

Вестник Томского государственного
архитектурно-строительного университета.
2024. Т. 26. № 5. С. 198–211.

ISSN 1607-1859 (для печатной версии)
ISSN 2310-0044 (для электронной версии)

Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo
arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta –
Journal of Construction and Architecture.
2024; 26 (5): 198–211.
Print ISSN 1607-1859
Online ISSN 2310-0044

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

УДК 691.328:539.37

DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-198-211

EDN: TPUUFV

АНАЛИЗ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ ПОДКЛАДКИ РЕЛЬСОВОГО СКРЕПЛЕНИЯ

**Сергей Иванович Герасимов, Виктор Михайлович Тихомиров,
Анатолий Михайлович Попов**

*Сибирский государственный университет путей сообщения,
г. Новосибирск, Россия*

Аннотация. *Актуальность.* Элементы верхнего строения железнодорожного пути преимущественно испытывают переменные во времени эксплуатационные воздействия. Как следствие, это сопровождается зарождением и накоплением в них усталостных повреждений. Дефекты промежуточных рельсовых креплений достаточно сложно идентифицировать методами дефектоскопии, что может стать причиной разрушения некоторых деталей. В частности, подкладки рельсовых креплений достаточно часто выходят из строя вследствие недостаточной усталостной прочности.

Данная проблема является *предметом* исследования настоящей статьи. Для проведения анализа усталостной прочности подкладки построена математическая модель ее деформирования, реализованная методом конечных элементов.

В железнодорожном пути стальная подкладка опирается на шпалу через резиновую прокладку. Поэтому для расчетов напряженно-деформированного состояния подкладки выбрана модель плиты переменной толщины, опирающейся на нелинейно-упругое основание. В свою очередь основание моделировалось набором стержней, имеющих нелинейную диаграмму деформирования, параметры которой определялись по результатам испытаний резиновой прокладки на сжатие.

Методы. Разработанная математическая модель реализована в программном комплексе COSMOS, в среде которого проведен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния подкладки при различных силовых воздействиях: переменная во времени нагрузка со стороны груженого подвижного состава и монтажные усилия от прикрепления подкладки к шпале и к рельсу.

Результаты. По результатам расчета получены параметры циклического нагружения в опасных точках подкладки и проведена оценка ее долговечности при различном значении силовых воздействий. При этом учтена неравномерность осадки пути, а также расстройство болтовых соединений рельсового крепления. Определено влияние этих факторов на фактические нагрузки, действующие на рельсовое крепление.

Получено, что ресурс подкладки в основном зависит от значения эксплуатационной динамической нагрузки.

Ключевые слова: подкладка рельсового крепления, нелинейно-упругое основание, метод конечного элемента, усталостная прочность, долговечность

Для цитирования: Герасимов С.И., Тихомиров В.М., Попов А.М. Анализ усталостной прочности подкладки рельсового крепления // Вестник Томского

государственного архитектурно-строительного университета. 2024. Т. 26. № 5. С. 198–211. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-198-211. EDN: TPUUFV

ORIGINAL ARTICLE

FATIGUE STRENGTH ANALYSIS OF RAIL FASTENING BASEPLATE**Sergei I. Gerasimov, Viktor M. Tikhomirov, Anatolii M. Popov***Siberian Transport University, Novosibirsk, Russia*

Abstract. Superstructural elements of a railway track experience dynamic loads varying over time. As a consequence, this is accompanied by the initiation and accumulation of fatigue damages. Defects in intermediate rail fastening are quite difficult to identify using flaw detection methods, and some can be destructed. In particular, rail fastening baseplates often fail due to insufficient fatigue strength.

Purpose: To investigate the fatigue strength of rail fastening baseplate.

Methodology: Development of the mathematical model of deformation based on the finite element method (FEM). Strength analysis of the baseplate using the model of a variable-thickness slab resting on a nonlinear elastic foundation. The latter is modeled by a set of rods with nonlinear deformation and parameters determined by compression tests of the baseplate. A mathematical model developed in COSMOS software for the FE analysis of the stress-strain state of the baseplate at a time-varying load from rolling equipment and assembly forces from attaching the baseplate to the sleeper and rail.

Research findings: The cyclic loading parameters are obtained at dangerous points of the baseplate and its durability is analyzed at different loads with respect to unevenness of track settlement and failure of bolt connections of rail fasteners. The influence of these factors on actual loads on the rail fastener is determined. It is found that the service life of the baseplate mainly depends on the dynamic load.

Keywords: rail fastening baseplate, nonlinear elastic foundation, finite element method, fatigue strength, durability

For citation: Gerasimov S.I., Tikhomirov V.M., Popov A.M. Fatigue Strength Analysis of Rail Fastening Baseplate. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta – Journal of Construction and Architecture. 2024; 26 (5): 198–211. DOI: 10.31675/1607-1859-2024-26-5-198-211. EDN: TPUUFV

Рост интенсивности эксплуатации железнодорожного пути и повышение силового воздействия на него со стороны подвижного состава приводят к увеличению повреждаемости деталей верхнего строения, в частности подкладок рельсового скрепления типа КБ.

