

## ИССЛЕДОВАНИЕ НАПРЯЖЕННО–ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ РЕЛЬСОВЫХ ПРОВОДНИКОВ АРМИРОВКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТОЛОВ В УСЛОВИЯХ ИЗНОСА ПРИ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В статье рассмотрена и решена задача исследования напряженно-деформированного состояния рельсовых проводников жесткой армировки вертикальных стволов шахт в условиях повышенного износа под действием боковых динамических нагрузок.

В статті розглянута та розв'язана задача дослідження напружено-деформованого стану рейкових провідників жорсткого армування вертикальних стовбів шахт в умовах підвищеного зносу під дією бічних динамічних навантажень.

In the article is considered and resolved the task of research of the tense-deformed state of rail guides of hard reinforcement of mine vertical shafts in conditions of increased wear by the action of lateral dynamic loadings.

**Постановка и состояние проблемы.** В отечественной горной промышленности рельсовый прокат, изготовленный по ГОСТ 5633–51, широко используется в качестве проводников жесткой армировки вертикальных стволов. Применяются две схемы установки проводников относительно подъемного сосуда: противостоящие проводники и односторонние. В схеме с противостоящими проводниками взаимодействие сосуда с проводниками осуществляется через рабочие башмаки открытого профиля П-образного сечения. В односторонних проводниках используются только башмаки закрытого профиля. Пример сечения ствола с рельсовыми проводниками при обеих схемах компоновки показан на рис. 1.

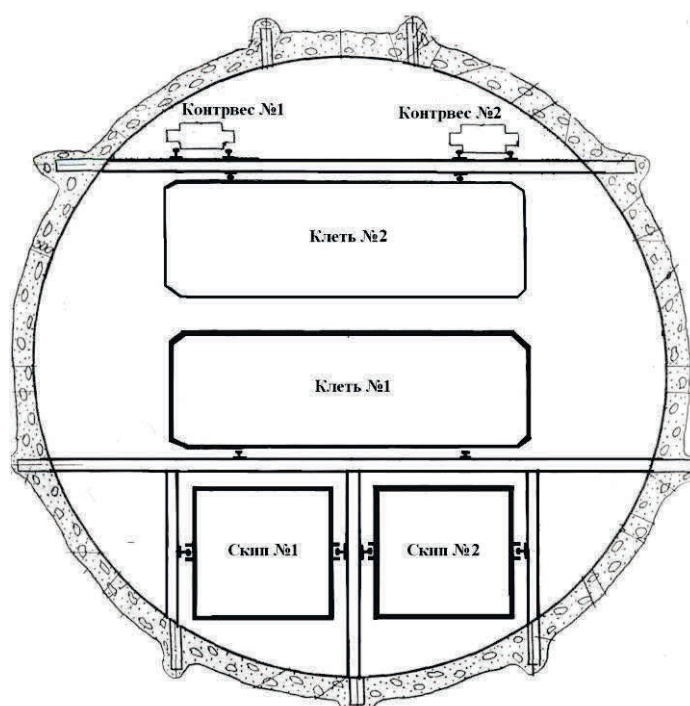


Рис. 1. Сечение ствола с рельсовыми проводниками

В данном стволе клетки движутся по паре односторонних, а скипы по паре противостоящих рельсовых проводников. При противостоящих проводниках приложение боковой силы от подъемного сосуда происходит через внутренние рабочие поверхности П-образных башмаков открытого профиля и приходится к головке рельсового проводника (рис. 2,а).

Согласно проекту такое же приложение боковой силы должно быть так же при одностороннем расположении проводников и башмаками скольжения закрытого типа, имеющими «губки» для фиксации головки рельса внутри башмака (рис.2,б). Однако в процессе износа башмака и головки рельса происходит изменение 2-х типов кинематических зазоров: основных – между внутренними боковыми поверхностями башмака и головкой рельса и гарантированных – между торцами губок башмаков и шейкой (полкой, в терминологии ЕПБ [1]) рельса.

В соответствии с §389 [1] «Проводники подлежат замене при износе: рельсовые с массой 1 погонного метра до 45 кг — свыше 8 мм на каждую сторону; рельсовые с массой 1 погонного метра 45 кг и более — свыше 12 мм на каждую сторону;... Износ полки, соединяющей головку рельсовых проводников с подошвой, допускается не более чем на 25 % номинальной ее толщины».

В тех случаях, когда из-за износа трущихся поверхностей головки рельса и башмака основные зазоры превышают нормативные, расстояние от боковой плоскости головки рельса до боковой плоскости шейки рельса становится меньше длины губок башмаков. Это создает жесткий контакт торцов губок с шейкой, который приводит к механическому выпиливанию в ней выточки, глубиной  $\delta$  (рис.2,в). В этом случае передача бокового усилия со стороны подъемного сосуда на проводник происходит по сечению выточки, которая в данном случае становится наиболее тонким местом в несущей конструкции рельсового проводника. Под действием боковой силы рельсовый проводник испытывает изгиб с кручением вокруг вертикальной оси. В случае приложения боковой силы к шейке в выточке, плечо силы, крутящий момент и напряжения в сечениях рельса, будут иметь меньшее значение, чем в случае приложения силы к боковой поверхности головки.

