



2. Прандтль Л. Гидроаэромеханика. Ижевск : НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2000.
3. Иванов В.Д., Прокопьев С.А. Винтовые аппараты для обогащения руд и песков в России.- М. : Изд-во «ДАКСИ», 2000.
4. Извлечение мелкого золота из россыпей с использованием центробежных методов обогащения / Маньков В.М., Замятин О.В. и др. // Горный Журнал. 1994. № 1. С. 44–46.

УДК 629.4.015

Новосельцев Виктор Петрович,
к. т. н., доцент, Улан-Удэнский институт железнодорожного транспорта, филиал ИрГУПС,
тел.: 89140593228, e-mail: uuf.vpo@mail.ru

Новосельцев Петр Викторович,
к. т. н., доцент, Улан-Удэнский институт железнодорожного транспорта, филиал ИрГУПС,
тел.: 89146311915, e-mail: nov-pv@mail.ru

Гордеева Анна Александровна,
аспирант НОЦ современных технологий, системного анализа и моделирования,
Иркутский государственный университет путей сообщения, тел.: 89025638462, e-mail: uuf.vpo@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БЕССТЫКОВОГО РЕЛЬСОВОГО ПУТИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ОСЕВОЙ СИЛЫ

V. P. Novoseltsev, P. V. Novoseltsev, A. A. Gordeeva

THE STUDY OF STRAIN-DEFORMATION STATE OF CONTINUOUS WELDED RAILS UNDER THE EFFECT OF THE AXIAL FORCE

Аннотация. В процессе эксплуатации бесстыкового рельсового пути напряжение в рельсах существенно изменяется при: колебаниях температуры; действии продольных сил, возникающих при прохождении подвижного состава и накапливающегося при этом угона рельсового пути. Эти растягивающие или сжимающие напряжения неравномерно распределяются по длине пути и в некоторых местах могут достигнуть предельно значения.

В связи с этим необходимо разрабатывать способ и устройство для контроля величины этих напряжений.

Авторы разработали и запатентовали устройство, при помощи которого можно нагружать рельс продольной силой P и измерять перемещение точки приложения этой силы δ . Эксперименты показывают, что при больших смещениях полученная зависимость $P = f(\delta)$ нелинейна, но при малых смещениях деформация рельсового пути будет упругой и линейной. Продольная жесткость рельсового пути C_p равна отношению продольной силы и деформации. Представлены результаты экспериментального определения продольной жесткости бесстыкового рельсового пути.

На основе энергетического анализа деформации бесстыкового рельсового пути найдена формула изменения потенциальной энергии упругой деформации. Определена формула для расчета температурных напряжений рельсового пути. В статье на основе законов механики определяются основные параметры, характеризующие техническое состояние бесстыкового пути: сопротивление сдвигу рельсов; фактическое напряжение в рельсах на данном участке пути. Эти результаты могут быть использованы для принятия практических мер при эксплуатации бесстыкового пути. Авторы при исследовании напряженно-деформированного состояния бесстыкового рельсового пути использовали предложенное ими понятие «зона влияния осевой силы» и установили, что длина этой зоны зависит от силы сопротивления сдвигу рельсов, то есть от технического состояния пути.

Ключевые слова: сопротивление сдвигу рельса, зона влияния осевой силы, продольная деформация, напряжение от действия температуры.

Abstract. In the operation of continuous welded rail, rails strain varies significantly with: variations in temperature; longitudinal forces arising during the passage of train and accumulated shift of the rail track. These tensile or compressive strains are unevenly distributed along the length of the rail, and, in some places, can achieve maximum value.

In connection with this there is need to develop a method and an apparatus for controlling the magnitude of these strains. The authors have developed and patented a device with which it's possible to load a rail with axial force P and measure displacement of the point in the place of application of this force δ . Experiments show that the dependence at large displacements is non-linear, but at small displacements rail deformation will be elastic and linear. Axial stiffness of the rail is the ratio of the longitudinal force to move. The results of experimental determination of the longitudinal stiffness of continuous welded rail are presented. Based on energy analysis of deformation of continuous welded railway pack, formula of changes the potential energy of elastic deformation has been found. A formula for calculating temperature strain of the rails has been defined. The article, based on the laws of mechanics, determines the basic parameters characterizing the technical condition of the continuous welded rail: shearing resistance of the rails; actual rails strain on a given section of the continuous welded rail.