Во время эксплуатации подкладки подвергаются воздействию периодически меняющихся нагрузок. Это является причиной зарождения усталостных трещин и разрушения подкладок. Опираение рельса на дефектные элементы может привести к неравномерному давлению на его подошву и выколу ее части.

Разрушение трех подкладок подряд может стать причиной превышения нормативных параметров содержания железнодорожного пути: во-первых, головка рельса может получить большое горизонтальное перемещение, во-вторых, движение состава приводит к местному продольному перемещению рельсов. Несвоевременная замена вышедших из строя подкладок приводит к интен-

сивному расстройству промежуточных креплений соседних шпал, а также к уширению колеи, что создает угрозу безопасной эксплуатации пути. По статистическим данным [1], за период между капитальными ремонтами пути после пропуска 450–500 млн т брутто груза количество изломанных подкладок составляет 180–220 шт/км пути.

Проблеме усталостной прочности подкладок рельсовых креплений на деревянных и железобетонных шпалах посвящены работы многих авторов, использовавших различные методы анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) этих элементов крепления. Обзор таких исследований представлен в монографии Н.И. Карпущенко и Н.И. Антонова [2].

В настоящей работе рассматривается стандартная стальная подкладка КБ 65, геометрия которой представлена на рис. 1. С целью оценки усталостной прочности и установления условий разрушения методом конечных элементов (МКЭ) были проведены численные исследования НДС стальной подкладки.

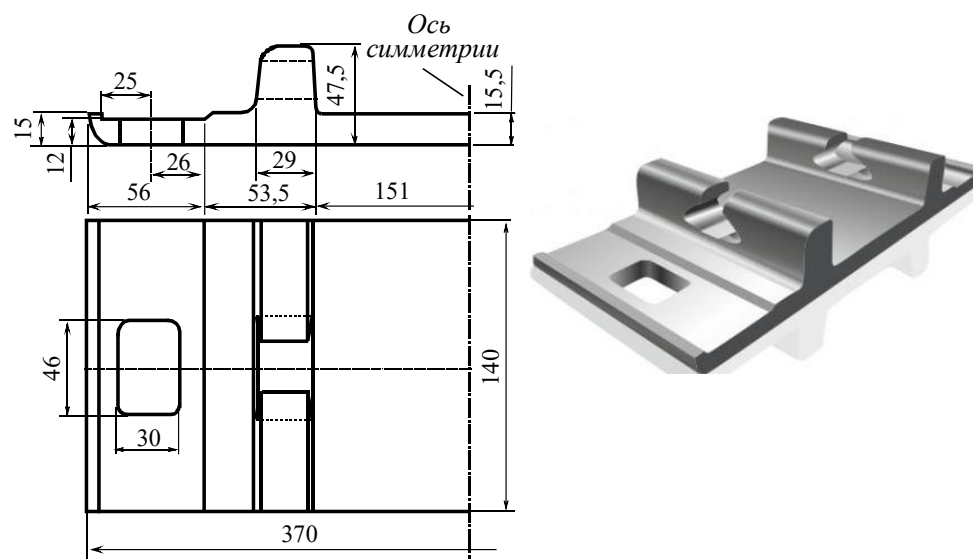


Рис. 1. Геометрия подкладки рельсового крепления КБ 65
Fig. 1. Schematic and 3D view of rail fastening baseplate KB 65

Подкладка КБ 65 является одним из элементов рельсового крепления и в пути опирается на шпалу через резиновую упругую прокладку (рис. 2). В соответствии с этим подкладка рассматривалась как плита переменной толщины на упругом основании. Расчет НДС проводился методом конечных элементов с учетом нелинейности деформирования резиновой прокладки, характеристики которого определены экспериментально в лабораторных условиях.

В процессе эксплуатации на подкладку действуют различные виды нагрузки: постоянные монтажные усилия от закрепления подкладки к железобетонной шпале и к рельсу (рис. 2) и динамическая переменная нагрузка от подвижного состава, которая достигает максимального значения, когда колесо вагона или локомотива располагается над шпалой.

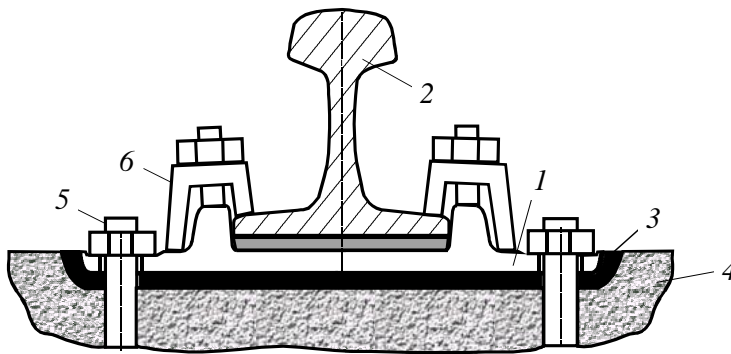


Рис. 2. Вид рельсового скрепления КВ 65:

1 – подкладка; 2 – рельс; 3 – нащпальная прокладка; 4 – железобетонная шпала; 5 – закладной болт; 6 – клемма

