

- и другие высоко дебитные перекачки различных флюидов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Безпфлюг В.А., СП «Эко-Альянс» Опыт дегазации и утилизации шахтного метана в ФРГ и СНГ/ Геотехнічна механіка: Міжвід. зб. наук. праць / Ін-т Геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 67 с. 353-359.
2. Бокий Б. В., Чередников В.В., Софийский К.К., Силин Д.П. Раскольматация поверхностных дегазационных скважин пневмогидравлическим воздействием. / Ін-т Геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2006. – Вип. 67 с. 236-244.
3. Павлов С.Д. Пути освоения природных газов угольных месторождений: Монография. – Х.: Колорит, 2005. – 336 с.
4. Пилипец В.И. Насосы для подъема жидкости: Учебное пособие. – Донецк, 2000.-244 с.
5. Кушеков А.У., Еремков М.М., Ажикенов Н.С. Скважинные насосные установки. Кн.1. Штанговые скважинные насосные установки с механическим приводом.– Алматы.: Эверо, 2001. - 217 с.
6. Суреньяц Я.С. Водяные скважины. М., Минкоммунхоз РСФСР, 1961, -318с.
7. Усаковский В.М. Инерционные насосы. М., Машиностроение, 1973, -200с.
8. Пат. Україна UA E21B 43/00, F 04B 47/02 (2007.01) Безбалансирний ланцюговий привід для заглибних поршневих насосів / Кожевников А.О., Тітов В.І., Фатов О.П., Лексиков О.А., Камишацький О.Ф. – Опубл. 25.04.2007. – Бюл. № 5
9. Пат. 78789 Україна UA E21B 43/00, F 04B 47/02 (2007.01) Безбалансирна качалка для занурювального поршневого насоса / Кожевников А.О., Тітов В.І., Фатов О.П., Лексиков О.А., Цаберябий А.С., Камишацький О.Ф. – Опубл. 25.04.2007. – Бюл. № 5
10. Пат. 85832 Україна UA E21B 43/00, F 04B 47/02 (2006.01) Свердловинна поршнева насосна установка / Кожевников А.О., Тітов В.І., Цаберябий А.С., Лексиков О.А., Камишацький О.Ф. – Опубл. 10.03.2009. – Бюл. № 5

УДК 625.14; 625.143:539.3

Канд. техн. наук В.В. Говоруха
(ИГТМ НАН Украины)

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЦИОНАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛАСТОМЕРНЫХ ПОДРЕЛЬСОВЫХ ПРОКЛАДОК ДЛЯ ПРОМЕЖУТОЧНЫХ РЕЛЬСОВЫХ СКРЕПЛЕНИЙ

В роботі наведено метод визначення раціональних параметрів еластомерних підрейкових прокладок проміжного рейкового скріплення з використанням методу скінчених елементів.

METHOD OF DETERMINATION OF RATIONAL PARAMETERS OF ELASTOMERNYKH SUBRAIL GASKETS FOR INTERMEDIATE

In work the method of definition of rational parameters of elastomer subrail gaskets of the intermediate rail fastening is resulted with the use of method of finished elements.

Вопросам совершенствования и развития путевого хозяйства подземного, карьерного и железнодорожного рельсового транспорта уделяется должное внимание, поскольку от безопасности и качественной работы этого ответственного участка зависит безопасность движения поездов с установленными скоростями и обеспечение перевозок на рельсовом транспорте.

Результаты длительной эксплуатации и проведенных исследований показывают, что конструкция и параметры рельсовых промежуточных скреплений существенно влияют на надежность работы рельсового пути и на затраты по его содержанию [1-8].

При жестком основании почвы горных выработок, а также при использовании железобетонных шпал и брусьев стрелочных переводов, эластомерные амортизирующие подрельсовые и нашпальные прокладки становятся определяющим фактором в формировании вертикальной и поперечной горизонтальной упругости рельсового пути, влияющих на динамические показатели нагруженности.

Определение деформированного состояния эластомерных прокладок

На рис. 1 показана основная схема расположения эластомерных прокладок в системе взаимодействия подвижного состава и рельсового пути. При воздействии ходовой части подвижного состава происходит упругое деформирование элементов рельсового пути. Наибольшая величина деформации формируется упругими подрельсовыми и нашпальными эластомерными прокладками. На рис. 2 представлен характер изменений перемещений элементов рельсового пути в вертикальной плоскости от действия вертикальных нагрузок. Эта зависимость, в основном, имеет четыре характерных участка. При начальном увеличении нагрузки, в первой части, имеется линейная зависимость $z = f(p)$, во второй - нелинейная, в третьей - линейная, в четвертой - нелинейная с тенденцией нарастания интенсивности изменения перемещений от нагрузки.

Характеристики рельсового пути зависят также от конструкции пути и свойств основания. Путь из рельсов типа Р33 в шахтных условиях имеет жесткость от 4 до 320 МН/м. Рельсовый путь нормальной ширины колеи в условиях промышленного и железнодорожного транспорта имеет жесткость от 70 до 600 МН/м в зависимости от условий эксплуатации и конструкции пути.



Рис. 1 – Основная схема расположения эластомерных прокладок в системе взаимодействия подвижного состава и рельсового пути