These results can be used for practical measures during operation of continuous welded rail. In the study of strain-deformation state of continuous welded rails the authors have proposed and used the notion of a "zone of axial force influence", and have found that the length of the zone depends on the strength of shearing resistance of the rail that is on the technical condition of rail.

Keywords: shearing resistance of the rail, zone of influence of the axial force, longitudinal deformation, strain from the effect of temperature.

Введение

В работах В. И. Новаковича [6], Т. Г. Яковлевой [1], А. Я. Когана [7] широко представлены результаты исследований напряженно-деформи-

рованного состояния бесстыкового рельсового пути, разработаны практические рекомендации по его эксплуатации.



Изучение напряженно-деформированного состояния позволяет оценить прочность и устойчивость рельсового пути, а также определить сопротивление сдвигу рельсов и тем самым оценить техническое состояние рельсового пути.

Авторами были проведены эксперименты по определению продольной жесткости звеньев пути [3] при помощи разработанного авторами устройства, патент на полезную модель № 100478 от 20 декабря 2010 г [2].

Было проведено исследование процесса трогания с места железнодорожного состава с определением кинематических и динамических параметров [4], которые показали, что возникает проскальзывание колесной пары локомотива по рельсам [3].

Напряженное состояние рельса в бесстыковом пути характеризуется наличием начального напряжения, вызванного действием температуры [1, с. 214].

Напряженное состояние изменяется также вследствие действия осевых сил, возникающих в режимах тяги или торможения.

В результате воздействия этих факторов происходит угон рельсов, может произойти потеря устойчивости рельсового пути.

Существует необходимость измерять фактическое напряжение и величину сопротивления сдвигу рельсового пути. С этой целью авторы разработали «Устройство для определения продольной жесткости рельсового пути» (патент на полезную модель RU 138300 U1) [5], с помощью которого рельсы нагружаются осевой силой P и измеряется перемещение точки приложения этой силы δ .

Авторы разработали способ определения основных параметров бесстыкового рельсового пути на основе результатов экспериментов, использования законов механики и аппроксимации функций.

1. Постановка задачи

Рассмотрим случай, когда в рельсовой нитке от действия температуры возникло напряжение сжатия (σ_t). Расчетная схема для этого случая представлена на рис. 1.

Со стороны верхнего строения пути на рельс действует сила сопротивления q , эпюра которой представлена на рис. 2.

В рельсе возникают напряжения:

- постоянное по длине напряжение от действия температуры σ_t (рис. 3);
- напряжение от осевой силы P (рис. 4);
- напряжение от действия силы сопротивления q (рис. 5).

Были приняты следующие допущения:

- зона влияния силы P распространяется на длину $2d$ и симметрична;
- распределенная сила сопротивления со стороны верхнего строения пути на рельс изменяется по линейному закону (рис. 2):

$$q_z = q_0 \cdot \frac{z}{d};$$

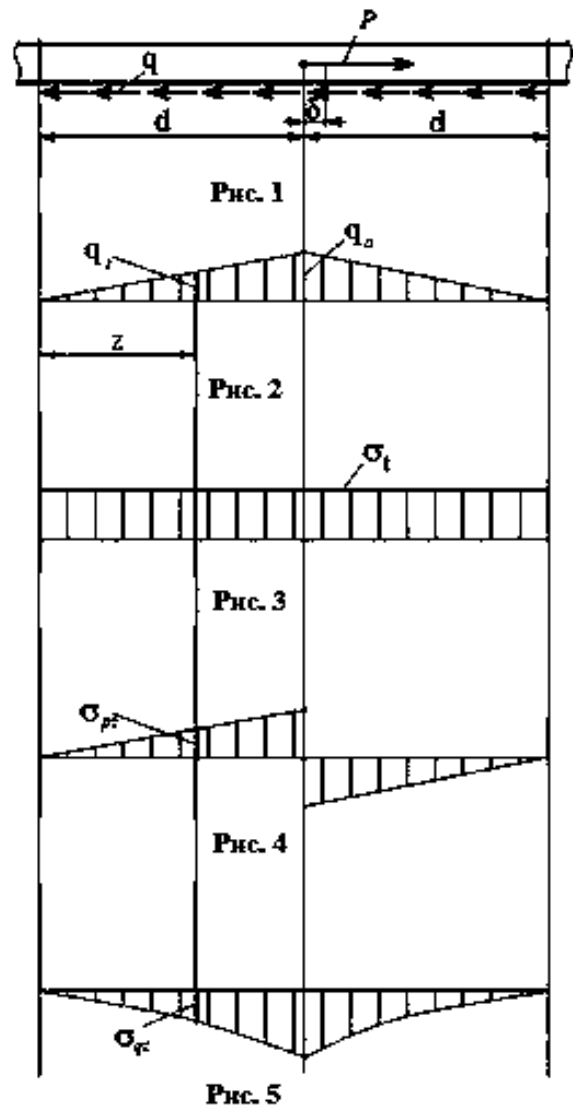
- действующие напряжения σ_t являются сжимающими и равномерно распределены по длине (рис. 3);