Fig. 2. Schematic of rail fastening baseplate KB 65:

1 – baseplate; 2 – rail; 3 – pad; 4 – concrete tie; 5 – insert bolt; 6 – clip

Исследования показывают, что данные силовые воздействия в процессе эксплуатации не остаются постоянными. За счет неоднородности механических характеристик балластной призмы наблюдается неравномерная осадка пути под шпалами, что приводит к увеличению максимального динамического давления на подкладку [3]. Смятие резьбы и «приработка» контактных поверхностей болтовых соединений, а также их постепенное раскручивание от вибрации снижают усилия их первоначальной нормативной затяжки [1]. Поэтому при исследовании усталостной прочности подкладки эти нагрузки варьировались для определения их неблагоприятного сочетания.

Для определения деформационных характеристик резиновой прокладки ЦП-328 были проведены ее испытания на сжатие. На прокладку устанавливался темплет рельса Р65, который имитировал жесткий штамп с площадью контакта $145 \times 150 = 21750 \text{ мм}^2$. Нагрузка на темплет задавалась равными ступенями по 10 кН от нуля до максимального значения 100 кН с помощью гидравлического пресса ПСУ-50. На каждой ступени нагружения индикаторами часового типа измерялась осадка прокладки δ . На рис. 3 представлены результаты испытаний в виде кривой податливости прокладки $P-\delta$.

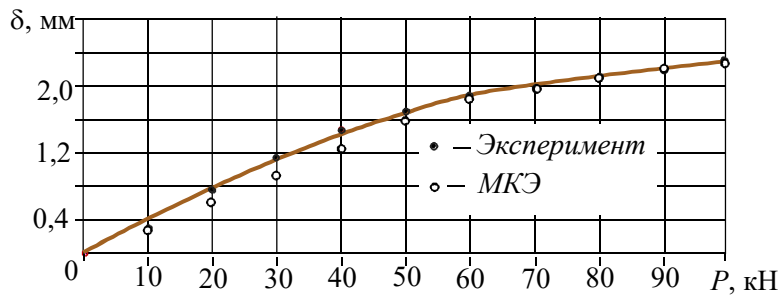


Рис. 3. Кривая деформирования нащпальной прокладки ЦП-328

Fig. 3. Strain curve of TsP-328 pad

Как видно из результатов испытаний, жесткость основания, на которое опирается стальная подкладка КБ 65, существенно зависит от сжимающей нагрузки.

В качестве расчетной модели подкладки рассмотрим модель плиты, опирающейся на упругое основание. Из данных эксперимента следует, что основание имеет нелинейный характер деформирования (рис. 3). Поэтому соотношение между интенсивностью отпора q и прогибом плиты y запишем в следующем виде [4]:

$$q = U(y)y, \quad (1)$$

где $U(y)$ – коэффициент постели, который в нашем случае является функцией прогиба.

На рис. 4 пунктирной линией представлена диаграмма деформирования основания. Здесь: $y = \delta$ – деформация прокладки ЦП-328; q – давление штампа.

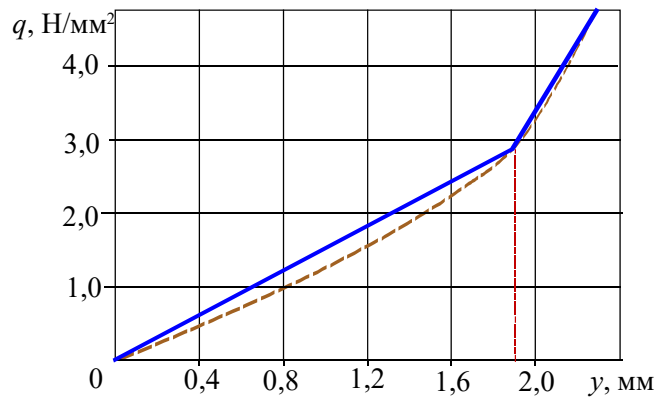


Рис. 4. Билинейная диаграмма деформирования упругого основания
Fig. 4. Bilinear diagram of elastic base deformation

Для простоты моделирования данную диаграмму представим в виде билинейной функции

$$q = \begin{cases} U_1 y, & 0 \leq y \leq 1,85 \text{ мм;} \\ U_2 \left[y + 1,85 \left(\frac{U_1}{U_2} - 1 \right) \right], & 1,85 < y \leq 2,3 \text{ мм.} \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 4 график выражения (2) представлен сплошной ломаной линией. При этом граница разбиения на участки соответствует максимальному изменению градиента диаграммы. Здесь первому участку диаграммы соответствует коэффициент постели $U_1 = 1,55 \text{ Н/мм}^3 = 15,5 \text{ МПа/см}$, второму участку – $U_2 = 4,2 \text{ Н/мм}^3 = 42 \text{ МПа/см}$.

Для построения конечно-элементной модели основания используем стержневую модель – каждый конечный элемент плиты, расположенный на контактной плоскости, опирается на четыре стержня.