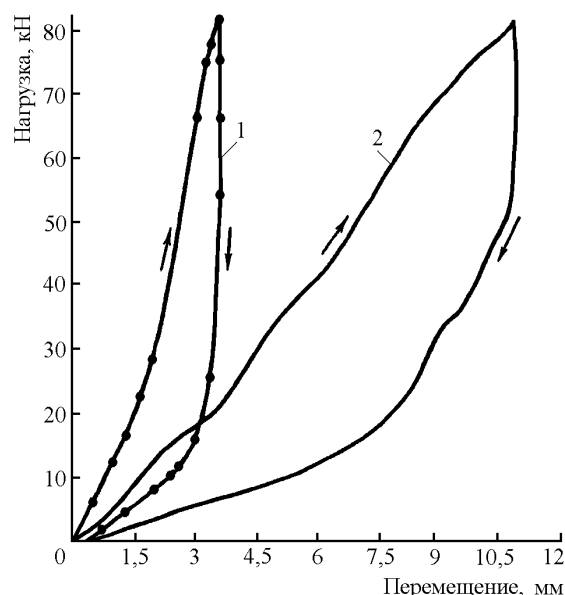


Рис. 2 – Зависимости вертикальных перемещений рельсов от нагрузки

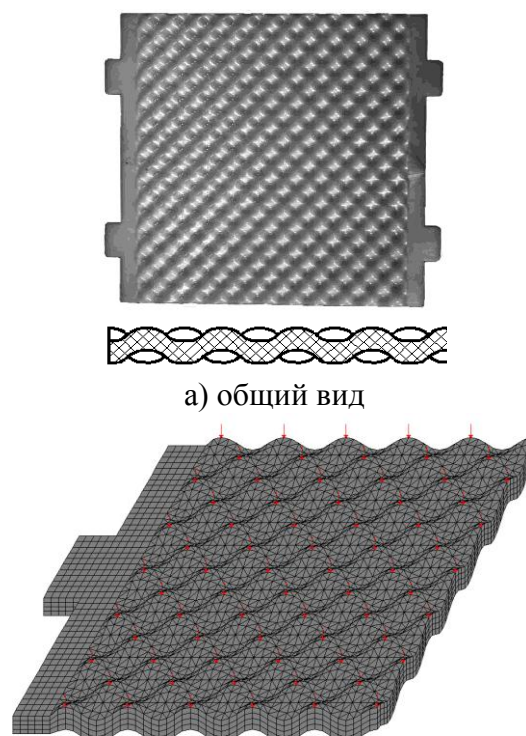
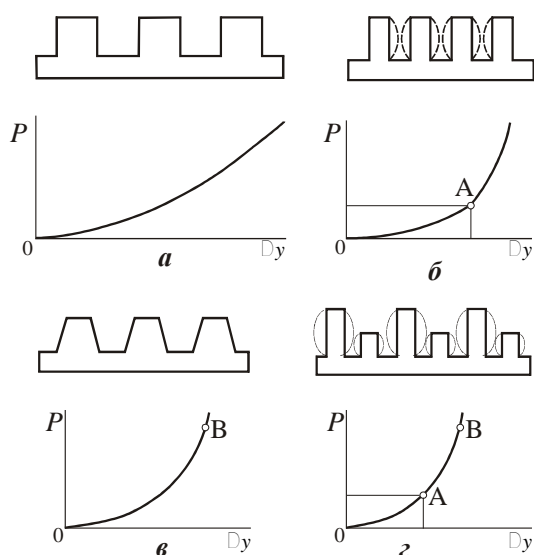
Исследования показывают, что жесткость для различных марок резин, полиуретана и полиамида не одинаковы. На упругие характеристики прокладок

влияет также и форма рифлей поверхности прокладок (рис. 3). Детально результаты анализа показателей упругости подрельсовых и нащпальных прокладок представлено в работах автора [5-9].

Метод определения напряженно-деформированного состояния эластомерных прокладок

При создании эластомерных нащпальных и подрельсовых прокладок подземного, карьерного и железнодорожного транспорта очень важным фактором является метод определения рациональных параметров прокладок с учетом влияния формы их поверхности и свойств упругости материала.

На рис. 4,а и 4,б показаны общий вид и конечно-элементная модель подрельсовой полиуретановой прокладки ПРП 2.1 [10].



а) общий вид
б) конечно-элементная модель
Рис. 4. Подрельсовая прокладка ПРП 2.1

а – с прямоугольными рифлями ($P \sim \Delta y$ – силовая характеристика), б – с близкорасположенными рифлями, поверхности которых при деформации соприкасаются ($P \sim \Delta y$ – силовая характеристика, точка А – начало соприкосновения рифлей); в – с трапециевидными рифлями; г – с рифлями различной высоты ($P \sim y$ – силовая характеристика, точка А – начало соприкосновения с рифлями меньшей высоты)

Рис. 3 – Конструкции рабочих поверхностей резиновых прокладок

На рис. 4,б приведена конечно-элементная расчетная схема прокладки ПРП 2.1, составленная из объёмных элементов, где верхняя и нижняя рабочие поверхности её представляют собой синусоидальные в двух направлениях волнистые поверхности. Длина волны синусоиды поверхности в обоих направлениях равна 14,2 мм, а её размах – 3 мм. Рабочая площадь прокладки составляет 166×154мм. Для изготовления прокладок ПРП2.1 используется термопластичный полиуретан марок Витур Т-1413-85 по ТУ 6-05-221-526-85, Витур Т-0333-95 по ТУ 6-05-221-526-82 или полиуретан марок 102-104 по ТУ16337. Жесткостные характеристики для этих материалов приняты следующие: модуль упругости $E = 55,0$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,45$.

В работе представлен метод исследования характерных показателей эластомерных прокладок от действия вертикальной эксплуатационной нагрузки, вызванной действием подвижного состава $P_{ст} \approx 100 (1+k_{вд})$ (кН) и давлением двух клемм крепления рельсов к шпалам $2P_k = 25,0$ кН с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и программного комплекса SCAD.

Данная задача имеет физическую нелинейность, так как в качестве материала прокладки использовался упругий материал полиуретан. Кроме того, ввиду волнистой верхней и нижней поверхностей прокладки ПРП 2.1, необходимо решать и геометрическую нелинейность, поскольку при изменении величины вертикальной нагрузки, сжимающей прокладку, изменяется площадь поверхности контакта прокладки с подошвой рельса и верхней поверхностью шпалы. В связи с изменением указанных параметров и характеристик предусматривается в процессе решения задачи менять граничные условия исследуемого объекта.

В качестве приоритетов при решении данной задачи были выбраны, в первую очередь, граничные условия, а затем диаграмма сжатия прокладки ПРП 2.1 (см. рис. 5), полученная экспериментальным путем. Для решения задачи соблюдения граничных условий использовалась концепция метода сил. Ввиду симметрии конструкции прокладки в расчетах рассматривалась ее четвертая часть в осях симметрии.

Нагружение прокладки производилось поэтапно ввиду дискретности конечно-элементной модели и нелинейности жесткостной характеристики прокладки. На каждом этапе нагружения в первую очередь решалась задача удовлетворения граничных условий.

Из-за плоско-волнистой поверхности прокладки ПРП 2.1 и дискретности её модели первоначально в контакт с подошвой рельса и верхней поверхностью шпалы вступают одиночные узлы (пики синусоид) верхней и нижней поверхностей прокладки.

Для создания относительной базы отсчетов на нижней поверхности прокладки нижним точкам этих узлов условно запрещались вертикальные перемещения, а соответствующие узлы, находящиеся на верхней поверхности прокладки нагружались группой вертикальных сосредоточенных сил F и G . Прокладка нагружалась до тех пор, пока ближайшие узлы к уже нагруженным

и закрепленным узлам не контактировали с подошвой рельса сверху прокладки и с поверхностью шпалы снизу её.

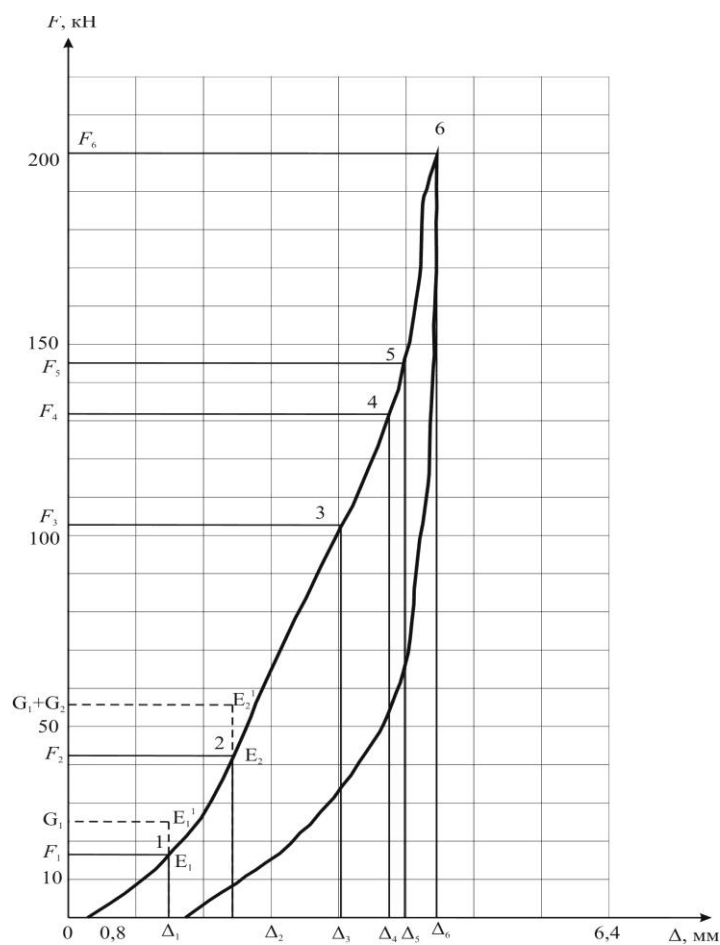


Рис.5 – Диаграмма сжатия прокладки ПРП 2.1

Следует отметить, что величины модуля упругости материала (E) и суммарной сжимающей силы (F) уточнялись путем сравнения с диаграммой сжатия прокладки ПРП 2.1 (Рис. 5).

