | 2,90 | 11,30 |
| 14 | КП-15, Ø 14 | 2 098 | 0 | 0,44 | 11,91 | 1,05 | 10,41 | -9,38 | 1,11 | 8,32 |
| 15 | КП-15-1, Ø 14 | 1 754 | 0 | 0,69 | 7,23 | 1,73 | 10,05 | -6,70 | 1,50 | 7,60 |
| 16 | КП-15-2, Ø 16 | 1 249 | 0 | -0,16 | 4,82 | 2,59 | 10,05 | -4,21 | 2,39 | 7,60 |

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 1 580 МПа, а в клемме типа КП-5 величину 1 557 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.

Технологическая «монтажная» поперечная нагрузка при установке клемм в рабочее положение с раздвижкой концевых участков на 16,5 мм составила для клемм типа КП-1 7,35 кН, а для клемм типа КП-5 6,63 кН.

Поперечная жесткость между концевыми участками клемм при деформации 16,5 мм, в «монтажном режиме» в клеммах типа КП-5 (0,40 кН/мм) ниже по сравнению с аналогичными данными для клемм типа КП-1 (0,45 кН/мм).

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 звеноборочных базах и в эксплуатационных условиях на рельсовом пути.

Упругие клеммы типа КПТ-7. Для определения нагруженности и напряженно-деформированного состояния этой упругой клеммы нагружение осуществлялось нормативной нагрузкой 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 $[\sigma_{т.02}] = 1570$ МПа и по пределу прочности $[\sigma_{в}] = 1710$ 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 напряже-

ние $\sigma^{IV} = 1710$ МПа, что соответствует пределу прочности $[\sigma_{в}] = 1710$ 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 19,3 кН, которая формирует прижатие концов клеммы к подошве рельса нормативной силой 12,5 кН. При этом величина условной вертикальной деформации клеммы в точке контакта 3,9 мм. Жесткость клеммы в этой точке 4,95 кН/мм. Максимальные эквивалентные напряжения $\sigma^{IV} = 1491$ МПа и не превышают допустимых $[\sigma_{т.02}] = 1570$ МПа.

При воздействии нормативной нагрузки 12,5 кН в месте контакта клеммы и подошвы величина вертикальных перемещений концевых участков клеммы $z = 5,78$ мм. Жесткость клеммы в точке контакта с подошвой рельса 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 диаметром 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 13 мм и углом $\alpha = 0^\circ$ – КП-2-1, а с диаметром прутка 14 мм и углом $\alpha = 0^\circ$ – 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 2 268 и 2 204 МПа, при допустимых напряжениях по пределу текучести $[\sigma_{т.02}] = 1570$ МПа и по пределу прочности $[\sigma_{в}] = 1710$ МПа. Для варианта клеммы типа КП-2-2, с учетом диаметра прутка 14 мм и угла наклона задней стенки клеммы равному нулю ($\alpha = 0^\circ$), максимальное эквивалентное напряжение по IV теории прочности составило 1 989 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 нагружения, равны соответственно $z = -10,7$, $z = -13,2$ и $z = -9,95$ мм, а сила затяжки клемм клеммными болтами равна соответственно 28,1, 26,1 и 27,3 кН. Жесткость клемм в точке затяжки клеммных болтов равна 2,7, 1,98 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 $z = 11,7$; $z = 14,8$ и $z = 11,0$ мм. Жесткость клемм в точке контакта концевых участков клемм и подошвы рельса равны 1,07, 0,87 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 из-за недожатия клемм до нормативной величины силы прижатия к подошве рельса $R_{A,Z} = 12,5$ кН. Для обеспечения работы клеммы с соблюдением фактических эквивалентных напряжений, непревышающих предел текучести $[\sigma_{т.02}] = 1570$ МПа, изменятся все показатели работы клеммы. В этом случае величина прижатия клеммой подошвы рельса уменьшится до 9,86 вместо 12,5 кН, а перемещение клеммы под головкой болта уменьшится до 7,85, вместо 11,0 мм и сила затяжки болта уменьшится до 21,5, 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 описаны 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 диаметром 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, 13,5, 19,5 и 7,92 кН. При этом величины вертикальных упругих перемещений в местах действия крепежителей для указанных типов клемм равны 5,82, 14,0, 11,3 и 10,0 мм, а величины жесткости клемм в местах действия крепежителей, также равны 2,05, 0,96, 1,72, 0,79 кН/мм. Величины наибольших эквивалентных напряжений (σ^{IV}) в опасном сечении клеммы для исследуемых вариантов соответственно указанной выше последовательности, равны 1 544, 2 683, 2 360 и 2 195 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, 26,1, 19,5 и 18,0 мм, а жесткости клемм в точке их контакта с подошвой рельса равны 1,51, 0,48, 0,64 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 1 544 МПа при допустимых напряжениях по пределу текучести $[\sigma_{т.02}] = 1570$ МПа. В остальных трех типах клемм наибольшие напряжения в опасных точках превышают допустимые.

Нагруженность на прикрепители в скреплениях 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 прикрепители 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 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 и 11,9 кН. При этом величины вертикальных упругих перемещений в местах действия прикрепителей равны -23,10 и -4,11 мм, а величины жесткости клемм в местах действия прикрепителей также, равны 0,5 и 2,9 кН/мм.

Величины эквивалентных напряжений (σ^{IV}) в опасном сечении клеммы для исследуемых вариантов клемм равны, соответственно, 3 674 и 1 499 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 и 6,75 мм, а жесткости клемм в этих местах равны 0,28 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 1 499 МПа и не превышают допустимых напряжений по пределу текучести [$\sigma_{т.02}$]=1570 МПа. В клемме типа КП-14-1 максимальные напряжения значительно превышают допустимые (3 674 \geq 1 570 МПа).