- напряжения от действия силы P в рельсе распределяются по линейному закону (рис. 4):

$$P_z = \frac{P \cdot z}{2 \cdot d \cdot F};$$

- напряжения σ_q действия верхнего строения пути на рельс (рис. 5)

$$\sigma_{qz} = q_0 \frac{z^2}{d \cdot 2 \cdot F}.$$





2. Энергетический анализ деформации бесстыкового рельсового пути

Начальная потенциальная энергия упругой деформации от действия температуры, до приложения силы P

$$U_0 = 2 \int_0^d \frac{\sigma_t^2 \cdot F^2 \cdot dz}{2 \cdot E \cdot F} \quad (1)$$

Потенциальная энергия упругой деформации от совместного действия σ_t, P, q

$$U_1 = \int_0^d \frac{(-\sigma_t + \frac{P \cdot z}{2 \cdot d \cdot F} - q_0 \frac{z^2}{d \cdot 2 \cdot F})^2 \cdot F^2 \cdot dz}{2 \cdot E \cdot F} + \int_0^d \frac{(-\sigma_t + \frac{P \cdot z}{2 \cdot d \cdot F} + q_0 \frac{z^2}{d \cdot 2 \cdot F})^2 \cdot F^2 \cdot dz}{2 \cdot E \cdot F} \quad (2)$$

Изменение потенциальной энергии упругой деформации

$$\Delta U = U_1 - U_0 \quad (3)$$

После интегрирования уравнений (1), (2) и подстановки в уравнение (3) получим

$$\Delta U = \frac{\sigma_t \cdot q_0 \cdot d^2}{3 \cdot E} + \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} + \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F} \quad (4)$$

Изменение потенциальной энергии упругой деформации равно сумме работ внешних сил:

$$\Delta U = A_i^e \quad (5)$$

3. Экспериментальное определение продольной жесткости бесстыкового рельсового пути

Далее выполняем эксперимент по исследованию зависимости продольной деформации рельсовой нитки δ от силы P (рис. 6).

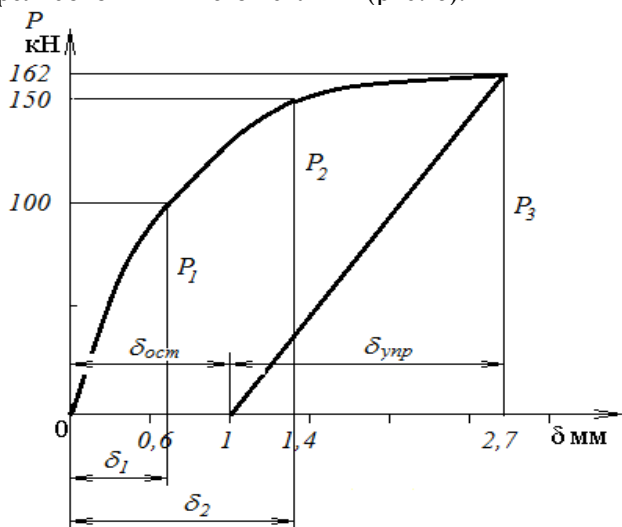


Рис. 6. График зависимости продольной деформации рельсовой нитки δ от силы P

График на рис. 6 аппроксимируем при помощи функции

$$P = a \cdot \delta^m \quad (6)$$

Выразим коэффициент m и, подставляя P_1 и P_2, δ_1 и δ_2 , получим

$$m = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} \quad (7)$$

Тогда коэффициент a равен:

$$a = \frac{P_1}{\delta_1^m} \quad (8)$$

4. Определение основных параметров бесстыкового рельсового пути

Выразим сумму работ внешних сил из формул (6), (7), (8) и, проинтегрировав, получим

$$\sum A_i^e = \int_0^\delta P(\delta) = \int_0^\delta a \cdot \delta^m = \frac{P \cdot \delta}{m+1} \quad (9)$$

Сумма работ внешних сил затрачивается на упругую деформацию рельсового пути и потери при его перемещении:

$$\sum A_i^e = A_{упр} + A_{потерь}$$

Работа упругой деформации

$$A_{упр} = \frac{1}{2} \cdot \delta_{упр} \cdot P,$$

где упругое перемещение $\delta_{упр}$ определяется по графику на рис. 6.

Работа потерь:

$$A_{потерь} = \sum A_i^e - A_{упр} = \frac{P \cdot \delta}{m+1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_{упр} \cdot P \quad (10)$$

Упругая деформация по закону Гука:

$$\delta_{упр} = \frac{P \cdot d}{E \cdot F}$$

Тогда длина рельсового пути d , подверженного деформациям от действия силы P :

$$d = \frac{\delta_{упр} \cdot E \cdot F}{P} \quad (11)$$

Работа потерь обусловлена действием распределенной силы сопротивления со стороны верхнего строения пути на рельс q :

$$A_{потерь} = A_q = 2 \int_0^d q_z \cdot \delta \cdot \frac{z}{d} \cdot dz, \quad (12)$$

где

$$q_z = q_0 \frac{z}{d};$$

Подставив в формулу (11) и проинтегрировав, а также выразив d по формуле (10), получим

$$A_{потерь} = A_q = 2 \cdot q_0 \cdot \delta \cdot \frac{\delta_{упр} \cdot E \cdot F}{P} \quad (13)$$



Выразив максимальное значение распределенной силы сопротивления со стороны верхнего строения пути на рельс q_0 и подставив работу потерь из формулы (10), получим

$$q_0 = \frac{P^2 \cdot \left(\frac{\delta}{m+1} - \frac{1}{2} \cdot \delta_{\text{упр}} \right)}{2 \cdot \delta \cdot \delta_{\text{упр}} \cdot E \cdot F}. \quad (14)$$

Подставляя в формулу (5) ΔU из формулы (4) и $\sum A_i^e$ из формулы (9), получим

$$\frac{\sigma_t \cdot q_0 \cdot d^2}{3 \cdot E} + \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} + \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F} = \frac{P \cdot \delta}{m+1}.$$

Выразим возникающие температурные напряжения рельсового пути:

$$\sigma_t = \left(\frac{P \cdot \delta}{m+1} - \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} - \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F} \right) \cdot \frac{3 \cdot E}{q_0 \cdot d^2}.$$

5. Вычисление основных параметров рельсового пути на основании результатов эксперимента

По результатам эксперимента (для одного частного случая) по приложению нагрузки P и измерению перемещения δ :

$$\begin{aligned} P_1 &= 10^5 \text{ Н}; & \delta_1 &= 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ P_2 &= 1,5 \cdot 10^5 \text{ Н}; & \delta_2 &= 1,4 \cdot 10^{-3} \text{ м}; \\ P_3 &= 1,62 \cdot 10^5 \text{ Н}; & \delta_3 &= 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}. \end{aligned}$$

Упругое перемещение определяем после разгрузки:

$$\delta_{\text{упр}} = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Кроме того, известно:

$$E = 2 \cdot 10^{11} \text{ Па}; F = 82 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2; \delta = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Решение:

$$m = \frac{\ln P_2 - \ln P_1}{\ln \frac{\delta_2}{\delta_1}} = \frac{\ln 1,5 \cdot 10^5 - \ln 10^5}{\ln \frac{1,4}{0,6}} = 0,478.$$