Величины абсолютных вертикальных деформаций (мм) на первом этапе нагружения фрагмента (отдельного узла) прокладки зажатой между подошвой рельса и шпалой приведены на рис. 6. На рисунке приняты следующие обозначения:

Δ_{11} и Δ_{11}^* – вертикальные перемещения узлов прокладки, первыми вступающими в контакт соответственно со шпалой и подошвой рельса на первом этапе нагружения ($\Delta_{11} = -0.439$ мм, $\Delta_{11}^* = -0.582$ мм);

Z_1 – вертикальное перемещение узлов прокладки на контакте с подошвой рельса, по которым определяется абсолютное сжатие прокладки ($Z_1 = -1.021$ мм), вызванное вертикальными силами создаваемыми на первом этапе нагружения ($F_1=15.73$ кН).

Z_0 – вертикальное перемещение узлов на нижней поверхности прокладки, которым перемещения условно запрещены.

Разность координат узлов по оси Z (см. рис.6), обозначенных Δ_{11} и Z_0 на

нижней поверхности прокладки (-0,439 мм -0,0 мм=-0,439 мм) и соответственно Δ_{11}^* и Z_1 (-1,021 мм-(-582 мм)=-0,439 мм) на верхней поверхности, равны 0.439 мм. Следовательно, перемещения узлов Δ_{11}^* на верхней поверхности прокладки и перемещения узлов Δ_{11} на её нижней поверхности на первом этапе нагружения одновременно вступили в контакт соответственно с подошвой рельса и металлической подкладкой или шпалой (см. рис. 1).

С целью удовлетворения граничным условиям задачи и экспериментальным данным (см. диаграмму сжатия прокладки ПРП2.1 на рис. 5), модуль упругости полиуретана на первом этапе нагружения принимался равным $E_I = 78.7$ МПа, а суммарная сжимающая нагрузка – $F_I = 15.73$ кН.

Так как на каждом этапе нагружения решается линейная задача упругости, подобрать величины модуля упругости E и нагружения G , сохранив при этом граничные условия, можно следующим путем.

Допустим, граничные условия задачи на первом этапе нагружения прокладки были выполнены при произвольно выбранных значениях модуля упругости материала прокладки E_0 и суммарной сжимающей обобщенной силе G_I . При этом было получено абсолютное сжатие прокладки (Δ_1) (см. рис. 5).

После сравнения полученных результатов с диаграммой сжатия прокладки ПРП 2.1 (см. рис. 5), оказалось, что перемещение Δ_1 на диаграмме сжатия прокладки соответствует сжимающая сила F_I . Так как на каждом этапе нагружения решается линейная задача, то эту невязку можно нивелировать, проведя повторный расчет данного этапа нагружения прокладки с сжимающей силой F_I и новым модулем упругости $E_I=(F_I/G_I)*E_0$. Во сколько раз изменилась внешняя нагрузка, во столько раз изменился модуль упругости материала, а так как задача линейная, то перемещения её узлов останутся неизменными, следовательно, граничные условия соблюдены.

На первом этапе нагружения получены следующие значения: суммарное сжатие прокладки $Z_1 = -1.02$ мм; на диаграмме сжатия прокладки значению Z_1 соответствует суммарная сжимающая сила $F_I = 15.7$ кН; модуль упругости материала прокладки оказался равным $E_I=78.7$ МПа.

Распределение нормальных напряжений σ_z (МПа) в прокладке ПРП 2.1 от действия сжимающей силы $F_I = 15.73$ кН приведено на рис. 5. Фрагмент её средней части изображен на рис. 7, а, б, в.

Как видно из рис. 7, наибольшее сжимающее напряжение $\sigma_z = - 54.6$ МПа возникают в точках контакта верхней поверхности прокладки с подошвой рельса и на её нижней поверхности в точках контакта со шпалой.

Получены также поля распределения нормальных напряжений σ_x , σ_y , σ_z и вертикальных перемещений по оси Z центральной части упругой прокладки ПРП 2.1. Наибольшие сжимающие значения равны $\sigma_x = \sigma_y = - 42.3$ МПа, что согласуются с полем перемещений, приведенных на рис. 8,в.

Получены также касательные напряжения τ_{xy} , τ_{xz} и τ_{zy} (рис. 8,а,б,в) и горизонтальные перемещения X и Y (рис. 9,а,б) в средней части прокладки.