В процессе эксплуатации происходит постоянный контроль основных зазоров и замена башмаков (вкладышей) в случае превышения ними нормативных значений 10 мм (§388 [1]). После замены башмаков гарантированные зазоры восстанавливают свое первоначально значение и дальнейшее приложение боковой силы опять происходит через головку рельса, который уже имеет некоторую выточку на шейке (рис.2,г). Так как в этом случае крутящий момент будет иметь свое наибольшее из двух возможных случаев значение, но действовать будет на шейку рельса, ослабленную выточкой, то максимальные напряжения в сечениях шейки рельса будут наибольшими. Таким образом, получается, что при эксплуатации рельса с шейкой, ослабленной выточкой, продолжение эксплуатации при восстановлении основных зазоров до нормативного уровня с контактом башмаков через головку рельса повышает риск его разрушения в сечении выточки. Данная ситуация не отражена в действующих норма-

тивних документах и требует своего исследования с определением предельно допустимых параметров силового нагружения в зависимости от фактических параметров износа на стадии длительной эксплуатации.

На рис.2 показаны схемы взаимодействия башмаков типа с рельсовым проводником.

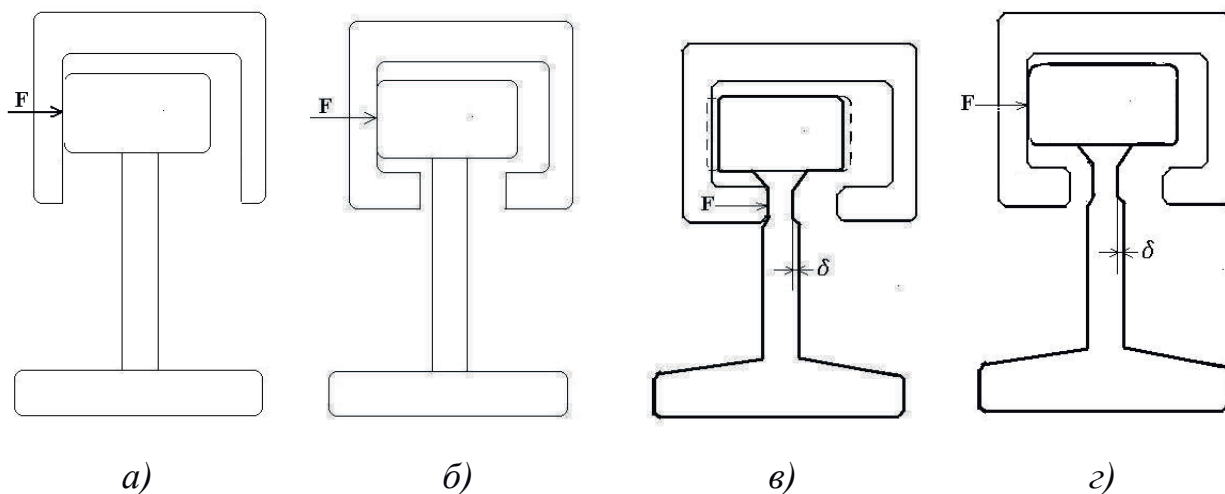


Рис.2. Расчетные схемы системы «башмак – рельсовый проводник»: а), б) приложение боковой силы от башмака к головке рельса; в) приложение боковой силы от башмака к шейке рельса; з) приложение боковой силы к головке рельса с выточкой на шейке.

Эксплуатация армировок с образованием значительной выточки и потери сечения шейки рельсовых проводниках нередко фиксируется при специализированных обследованиях армировок вертикальных стволов. Необходимо определить максимально допустимую величину  $\delta$  – потери сечения шейки рельса при образовании выточки, в зависимости от уровня действующих динамических боковых нагрузок  $F$  на армировку со стороны подъемного сосуда и определения безопасных режимов эксплуатации подъема в зависимости от величины износа проводников и рабочих башмаков.

**Изложение основного материала.** Для выяснения качественной стороны поведения параметров напряженно-деформированного состояния рельсового проводника и их взаимосвязи, выполним исследования используя упрощенную расчетную схему, позволяющую построить приближенное аналитическое решение. Рассмотрим отрезок проводника, длиной  $B$ , равной высоте примыкающего расстрела, отделенный от его частей в пролете выше и ниже исследуемого яруса.

Принятые обозначения геометрических размеров проводника показаны на рис. 3. Считаем, что подошва рельса своей тыльной стороной жестко закреплена относительно неподвижного пространства. Равнодействующая боковых сил  $F$  со стороны башмака приложена на расстоянии  $b_0/2$  от лобовой грани головки рельса. Шейка (полка) проводника имеет выточку длины  $L_v$  глубиной  $\delta$  ниже головки рельса.