Сумма работ внешних сил:

$$\sum A_i^e = \frac{P \cdot \delta}{m+1} = \frac{1,62 \cdot 10^5 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3}}{0,478 + 1} = 296 \text{ Дж}.$$

Работа упругой деформации:

$$A_{\text{упр}} = \frac{1}{2} \cdot \delta_{\text{упр}} \cdot P = \frac{1}{2} \cdot 1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 1,62 \cdot 10^5 = 97 \text{ Дж}.$$

Длина рельсового пути d , подверженного деформациям от действия силы P :

$$d = \frac{\delta_{\text{упр}} \cdot E \cdot F}{P} = \frac{1,2 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 82 \cdot 10^{-4}}{1,62 \cdot 10^5} = 12 \text{ м}.$$

Работа потерь:

$$A_{\text{потерь}} = A_q = \sum A_i^e - A_{\text{упр}} = 297 - 97 = 199 \text{ Дж}.$$

Максимальное значение распределенной силы сопротивления со стороны верхнего строения пути на рельс:

$$q_0 = \frac{A_q \cdot P}{2 \cdot \delta \cdot \delta_{\text{упр}} \cdot E \cdot F} =$$

$$= \frac{199 \cdot 1,62 \cdot 10^5}{2 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot 1,2 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 82 \cdot 10^{-4}} = 3033 \text{ Н/м}.$$

Температурные напряжения рельсового пути:

$$\begin{aligned} \sigma_t &= \left(\frac{P \cdot \delta}{m+1} - \frac{P^2 \cdot d}{12 \cdot E \cdot F} - \frac{q_0^2 \cdot d^3}{20 \cdot E \cdot F} \right) \cdot \frac{3 \cdot E}{q_0 \cdot d^2} = \\ &= \left(\frac{1,62 \cdot 10^5 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3}}{0,478 + 1} - \frac{(1,62 \cdot 10^5)^2 \cdot 12}{12 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 82 \cdot 10^{-4}} - \right. \\ &\quad \left. - \frac{3033^2 \cdot 12^3}{20 \cdot 2 \cdot 10^{11} \cdot 82 \cdot 10^{-4}} \right) \cdot \frac{3 \cdot 2 \cdot 10^8}{3033 \cdot 12^2} = 433 \text{ МПа}. \end{aligned}$$

Полученное по [1, с. 229] напряжение близко по величине допускаемому значению по условию устойчивости бесстыкового пути.

Заключение

Пользуясь предложенной методикой, можно:

- 1) определить фактическое напряжение в рельсе на данном участке бесстыкового пути и сравнить его с допускаемым;
- 2) определить сопротивление сдвигу рельсов и тем самым оценить техническое состояние рельсового пути.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Железнодорожный путь : учеб. для вузов ж-д транспорта / под ред. Т.Г. Яковлевой. М. : Транспорт, 1999. 405 с.
2. Пат. 100478 Рос. Федерация, МПК В61 К9/08. Устройство для определения продольной жесткости рельсового пути / Елисеев С. В., Новосельцев В. П., Гордеева А. А.; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. ; опубл. 20.12.2010.
3. Новосельцев В.П., Новосельцев П.В., Гордеева А.А. Влияние продольной жесткости рельсового пути на проскальзывание колесной пары локомотива по рельсу // Мир Транспорта. 2013. № 4 (48). С. 34–38.
4. Новосельцев В.П., Дамбаев Ж.Г., Новосельцев П.В. Экспериментальное исследование процесса трогания с места железнодорожного состава // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2007. № 1 (13). С. 74–78.
5. Пат. 138300 Российская Федерация, МПК В61 К9/06. Устройство для определения продольной жесткости рельсового пути / Новосельцев В. П., Новосельцев П. В., Суслов О. А., Гордеева А. А., Елисеев С. В. ; заявитель и патентообладатель Иркут. гос. ун-т путей сообщ. ; опубл. 10.03.2014.
6. Новакович В.Ч. Бесстыковой путь со сверхдлинными рельсовыми плетями. М. : Маршрут, 2005. 139 с.
7. Коган А.П. Продольные силы в железнодорожном пути // Труды ВНИИЖТ. Вып. 332. 1967. 166 с.