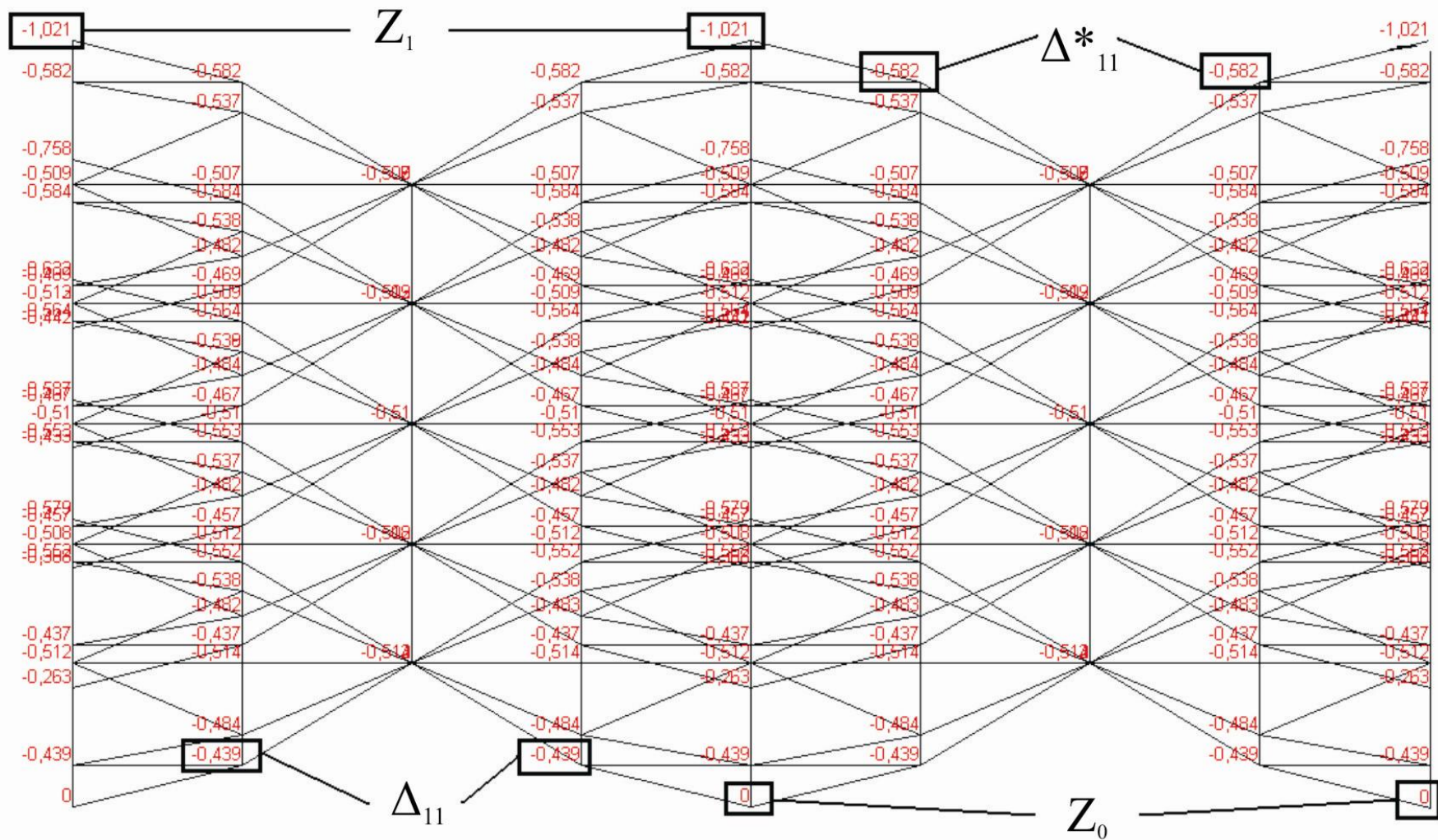


Рис. 6 – Абсолютные вертикальные деформации прокладки на первом этапе нагружения

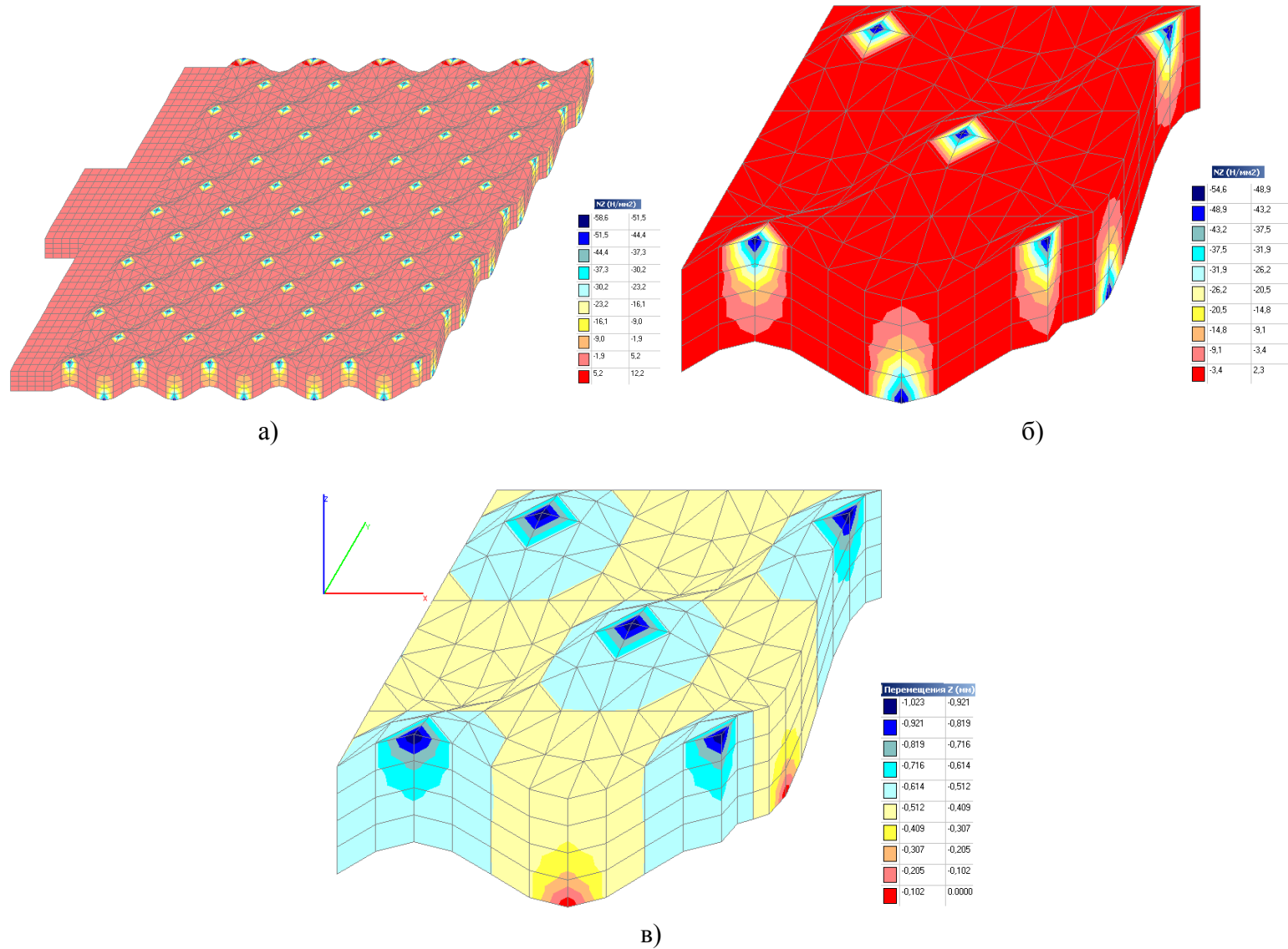
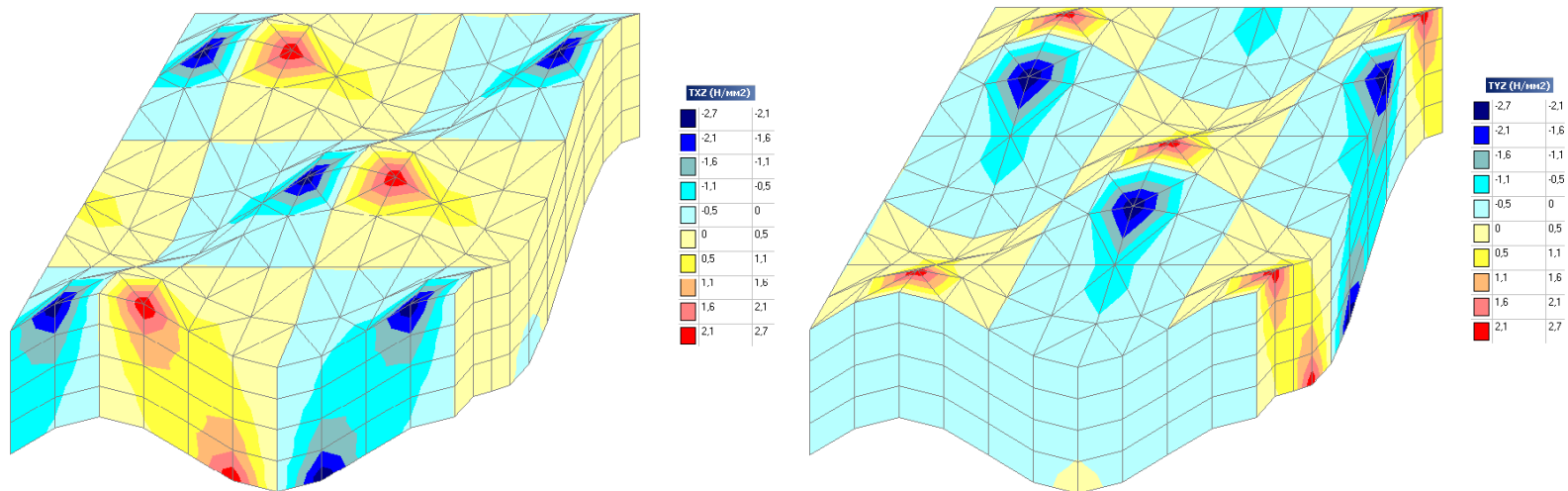
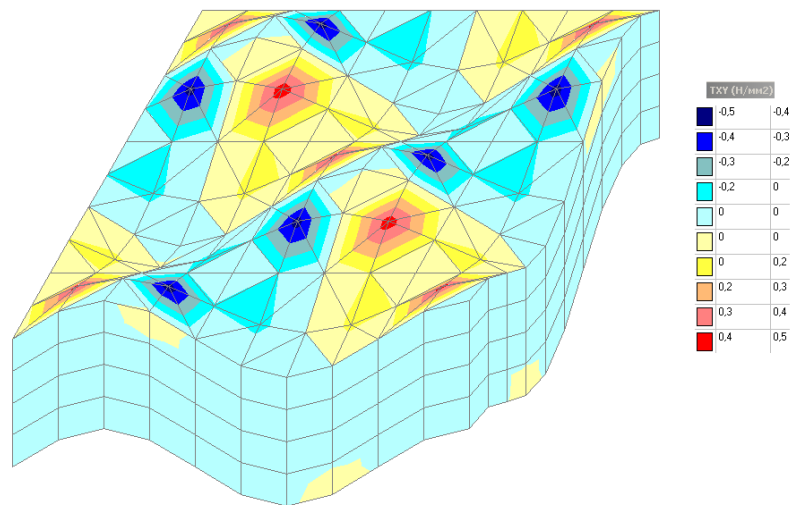