Для простоты моделирования контактную поверхность плиты разобьем на n одинаковых квадратных конечных элементов, которые передают на стержни

основания одинаковое усилие $P_n = P/n$, которое является равнодействующей давления, собранного с части контактной площади $A_n = A/n$.

Определим жесткость стержневых элементов, которая должна соответствовать коэффициенту постели основания. На каждый стержень, за исключением стержней, расположенных на контуре контактной плоскости плиты, будет приходиться усилие

$$N = qA_n. \quad (3)$$

На стержневые элементы, расположенные на границе контактной поверхности, будет приходиться нагрузка $N_b = 2N$.

Осадка основания у равна деформации опорного стержня. Следовательно,

$$y = \frac{N}{c}. \quad (4)$$

Здесь c – продольная жесткость опорного стержня, которая определяется по формуле

$$c = \frac{E_t A_t}{l_t},$$

где E_t , A_t , l_t – модуль упругости, площадь поперечного сечения, длина опорного стержня соответственно.

Используя уравнения (1), (3) и (4), выразим жесткость стержня через коэффициент постели U :

$$c = UA_n. \quad (5)$$

При моделировании из трех параметров стержня E_t , A_t и l_t два можно задать произвольно, например A_t и l_t . Тогда из формулы (5) получим

$$E_t = U \frac{l_t A_n}{A_t}. \quad (6)$$

В конечно-элементных программных комплексах, таких как COSMOS, нелинейную модель деформирования стержневых элементов описывают, используя диаграмму «напряжение σ – деформация ε ». Ее характеристики будем определять по следующим формулам:

– напряжение в опорном стержне

$$\sigma = \frac{N}{A_t} = \frac{qA_n}{A_t}; \quad (7)$$

– относительная деформация

$$\varepsilon = \frac{y}{l_t}. \quad (8)$$

Для проверки представленной математической модели проведем конечно-элементный расчет тестовой задачи, соответствующей испытанию наштапальной прокладки на сжатие. Жесткий стальной штамп будем моделировать параллелепипедом с размерами 150×145×20 мм. Конечно-элементную модель штампа составим из объемных 8-узловых элементов с одинаковыми размерами 5×5×5 мм. Соответственно, контактная площадь каждого элемента $A_n = 25 \text{ мм}^2$.

Определим деформационные характеристики стержней, моделирующих основание. Примем $A_t = 10 \text{ мм}^2$, $l_t = 10 \text{ мм}$ и по формулам (7) и (8) диаграмму $q - y$ (см. рис. 4) преобразуем в диаграмму деформирования стержня $\sigma - \varepsilon$, которая представлена на рис. 5. Здесь $\sigma^* = 7,18 \text{ Н/мм}^2$ – напряжение, где меняется характер деформирования; $E_1 = 38,8 \text{ Н/мм}^2$ и $E_2 = 110,5 \text{ Н/мм}^2$ – модули деформаций на первом и втором участках диаграммы, которые были определены по формуле (6).

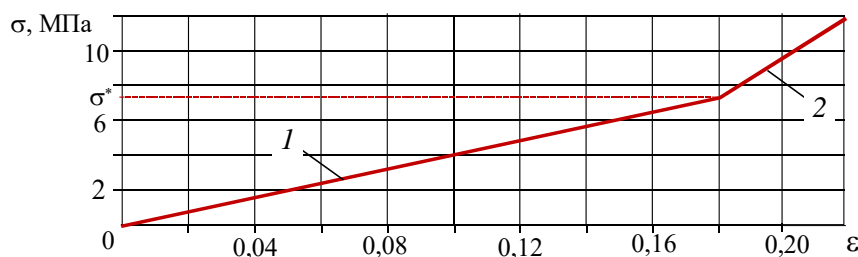


Рис. 5. Билинейная диаграмма деформирования стержневых элементов
Fig. 5. Bilinear diagram of rod deformation

Данные характеристики были использованы для процедуры нелинейного статического расчета в программном комплексе COSMOS [5].

По верхней поверхности штампа прикладывалась равномерно распределенная нагрузка, равнодействующая которой варьировалась в пределах от 0 до 100 кН. Результаты вычислений вертикальных перемещений штампа y показаны на рис. 3 светлыми точками. Видно, что они хорошо соответствуют экспериментальным данным (темные точки).

Проведем анализ напряженно-деформированного состояния подкладки МКЭ. Подкладку будем моделировать по упрощенной геометрии – без вырезов и скруглений. Учитывая симметрию, рассмотрим только одну ее четверть (рис. 6, а) и в программном комплексе COSMOS сгенерируем конечно-элементную сетку данного объекта из одинаковых объемных элементов. По площади контакта подкладки с основанием расположим элементы одинаковых размеров $4 \times 4 \times 4 \text{ мм}$ с площадью контактной грани $A_n = 16 \text{ мм}^2$.

На рис. 6, б показана схема приложения нагрузок. Все нагрузки моделировались равномерным давлением, распределенным по площади контакта подкладки с соответствующими элементами верхнего строения пути.