Нагруженность на прикрепители в скреплениях типа КП-14-1 и КП-14-2 составляют, соответственно, 11,6 и 11,9 кН и разница между нагрузками незначительна в связи с незначительной разницей в соотношениях между расстоянием 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 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, 10,05, и 10,05 кН. При этом величины вертикальных упругих перемещений в местах действия прикрепителей равны -9,38; -6,7 и -4,21 мм, а величины жесткости клемм в местах действия прикрепителей также равны 1,11, 1,5 и 2,39 кН/мм.

Величины эквивалентных напряжений (σ^{IV}) в опасном сечении каждой из исследуемых клемм равны 2 098, 1 754 и 1 249 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, 7,23 и 4,82 мм, а жесткость клемм в этих местах равны 1,05, 1,73 и 2,59 кН/мм.

Установлено, что при одинаковых величинах расстояний между прикрепителем и точка-

ми 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 (1 754 и 1 249 МПа) по сравнению с клеммами типа КП-15 (2 098 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 (1 249 МПа) по сравнению с клеммами типа КП-15-1 (1754 МПа) связано с увеличением диаметра прутка до 16 вместо 14 мм, поскольку все остальные геометрические параметры этих клемм одинаковы.

Нагруженность на прикрепители в исследуемых типах клемм, в основном, одинакова (10,41, 10,05, 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 и 2,59 кН/мм), а также в месте контакта с прикрепителем (-4,21, 2,39 кН/мм), несмотря на то, что максимальные напряжения меньше допустимых ($1\,249 < 1\,570$ МПа). Клемма типа КП-15 имеет хорошие показатели перемещений и жесткости в месте контакта с подошвой рельса (11,91, 1,05 кН/мм) и в месте контакта с прикрепителем (-9,38, 1,11 кН/мм), однако максимальные напряжения превышают допустимые ($2\,098 > 1\,570$ 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. $1\,754 > 1\,570$ МПа.

Выводы

С помощью метода конечных элементов проведены 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.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Говоруха В. В. Создание и внедрение упругих элементов промежуточного скрепления рельсового пути // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вып. 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. – Вып. 31. – Д.: Полиграфист, 2002. – С. 49–77.
3. Говоруха В. В. Упругие элементы промежуточных рельсовых скреплений // Геотехническая механика. – Вып. 31. – Д.: Полиграфист, 2002. – С. 78–94.
4. Говоруха В. В. Создание стрелочной железобетонной и смежной продукции для скоростного движения поездов // Геотехническая механика. – Вып. 31. – Д.: Полиграфист, 2002. – С. 201–207.
5. Говоруха В. В. Экспериментальные исследования показателей прочности упругих промежуточных скреплений рельсового пути // Геотехническая механика. – Вып. 43. – Д.: Полиграфист, 2003. – С. 187–195.
6. Булат А. Ф. Закономерность разрушения эластомеров при длительном циклическом нагружении / А. Ф. Булат, В. В. Говоруха, В. И. Дырда // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. ИГТМ НАН Украины им. Н. С. Полякова – Вып. 52. – Д., 2004. – С 3–95.
7. Костюк М. Д. Стрілочні переводи і суміжне устаткування для швидкісного руху поїздів / М. Д. Костюк, В. В. Говоруха // 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 / М. Д. Костюк, В. В. Говоруха // Строительство: Сб. научн. тр. ДИИТ. – Вып. 10. – Д., 2002. – С. 72–75.
9. Кірта 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 / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, С. Д. Тараненко – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
11. Деклараційний патент на винахід: № 49745 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Клема рейкового скріплення / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, Я. В. Дубневич. – Бюл. № 9. – 16.09.2002.

12. Деклараційний патент на винахід: № 49747 А. Україна (UA). Кл. E01B5/18. Контррейковий вузол / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, С. Д. Тараненко – Бюл. № 9. – 16.09.2002.
13. Деклараційний патент на винахід: № 49768 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Рейкове скріплення / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк. – 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 / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, Я. В. Дубневич. – Бюл. № 8. – 15.08.2002.
16. Деклараційний патент на винахід: № 49749 А. Україна (UA). Кл. E01B9/48. Пристрій для кріплення рейки / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, С. Д. Тараненко. – 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 КПП-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 КПП-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 КПП-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. Альдрехт В. Г. 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. Лысюк В. С. 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 / Н. И. Карпущенко, Н. И. Антонов. – Новосибирск: Изд-во СГУСа, 2003. – 300 с.
38. Совершенствование рельсовых скреплений: Тр. ВНИИЖТ / Под ред. Н. В. Петрова. – М.: Транспорт, – 1979. – Вып. 616. – 128 с.
39. Технические требования к промежуточным рельсовым скреплениям ЦП 1-86 / ВНИИЖТ МПС. М.: 1987. – 9 с.
40. Яковлева Т. Г. 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. – М. – 1976. – Вып. 491. – С. 134–143.
43. Алексеева Л. П. Исследование параметров пружинной клеммы АРС // 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 / А. К. Гучков, Ю. Н. Радчин // 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 / В. М. Ермаков, В. М. Федин, А. И. Борц // 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. Сорокин В. Г. 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.
55. Говоруха В. В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений: Монография. – Д.: Изд-во «Лира ЛТД», 2005. – 388 с.

Поступила в редколлегию 23.11.2005.