Рис. 7 – Поля нормальных напряжений и вертикальных перемещений в прокладке ПРП 2.1 от действия сжимающей силы $F_1=15.73$ кН:



а)

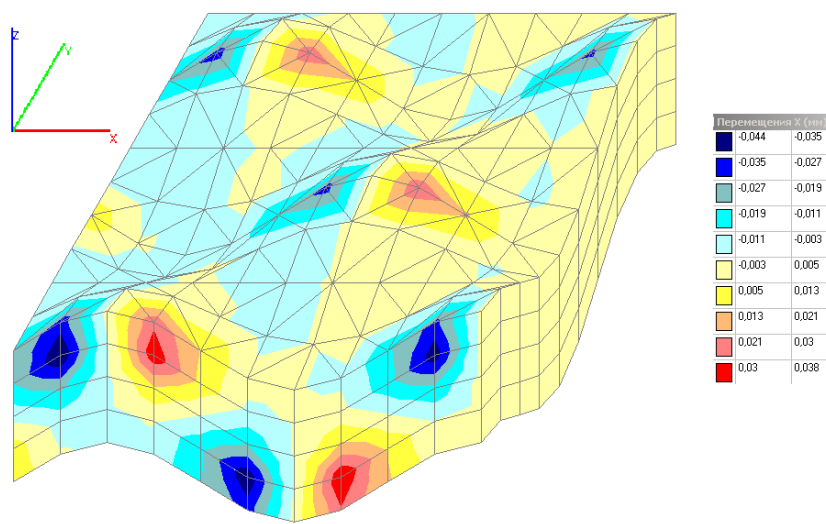
б)



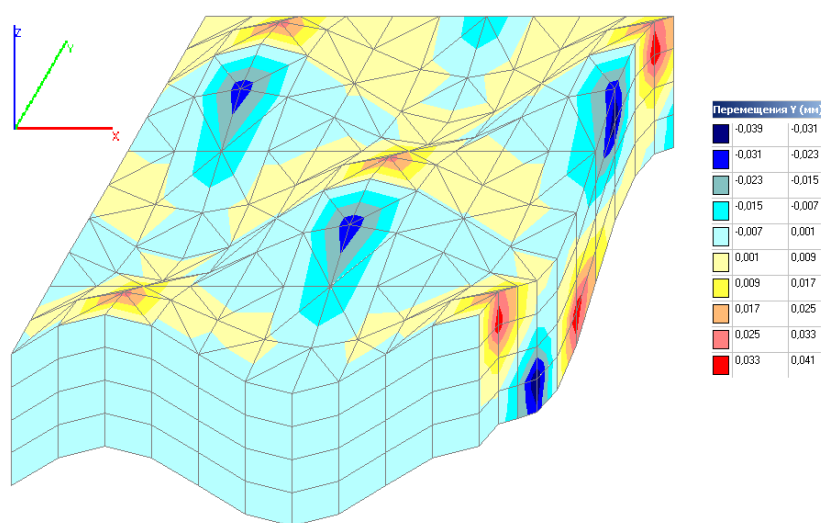
в)

а) напряжения τ_{xz} (МПа); б) напряжения τ_{zy} (МПа); в) напряжения τ_{xy} (МПа)

Рис. 8 – Поля касательных напряжений в прокладке ПРП 2.1 от действия сжимающей силы $F_1=15.73$ кН :



а)



б)

а) горизонтальные перемещения вдоль оси X (мм); б) горизонтальные перемещения вдоль оси Y (мм)

Рис. 9 – Поля горизонтальных перемещений средней части прокладки ПРП 2.1 от действия сжимающей силы $F_1=15.73$ кН:

Виду того, что в данном расчете прикладывались сосредоточенные узловые нагрузки, а в действительности нагрузка распределена по площади круга вокруг точек контакта, полученные расчетные напряжения несколько превышают действительные.

Так как при решении данной задачи в качестве приоритета были выбраны граничные условия, то на первом этапе нагружения, согласно методу сил, механическая система имела одну степень свободы – вертикальные перемещения узлов Δ_{11} и Δ_{11}^* , первыми, вступившими в контакт с подошвой рельса и металлической подкладкой или шпалой. Этой обобщенной координате соответствует обобщенная сила $G_1=15.73$ кН.

На втором этапе нагружения появляется вторая степень свободы рассматриваемой механической системы – совокупность узлов на нижней и верхней поверхности прокладки, которые следующими вступают в контакт с рельсом и шпалой. Чтобы этого достичь, к узлам первой степени свободы прикладывалась произвольная сжимающая прокладку обобщенная нагрузка $G_2 = 34.27$ кН. На втором этапе нагружения силы прикладывались к обеим поверхностям прокладки, к узлам нижней поверхности – вверх (-34.27 кН), а к узлам верхней поверхности – вниз (34.27 кН). Суммарная проекция всех сил на втором этапе нагружения на вертикальную ось равнялась нулю. Далее решалась задача удовлетворения граничным условиям на втором этапе нагружения. Для этого нужно составить и решить, по аналогии с методом сил, систему канонических линейных алгебраических уравнений второго порядка:

$$\begin{aligned} \Delta_{11}X_1 + \Delta_{12}X_2 &= \Delta_1 ; \\ \Delta_{21}X_1 + \Delta_{22}X_2 &= \Delta_2 . \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь приняты следующие обозначения: X_i – весовой коэффициент i -ого обобщенного нагружения G_i ; Δ_{ij} – перемещения узлов по i -ой обобщенной координате, вызванные j -ым обобщенным нагружением G_j ; Δ_i – величина зазора узлов нижней и верхней поверхностей прокладки, первыми вступающими в контакт с подошвой рельса и шпалой на i -ом этапе нагружения.