Максимальное усилие давления рельса на подкладку Q_{max} при движении груженого вагона было определено по стандартной методике расчета пути на прочность [6] с учетом динамического характера нагружения. Расчет был произведен при следующих параметрах движения: нагрузка на ось – 250 кН; скорость движения – 100 км/ч, плотность распределения шпал (эпюра шпал) – 1840 шт/км, модуль подрельсового основания – 114 МПа. Таким образом, было получено $Q_{\text{max}} = 80 \text{ кН}$. Эта нагрузка распределялась по средней части подкладки на площади $A_r = 21140 \text{ мм}^2$ (рис. 6, б), что соответствует давлению $3,59 \text{ Н/мм}^2$.

Монтажные усилия прикладывались по четырем контактными плоскостям (рис. 6, б):

1. Нагрузка от закладных болтов (см. рис. 2) q_b распределялась по площади контакта подкладки с изолирующей втулкой $A_b = 2050 \text{ мм}^2$.
2. Усилия от давления клеммы (см. рис. 2) на подкладку q_{k1} распределялись по площади $A_{k1} = 720 \text{ мм}^2$.
3. Нагрузка со стороны клеммного болта (см. рис. 2) q_{k2} действует на реборду вдоль оси y и распределена по площади $A_{k2} = 667 \text{ мм}^2$.
4. Клемма прижимает рельс к подкладке с усилием q_{k3} , распределенным по средней части подкладки на площади $A_{k3} = A_r$.

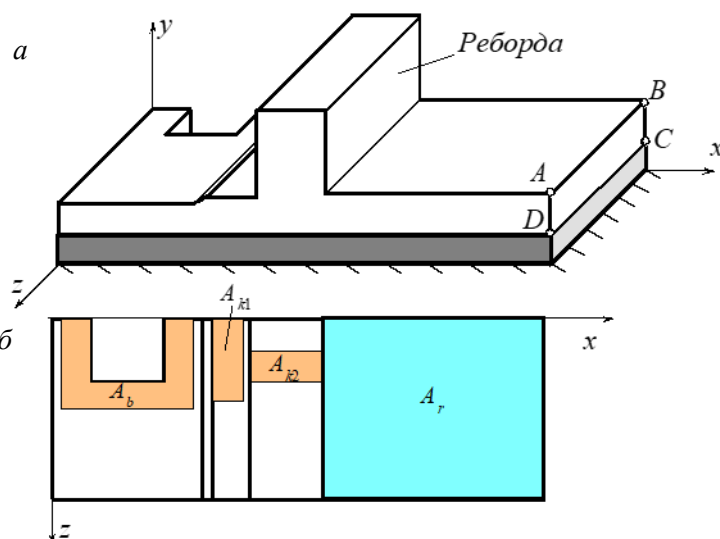


Рис. 6. Модель подкладки:

a – геометрия модели; b – схема приложения нагрузок

Fig. 6. Baseplate model:

a – geometry; b – load application

При нормативной затяжке болтов до 20 кН нагрузки на подкладку составили: $q_b = 9,76 \text{ Н/мм}^2$, $q_{k1} = 13,9 \text{ Н/мм}^2$, $q_{k2} = 30,00 \text{ Н/мм}^2$, $q_{k3} = 0,95 \text{ Н/мм}^2$.

Механические характеристики деформирования стержней, моделирующих основание, были определены по формулам (6) и (7). При $l_t = 10 \text{ мм}$ и площади $A_t = 10 \text{ мм}^2$ они составили: $E_1 = 24,8 \text{ МПа}$, $E_2 = 70,7 \text{ МПа}$, $\sigma^* = 5,3 \text{ МПа}$.

Статический конечно-элементный расчет НДС подкладки был произведен при двух вариантах нагружения:

- нагружение 1 – монтажные усилия q_b , q_{k1} , q_{k2} , q_{k3} .
- нагружение 2 – одновременное приложение монтажных усилий и максимального динамического давления Q_{max} .

Анализ результатов МКЭ показал, что самым опасным сечением в процессе эксплуатации является среднее сечение подкладки (см. рис. 6, a). На рис. 7 представлено распределение напряжений σ_x при втором варианте нагрузки. В этом сечении подкладка испытывает изгиб в двух плоскостях. Максимальный момент достигается в плоскости ux (см. рис. 6, a). Поэтому в дальнейшем анализировалось только распределение нормальных напряжений σ_x в данном сечении.

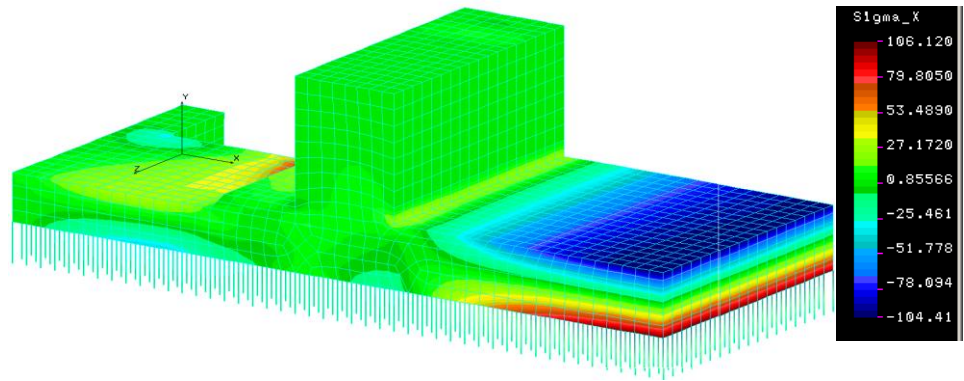


Рис. 7. Распределение напряжений σ_x при усилиях затяжки болтов 20 кН и нагрузке $Q_{\max} = 80$ кН
 Fig. 7. Stress σ_x distribution at 20 kN tightening force of bolt and $Q_{\max} = 80$ kN