На рис. 10 показаны вышеперечисленные перемещения, полученные на втором этапе нагружения. Как видно из рисунка, абсолютное сжатие прокладки, вызванное вертикальными силами на втором этапе нагружения равно $Z_2 = -1,797$ мм, что соответствует сжимающей силе $F_2 = G_1 * X_1 + G_2 * X_2 = 42.2$ кН.

4 Численное решение задачи

Решение краевой задачи на шести этапах нагружения прокладки ПРП 2.1, в диапазоне $F = 0 \div 200$ кН, приведено в таблице 1. Для удовлетворения граничных условий (определения весовых коэффициентов обобщенных нагружений X_i) на каждом i -ом этапе нагружения решалась система линейных алгебраических уравнений i -го порядка. Следует отметить, что в таблице 1 приведены конечные результаты решения граничной задачи, этапы нивелировки опущены.

Результаты расчета прокладки ПРП 2.1 от вертикальных нагрузок сведены в таблице 2.

В 1-ой колонке таблицы 2 дана сжимающая сила прокладки F (кН) на каждом этапе нагружения, во 2-ой – сжатие прокладки Δ (мм).

Максимальные напряжения на каждом этапе нагружения прокладки приведены в таблице 2 ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ в колонках 3-5 и $\tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ в колонках 7-9).

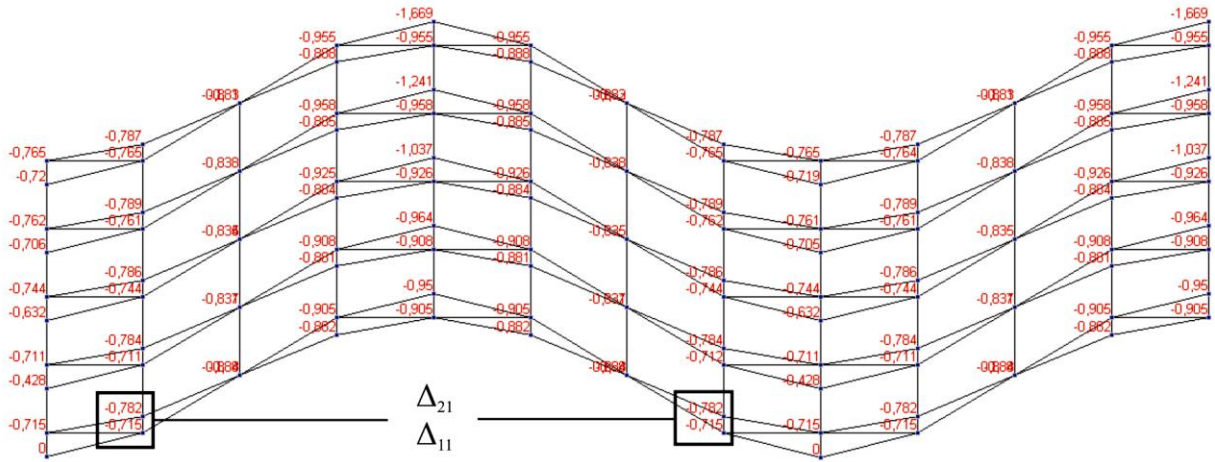
Анализируя результаты, приведенные на рис. 10 и в таблице 2, можно заметить, что в точках прокладки, где нормальные напряжения $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$

максимальные, касательные напряжения τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} близки нулю.

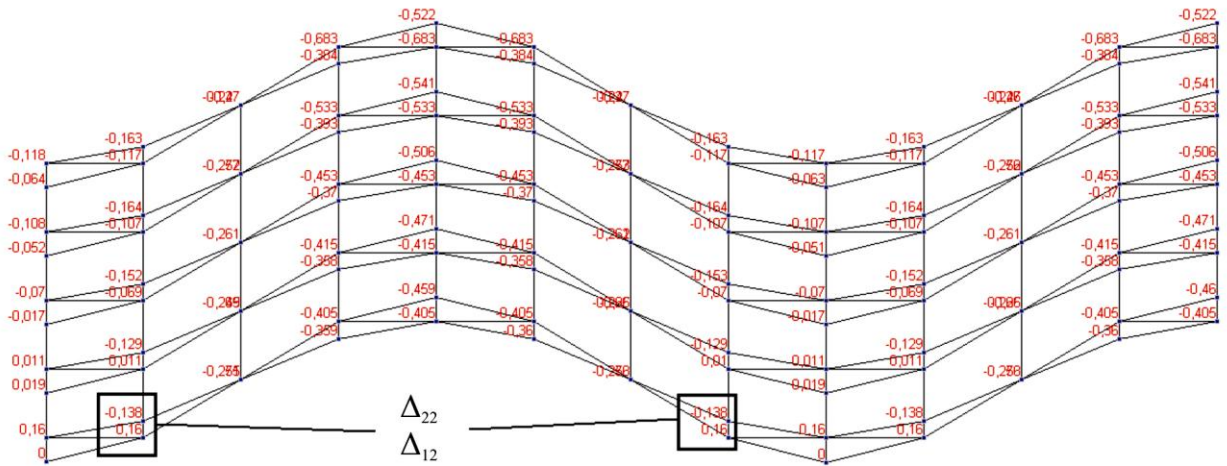
Таблица 1 – Поэтапное решение граничной задачи прокладки ПРП 2.1