При эксплуатации подкладка испытывает переменное циклическое нагружение. В табл. 1 представлены результаты расчета напряжений σ_x и параметров циклического нагружения в точках *A*, *B*, *C*, *D* среднего подрельсового сечения (см. рис. 6, *a*).

Таблица 1

Параметры напряженного состояния в точках опасного сечения при нормативном нагружении

Table 1

Stress-strain state parameters at points of dangerous section under standard loading

Параметры	Напряжения σ_x , МПа			
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>C</i>	<i>D</i>
Нагружение 1	87,0	85,3	-84,5	-89,6
Нагружение 2	-103,6	-100,7	96,9	103,0
Амплитуда цикла σ_a , МПа	95,3	93,0	90,7	96,3
Среднее напряжение цикла σ_m , МПа	-8,3	-7,7	6,2	6,7
Коэффициент асимметрии цикла <i>r</i>	-1,19	-1,18	-0,87	-0,87
Предел выносливости подкладки $\sigma_r^{(D)}$, МПа	-	-	129,3	129,3
Коэффициент запаса по выносливости <i>n</i>	-	-	1,31	1,24

В табл. 1: σ_a – амплитуда цикла:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2};$$

σ_m – среднее напряжение цикла:

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2};$$

r – коэффициент асимметрии цикла:

$$r = \frac{\sigma_{\min}}{\sigma_{\max}}.$$

Наиболее опасным является цикл нагружения с максимальной амплитудой, которая наблюдается в точке D , расположенной на нижней поверхности подкладки.

Подкладки КБ 65 в соответствии с требованиями ГОСТ 16277–2016 изготавливаются из углеродистой стали Ст3сп, которая имеет следующие механические характеристики: предел прочности $\sigma_b = 410$ МПа; предел текучести $\sigma_t = 260$ МПа; предел выносливости при симметричном цикле нагружения ($r = -1$) $\sigma_{-1} = 191$ МПа.

В рассматриваемых точках цикл нагружения отличается от симметричного. Поэтому для определения соответствующего предела выносливости воспользуемся формулой Одинга [7]:

$$\sigma_r = \sigma_{-1} \left(\frac{2}{1-r} \right)^{0,5}. \quad (9)$$

Данная зависимость получена при условии, что среднее напряжение цикла $\sigma_m > 0$. Поэтому предел выносливости определен только в точках C и D (табл. 1), где выполняется это условие.

В работе [8] по результатам натурных усталостных испытаний подкладок КБ 65 был определен предел выносливости детали при симметричном цикле нагружения $\sigma_{-1}^{(D)} = 125$ МПа. Зная предел выносливости детали, определим коэффициент запаса по усталостной прочности [9]:

$$n = \frac{\sigma_r^{(D)}}{\sigma_{\max}}. \quad (10)$$

В опасной точке (D) коэффициент запаса составил $n = 1,24$. Это меньше на 29 %, чем нормативный коэффициент $[n] = 1,6$ [10]. Данный результат свидетельствует о недостаточной надежности подкладки по выносливости, т. е. не исключает ее разрушение.

В процессе эксплуатации значение нагрузок изменяется. Во-первых, монтажные усилия вследствие вибраций и смятия резьбы в болтовых соединениях снижаются на 30–40 % [1] по сравнению с нормативными, во-вторых, вследствие неравномерной осадки пути динамическое давление на подкладку со стороны рельса увеличивается. В работе [3] было получено, что осадка грунтового основания под соседней шпалой приводит к увеличению давления на расчетную подкладку на 26 % до $Q_{\max} = 101$ кН. При осадке двух соседних шпал Q_{\max} возрастет до 116 кН.

В табл. 2 представлены результаты расчета параметров напряженного состояния в точке D при монтажных усилиях, соответствующих уменьшенной нагрузке болтовых соединений до 12 кН и $Q_{\max} = 80, 101$ и 116 кН.

Таблица 2

Результаты расчета при различном давлении рельса на подкладку

Table 2

Calculated rail pressure on baseplate

Параметры		Q_{\max} , кН		
		80	101	116
σ_x , МПа	Нагружение 1	-53,6	-53,6	-53,6
	Нагружение 2	141,2	192,0	224,1
Амплитуда цикла σ_a , МПа		97,4	122,8	138,9
Среднее напряжение цикла σ_m , МПа		43,8	30,7	85,3
Коэффициент асимметрии цикла r		-0,38	-0,28	-0,24
Предел выносливости $\sigma_r^{(D)}$, МПа		150,5	156,3	158,8
Коэффициент запаса по выносливости n		1,07	0,81	0,71
Долговечность N , млн циклов		> 20	4,49	2,06
Ресурс до разрушения T , год		-	2,81	1,28

При изменении монтажных усилий коэффициент запаса по выносливости уменьшился до $n = 1,07$, т. е. на 16 %. Следовательно, вероятность разрушения подкладки возрастает.

При увеличении давления на шпалу от груженого состава максимальное напряжение цикла превысило соответствующий предел выносливости. Следовательно, после некоторого срока эксплуатации подкладки в заданном режиме произойдет ее разрушение.

Проведем оценку долговечности N_p и фактического ресурса подкладки T .

На рис. 8 представлена типичная диаграмма выносливости для углеродистых сталей малой прочности, построенная в двойных логарифмических координатах $\lg\sigma_{\max} - \lg N_p$ согласно ГОСТ 25.504-82 [11].

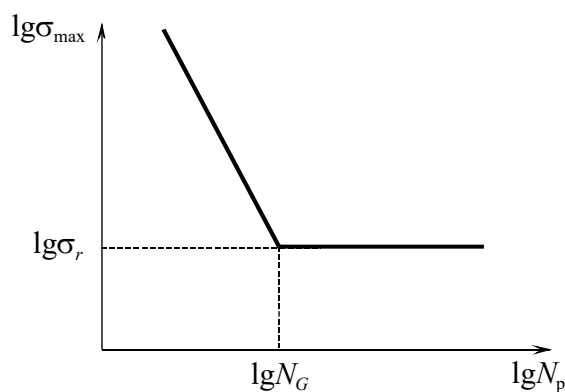


Рис. 8. Диаграмма выносливости для углеродистых сталей

Fig. 8. Fatigue life for carbon steels

Эту зависимость представляют в виде билинейной функции [11]:

$$N_p = \begin{cases} N_G \left(\frac{\sigma_r}{\sigma_{\max}} \right)^m, & \sigma_{\max} \geq \sigma_r; \\ \infty, & \sigma_{\max} < \sigma_r. \end{cases} \quad (11)$$

Здесь N_p – количество циклов нагружения до зарождения усталостной трещины; $N_G \approx 2 \cdot 10^7$ – число циклов, соответствующее точке перелома диаграммы выносливости (см. рис. 8); m – показатель степени.

Долговечность подкладки N_p из стали СтЗсп рассчитаем по эмпирической формуле (11), используя приближенную формулу для определения показателя степени m [11]:

$$m \approx \frac{1}{K_D} \left(5 + \frac{\sigma_g}{80} \right), \quad (12)$$

где K_D – коэффициент снижения предела выносливости детали [9]:

$$K_D = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_{-1}^{(D)}}. \quad (13)$$

Для рассматриваемой детали рельсового скрепления получим $K_D = 1,53$; $m = 6,6$.

Результаты расчета долговечности по формуле (11) представлены в табл. 2.

Определим фактический ресурс подкладки КБ 65, установленной в железнодорожный путь с годовой грузонапряженностью $\Gamma = 80$ млн ткм брутто/км и нагрузкой на ось вагона $P = 25$ т. Для этого применим следующую формулу:

$$T = \frac{2N_p P}{\Gamma}. \quad (14)$$

Результаты расчета ресурса при различном значении Q_{\max} приведены в табл. 2.

Очевидно, что расстройство верхнего строения пути, в виде его неравномерной осадки, приводит к резкому сокращению ресурса подкладки КБ 65.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие выводы:

Разработана математическая модель подкладки рельсового скрепления как плиты переменной толщины на нелинейно-упругом основании. Нелинейно деформируемое основание представлено стержневой моделью, параметры которой идентифицированы на основе результатов испытаний резиновой прокладки ЦП-328. Разработанный алгоритм проверен на тестовом примере – сжатие прокладки стальным штампом. Результаты показали хорошую сходимость с данными эксперимента.

В среде программного комплекса COSMOS построена конечно-элементная модель подкладки КБ 65, опирающейся на нелинейно-упругое основание.

Проведен статический анализ МКЭ напряженно-деформированного состояния подкладки КБ 65 при нормативных значениях нагрузений: монтажное усилие от закрепления подкладки к шпале и к рельсу и максимальное давление от движения груженого подвижного состава.

Анализ данных численного моделирования показал, что опасным является среднее подрельсовое сечение подкладки, где наблюдается большинство разрушений этих элементов в пути. В точках данного сечения рассчитаны параметры циклического нагружения.

По расчетным параметрам циклического нагружения была проведена оценка усталостной прочности подкладки КБ 65. Получено, что при нормативных нагрузках коэффициент запаса по устойчивости подкладки ниже на 29 %, чем допускаемое его значение.