№ эта-па	Обобщенные нагрузки						Весовые коэффициен-ты
	$G_1=$ 15,73 кН	$G_2=$ 34,27 кН	$G_3=$ 10 кН	$G_4=$ 40 кН	$G_5=$ 40 кН	$G_6=$ 40 кН	
1	$0,439 * X_1 = 0,439$						$X_1 = 1,0$
	$F_1 = G_1 * X_1 = 15,73 \text{ кН}$						
2	$0,7149 * X_1 - 0,1602 * X_2 = 0,439$ $0,7819 * X_1 + 0,1381 * X_2 = 0,75$						$X_1 = 0,8071$ $X_2 = 0,8613$
	$F_2 = G_1 * X_1 + G_2 * X_2 = 42,2 \text{ кН}$						
3	$0,602 * X_1 - 0,1338 * X_2 - 0,0238 * X_3 = 0,439$ $0,6581 * X_1 + 0,114 * X_2 - 0,6675 * X_3 = 0,75$ $0,6998 * X_1 + 0,2117 * X_2 - 0,2707 * X_3 = 1,5$						$X_1 = 1,2569$ $X_2 = 2,2841$ $X_3 = 0,5057$
	$F_3 = G_1 * X_1 + G_2 * X_2 + G_3 * X_3 = 103,1 \text{ кН}$						
4	$1,2385 * X_1 - 0,2752 * X_2 - 0,049 * X_3 - 0,0031 * X_4 = 0,439$ $1,3536 * X_1 + 0,2345 * X_2 - 1,3732 * X_3 + 0,0046 * X_4 = 0,75$ $1,4396 * X_1 + 0,4354 * X_2 + 0,5561 * X_3 - 0,1473 * X_4 = 1,5$ $1,5138 * X_1 + 0,5904 * X_2 + 0,9865 * X_3 + 0,0406 * X_4 = 2,25$						$X_1 = 0,6752$ $X_2 = 1,3595$ $X_3 = 0,3577$ $X_4 = 1,7841$
	$F_4 = G_1 * X_1 + G_2 * X_2 + G_3 * X_3 + G_4 * X_4 = 132,2 \text{ кН}$						
5	$1,4373 * X_1 - 0,3195 * X_2 - 0,057 * X_3 - 0,0037 * X_4 - 0,0124 * X_5 = 0,439$ $1,5711 * X_1 + 0,272 * X_2 - 1,5939 * X_3 + 0,0054 * X_4 - 0,0133 * X_5 = 0,75$ $1,6706 * X_1 + 0,505 * X_2 + 0,6447 * X_3 - 0,171 * X_4 - 0,1709 * X_5 = 1,5$ $1,7565 * X_1 + 0,6846 * X_2 + 1,1437 * X_3 + 0,047 * X_4 - 0,9971 * X_5 = 2,25$ $1,8027 * X_1 + 0,7804 * X_2 + 1,3296 * X_3 + 0,0454 * X_4 - 0,4316 * X_5 = 2,561$						$X_1 = 0,6071$ $X_2 = 1,2644$ $X_3 = 0,349$ $X_4 = 2,032$ $X_5 = 0,1772$
	$F_5 = G_1 * X_1 + G_2 * X_2 + G_3 * X_3 + G_4 * X_4 + G_5 * X_5 = 144,4 \text{ кН}$						
6	$1,7233 * X_1 - 0,3831 * X_2 - 0,0684 * X_3 - 0,0044 * X_4 - 0,0149 * X_5 - 0,0206 * X_6 = 0,439$ $1,8837 * X_1 + 0,3261 * X_2 - 1,9112 * X_3 + 0,0064 * X_4 - 0,016 * X_5 - 0,0669 * X_6 = 0,75$ $2,0029 * X_1 + 0,6054 * X_2 + 0,7728 * X_3 - 0,2052 * X_4 - 0,2051 * X_5 - 0,3484 * X_6 = 1,5$ $2,1059 * X_1 + 0,8204 * X_2 + 1,3706 * X_3 + 0,0563 * X_4 - 1,1949 * X_5 - 0,6627 * X_6 = 2,25$ $2,1604 * X_1 + 0,9343 * X_2 + 1,5896 * X_3 + 0,0513 * X_4 - 0,5245 * X_5 - 1,4604 * X_6 = 2,561$ $2,2701 * X_1 + 1,061 * X_2 + 0,7489 * X_3 + 0,0597 * X_4 - 0,5722 * X_5 - 1,0099 * X_6 = 3,0$						$X_1 = 0,5797$ $X_2 = 1,3238$ $X_3 = 0,3991$ $X_4 = 2,759$ $X_5 = 0,4594$ $X_6 = 0,3171$
	$F_6 = G_1 * X_1 + G_2 * X_2 + G_3 * X_3 + G_4 * X_4 + G_5 * X_5 + G_6 * X_6 = 199,9 \text{ кН}$						

Нагружение обобщенной нагрузкой $G_1 = 15.73 \text{ кН}$



Нагружение обобщенной нагрузкой $G_2 = 34.27 \text{ кН}$



Нагружение на 2-ом этапе $F_2 = 0.8071 \cdot G_1 + 0.8613 \cdot G_2 = 42.2 \text{ кН}$

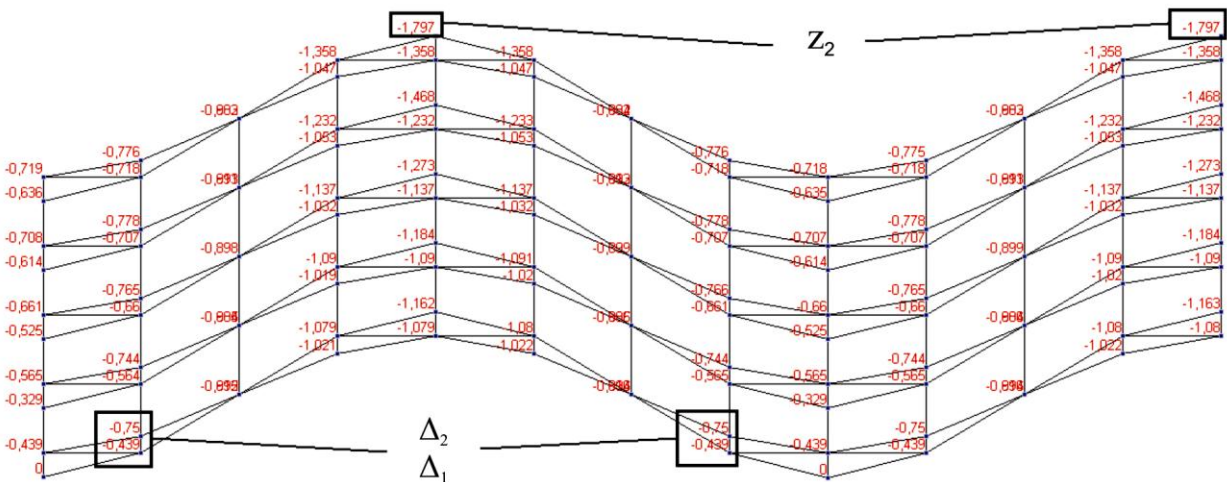


Рис. 10 – Вертикальные перемещения узлов (мм) на втором этапе нагружения

Следовательно, максимальные нормальные напряжения σ_x , σ_y , σ_z можно считать главными напряжениями, соответственно σ_1 , σ_2 , σ_3 . Тогда по IV (энергетической) теории прочности напряжения в этих точках можно оценивать по формуле:

$$\sigma_p^{IV} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_1 - \sigma_3)^2} \leq [\sigma]. \quad (2)$$

Значения расчетных напряжений σ_p^{IV} приведены в колонке 6 таблицы 2.

В колонке 10 таблицы 2 дан расчетный модуль упругости материала прокладки E (МПа), который на каждом этапе нагружения уточнялся в ходе удовлетворения граничных условий путем нивелировки E и F . В отличие от действительного модуля упругости, расчетный модуль упругости, кроме механических свойств материала, учитывает неравномерность нагруженности материала по объему прокладки. При равномерном нагружении материала прокладки действительные и расчетный модули упругости совпадают.

В колонке 11 таблицы 2 приведена квазилинейная расчетная жесткость прокладки K (кН/мм). Так как на каждом из шести этапов нагружения прокладки ПРП 2.1 решалась линейная задача, эта жесткость определялась по данным колонок 1 и 2 таблицы 2 по формуле:

$$K_i = \frac{F_i - F_{i-1}}{\Delta_i - \Delta_{i-1}}. \quad (3)$$

Учитывая, что материал прокладки ПРП 2.1 в основном работает на сдвиг, поэтому при оценке её прочности необходимо учитывать максимальные касательные напряжения, что соответствует IV (энергетической) теории прочности. С целью уточнения результатов, полученных расчетным путем, были произведены опыты по определению модуля упругости материала прокладки ПРП 2.1, изготовленной из полиуретана. Диаграмма сжатия опытного образца силой до 30 кН приведена на рис. 5. Из рисунка видно, что диаграмма сжатия полиуретана до значения силы 10 кН имеет явно выраженный линейный участок. Этому значению силы соответствует абсолютная деформация $\Delta L = 1,9$ мм.