Установлено, что увеличение давления на подкладку вследствие эксплуатационных дефектов верхнего строения пути, таких как расстройство болтовых соединений и неравномерная осадка балластной призмы, приводит к значительному уменьшению ее ресурса и является вероятной причиной разрушения подкладок рельсовых скреплений.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лысюк В.С., Желанин Г.Г., Кузнецов В.В. Как повысить надежность пути // Путь и путевое хозяйство. 2002. № 4. С. 8–15.
2. Карпущенко Н.И., Антонов Н.И. Совершенствование рельсовых скреплений. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2003. 299 с. EDN: QNQXVP
3. Карелин Т.Д., Полянская А.В., Тихомиров В.М. Влияние неравномерности осадки железнодорожного пути на взаимодействие рельса и шпал // Дни науки 2023 : материалы Регионального форума. Новосибирск, 2023. С. 180–185. EDN: GHCSCH
4. Горбунов-Посадов М.И., Маликова Т.А., Соломин В.И. Расчет конструкций на упругом основании. Москва : Стройиздат, 1984. 679 с.
5. Коробейников С.Н. Нелинейное деформирование твердых тел. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2000. 262 с.
6. Карпущенко Н.И., Котова И.А., Осипов В.Г. Расчет пути на прочность, устойчивость и надежность. Новосибирск : Изд-во СГУПС, 2010. 119 с. EDN: QNWMBZ
7. Одинг И.А. Допускаемые напряжения в машиностроении и циклическая прочность металлов. Москва : Машгиз, 1962. 260 с.
8. Альбрехт В.Г. К вопросу о вертикальной жесткости рельсовых скреплений // Совершенствование конструкций пути и стрелочных переводов. Москва, 1973. С. 63–77.
9. Когаев В.П. Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. Москва : Машиностроение, 1993. 364 с.
10. Антонов Н.И., Карпущенко Н.И. Расчеты подкладки скрепления БПУ при различных конструктивных изменениях // Напряжения и деформации в железнодорожных конструкциях : межвуз. сб. науч. трудов. Новосибирск, 1988. С. 11–18.
11. ГОСТ 25.504–82. Расчеты и испытания на прочность. Методы расчета характеристик сопротивления усталости. Москва : Изд-во стандартов, 1982. 55 с.

REFERENCES

1. Lysyuk V.S., Zhelanin G.G., Kuznetsov V.V. How to Increase Track Reliability. *Put' i putevoe khozyaistvo*. 2002; (4): 8–15. (In Russian)
2. Karpuschenko N.I., Antonov N.I. Improvement of Rail Fastenings. Novosibirsk, 2003. 300 p. (In Russian)
3. Karelin T.D., Polyanskaya A.V., Tikhomirov V.M. Influence of Uneven Settlement of the Railway Track on Rail-Sleeper Interaction. In: *Proc. Regional Forum 'Science Days'*. Novosibirsk, 2023. Pp. 180–185. (In Russian)
4. Gorbunov-Posadov M.I., Malikova T.A., Solomin V.I. Structural Analysis of Elastic Foundation. Moscow: Sroyzdat, 1984. 678 p. (In Russian)
5. Korobeinikov S.N. Nonlinear Deformation of Solids. Novosibirsk, 2000. 262 p. (In Russian)

6. *Karpuschenko N.I., Kotova I.A., Osipov V.G.* Strength, Stability and Reliability Analysis of Rail Way. Novosibirsk, 2010. 119 p. (In Russian)
7. *Oding I.A.* Permissible Stresses in Mechanical Engineering and Cyclic Strength of Metals. Moscow: Mashgiz, 1962. 260 p. (In Russian)
8. *Albrecht V.G.* Towards Vertical Rigidity of Rail Fastenings In: Improving Track Design and Turnouts. Moscow, 1973. Pp. 63–77. (In Russian)
9. *Kogaev V.P.* Strength Analysis under Time-Varying Stresses. Moscow: Mashinostroenie, 1993. 364 p. (In Russian)
10. *Antonov N.I., Karpuschenko N.I.* Strength Analysis of Rail Fastening Baseplate at Different Design. In: Stress and Strain in Railway Structures. Novosibirsk, 1988. Pp. 11–18. (In Russian)
11. GOST 25.504–82. Strength Analysis and Tests. Methods for Calculating Fatigue Resistance. Moscow: Izd-vo standartov, 1982. 55 p (In Russian)

Сведения об авторах

Герасимов Сергей Иванович, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 912267@mail.ru

Тихомиров Виктор Михайлович, докт. техн. наук, доцент, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, twm@stu.ru

Попов Анатолий Михайлович, докт. техн. наук, профессор, Сибирский государственный университет путей сообщения, 630049, г. Новосибирск, ул. Дуси Ковальчук, 191, 47604@mail.ru

Authors Details

Sergei I. Gerasimov, DSc, Professor, Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 912267@mail.ru

Victor M. Tikhomirov, DSc, A/Professor, Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, twm@stu.ru

Anatolii M. Popov, DSc, Professor, Siberian Transport University, 191, Dusi Kovalchuk Str., 630049, Novosibirsk, Russia, 47604@mail.ru

Вклад авторов

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Authors contributions

The authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 05.06.2024
Одобрена после рецензирования 09.07.2024
Принята к публикации 16.09.2024

Submitted for publication 05.06.2024
Approved after review 09.07.2024
Accepted for publication 16.09.2024