Таблица 2 – Результаты квазистатического расчета прокладки ПРП 2.1 на действие вертикальных эксплуатационных нагрузок

F, кН	Δ , мм	σ_x (σ_1), МПа	σ_y (σ_2), МПа	σ_z (σ_3), МПа	σ_p^{IV} , МПа	τ_{xy} , МПа	τ_{xz} , МПа	τ_{yz} , МПа	E, МПа	K, кН/мм
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
15,73	1,023	-42,3	-42,3	-54,6	12,3	0,5	2,7	2,7	78,7	15,38
42,21	1,7972	-23,9	-23,9	-34,2	10,3	0,7	3,4	3,4	48,3	34,2

103,1	3,0463	-27,0	-27,0	-43,2	16,2	1,3	7,3	7,3	57,4	48,75
132,2	3,5993	-15,1	-15,2	-22,4	7,3	1,4	4,8	4,8	27,9	52,62
144,4	3,7895	-14,0	-14,0	-21,2	7,2	1,6	4,4	4,4	24,04	64,14
199,9	4,2224	-14,3	-14,3	-22,5	8,2	2,4	4,0	4,0	20,05	128,21

Следовательно, модуль упругости полиуретана в этом диапазоне интенсивности нагружения равен

$$E_1 = \frac{F_1 L}{A_1 \Delta L} = \frac{10 \times 0.4}{1.9^2 \times 0.19} = 5.83 \frac{\text{кН}}{\text{см}^2} = 58,3 \text{ МПа.}$$

Сжимающей силе F_1 соответствует сжимающее напряжение

$$\sigma = E_1 \frac{\Delta L}{L} = 58.3 \frac{0.19}{0.4} = 27.8 \text{ МПа.}$$

Анализ результатов, приведенных в таблице 2, позволяет сделать вывод, что в диапазоне нагружения прокладки 132÷200 кН, материал прокладки линейно показывает свойства, так как в выше приведенных расчетах нормальные напряжения не превышали 27.8 МПа.

Учитывая, что на каждом отдельном участке нагружения прокладки имела место условно линейная зависимость между нагрузкой и деформацией, полученные результаты показывают достаточный уровень точности. Определенным исключением являются первые этапы (1–3) нагружения, где результаты исследований незначительно увеличены в связи с контактом сферической поверхности синусоидальных рифлей прокладки и плоскими поверхностями подошвы рельса, а также металлической подкладки.

Задаваясь допустимыми значениями прочности и упругости подрельсовых и напальных эластомерных прокладок по различным рабочим сечениям и в конечном объеме, создан ряд полиуретановых и резиновых прокладок для рельсового пути подземного, карьерного и железнодорожного рельсового транспорта [5–11].

Заключение

Приведены физико-механические характеристики упругости рельсового пути и эластомерных подрельсовых и напальных прокладок рельсового пути.

Показатели упругости для различных марок эластомерных прокладок неодинаковы и зависят от материала прокладок и формы рифлей на верхней и нижней поверхностях прокладок.

Представлена вычислительная процедура для расчета прокладок с различными упругими характеристиками. В данной постановке задачи решалась физическая нелинейность, вызванная свойствами упругости материала и переменным профилем рифлей поверхности прокладки, а также геометрическая нелинейность, образующаяся в результате изменения площади переменной поверхности контакта прокладки на стыках с подошвой

рельса и поверхностью подкладки или шпалы. В связи с этим изменялись граничные условия исследуемой прокладки для каждого отдельного расчета и этапа нагружения.

С целью реализации этой процедуры и исследования напряженно-деформированного состояния отдельных рифлей и прокладки в целом была модифицирована конечно-элементная вычислительная программа SCAD, что позволило распространить ее на расчет процессов деформирования и напряженного состояния прокладок с различными формами поверхности и свойствами упругости. Точность общей процедуры решения показана на примере расчета упругой полиуретановой прокладки типа ПРП 2.1 с синусоидальной поверхностью. Практическое использование этого метода нашло применение при определении рациональной формы рифлей и свойств упругости для различных типов подрельсовых и нашпальных прокладок по критериям упругости и прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Повышение надежности работы верхнего строения пути в современных условиях эксплуатации: Сб. научн. тр. / Под ред Л. Г. Крысанова. – М. : Интекст, 2000. – 142 с.
2. Карпущенко Н. И. Совершенствование рельсовых скреплений / Н. И. Карпущенко, Н. И. Антонов. – Новосибирск: Из-во СГУС, 2003. – 300 с.
3. Надежность железнодорожного пути / В. С. Лысюк, В. Б. Каменский, Л. В. Башкатова; Под ред. В. С. Лысюка. – М.: Транспорт, 2001. – 286 с.
4. Шахуняц Г. М. Некоторые вопросы исследования работы резиновых прокладок повышенной упругости для пути с железнодорожными шпалами / Г. М. Шахуняц, А. А. Демидов // Тр. МИИТ. – 1971. – Вып. 354. – С. 3–76.
5. Говоруха В. В. Прогнозирование долговечности резиновых прокладок промежуточных скреплений рельсового пути с учетом нестабильности свойств материала / В. В. Говоруха // Межд. Симпозиум «Механика эластомеров». – 2001, Днепропетровск, окт. 2001 г.: тез. докл. – Д., 2001. – С. 11.
6. Говоруха В. В. Обобщенные нелинейные модели деформирования и разрушения и методы прогнозирования долговечности вязкоупругих элементов рельсового пути / В. В. Говоруха // Геотехническая механика: Межвед. сб. научн. тр. / ИГТМ НАН Украины. – Днепропетровск, 2001. – Вып. 24. – С. 94–113.
7. Говоруха В. В. Механика деформирования и разрушения упругих элементов промежуточных рельсовых скреплений / В. В. Говоруха: Моногр. – Днепропетровск: Лира, 2005. – 388 с.
8. Говоруха В. В. Исследование нагруженности, прочности и деформации рельсовых скреплений / В. В. Говоруха // Вісник Дніпропетр. Нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 11. – Д., 2006. – С. 29–40.
9. Говоруха В. В. Физико-технические основы создания элементов рельсового транспорта шахт и карьеров / В. В. Говоруха. – К. : Наук. думка, 1992. – 200 с.
10. Декларацийний патент на винахід. Україна (UA) МКП⁷ E01B9/54. Прокладка / В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, Я. В. Дубневич. – №49767A; Заявлено 13.06.2002. Опубл. 19.09. 2002, Бюл.№9. – 3 с.
11. Патент на промисловий зразок. Україна (UA) МПК 12-99. Прокладка підрейкова гумова /В. В. Говоруха, М. Д. Костюк, Я. В. Дубневич. – №6367; Заявлено 13.06.2002. Опубл. 15.08. 2002, Бюл.№ 8. – 3 с.: іл.

УДК 621.891

Д.т.н. Э.А. Ткаченко, д.ф.-м.н. В.Н. Чехов

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ СМАЗАННЫХ ЛАБИРИНТНЫХ УПЛОТНЕНИЙ, НАХОДЯЩИХСЯ В КОНТАКТЕ С ПЕРИОДИЧЕСКИ РАСПОЛОЖЕННЫМИ СКОЛЬЗЯЩИМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

На основі моделі змішаного тертя встановлено режим при якому реалізація ефекту несучої здатності мастильної плівки є найбільш імовірною та суттєвою. Результати чисельного розрахунку піддано експериментальній перевірці. Надано рекомендації для інженерних методів розрахунку. Упроваджені патентозахищені лабиринтні торцеві ущільнення в конструкціях підшипникових вузлів стрічкових конвеєрів.