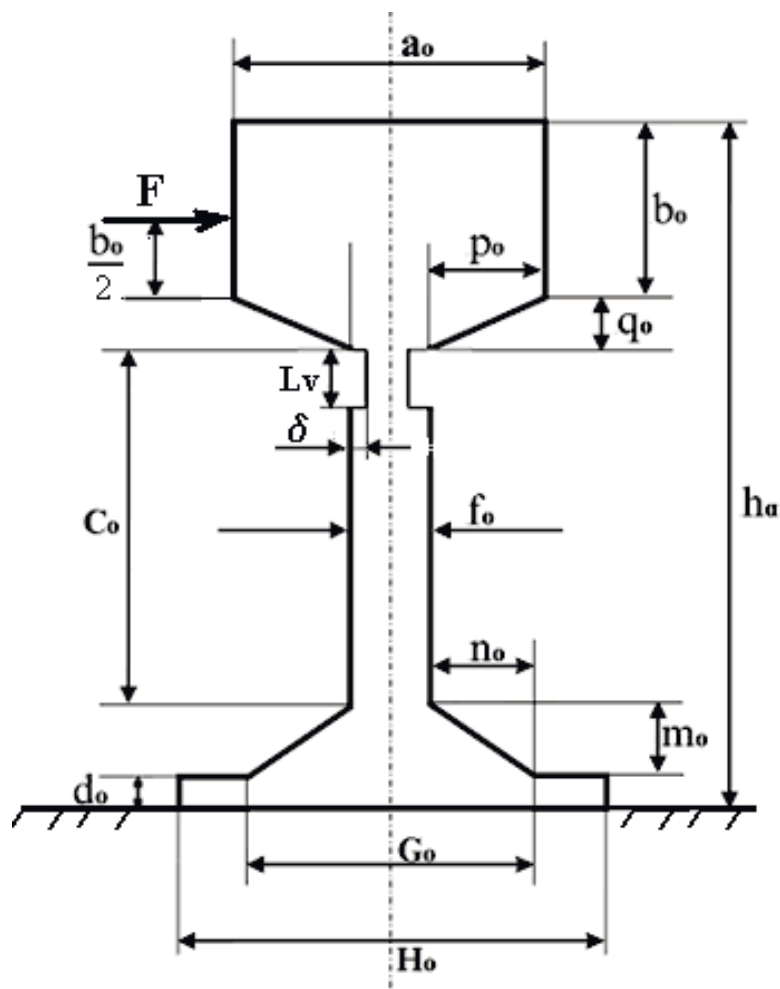


Рис. 3. Расчетная схема участка рельсового проводника

В первом приближении задачу можно рассматривать в модели изгиба балки переменного сечения. Поэтому для качественной иллюстрации влияния величины выточки на прочность шейки рельса рассмотрим расчетную схему рис. 3, для изолированного от смежных ярусов отрезка рельса без учета упругости опорного расстрела и износа головки и шейки за пределами выточки. Эта задача имеет аналитическое решение и представляет собой схему консольного защемления подошвы рельса с переменным по его высоте прямоугольным сечением участков. Моменты сопротивления прямоугольных сечений участков отрезка рельсового проводника  $W_i$  рассчитываются по формуле [2]:

$$W_i = \frac{1}{6} \cdot B \cdot h_i^2; (i=1, 2, 3) \quad (1)$$

где  $i$  – номер участка сечения ( $i=1$  соответствует головке рельса,  $i=2$  соответствует выточке,  $i=3$  соответствует участку шейки постоянного сечения);  $B$  – размер отрезка рельса, равный высоте расстрела (для балки 36С  $B=360$  мм);  $h_i$  – поперечный размер сечения  $i$ -го элемента рельса в плоскости, перпендикулярной оси рельса (для рельса Р43:  $h_1=70$  мм,  $h_2=\delta$  – переменная величина при исследованиях,  $h_3=14$  мм; для рельса Р38:  $h_1=68$  мм,  $h_2=\delta$  – переменная величина

при исследованиях,  $h_3=13$  мм). Соответственно напряжения  $\sigma(y)$  в сечениях шейки и выточки рассчитываются следующим образом:

$$\sigma(y) = \frac{P \cdot y}{W_i(y)}, \quad (2)$$

где  $y$  – расстояние по высоте рельса от точки приложения силы  $P$  до исследуемого сечения.

На рис. 4 приведены графики зависимости напряжений в сечениях шейки проводников Р38 и Р43 с выточкой, равной половине толщины шейки, под действием единичной боковой силы 10 кН. Видно, что при износе шейки в выточке напряжения в ней (самом тонком сечении) сравниваются с напряжениями у подошвы рельса только при износе свыше одной трети от толщины выточки.

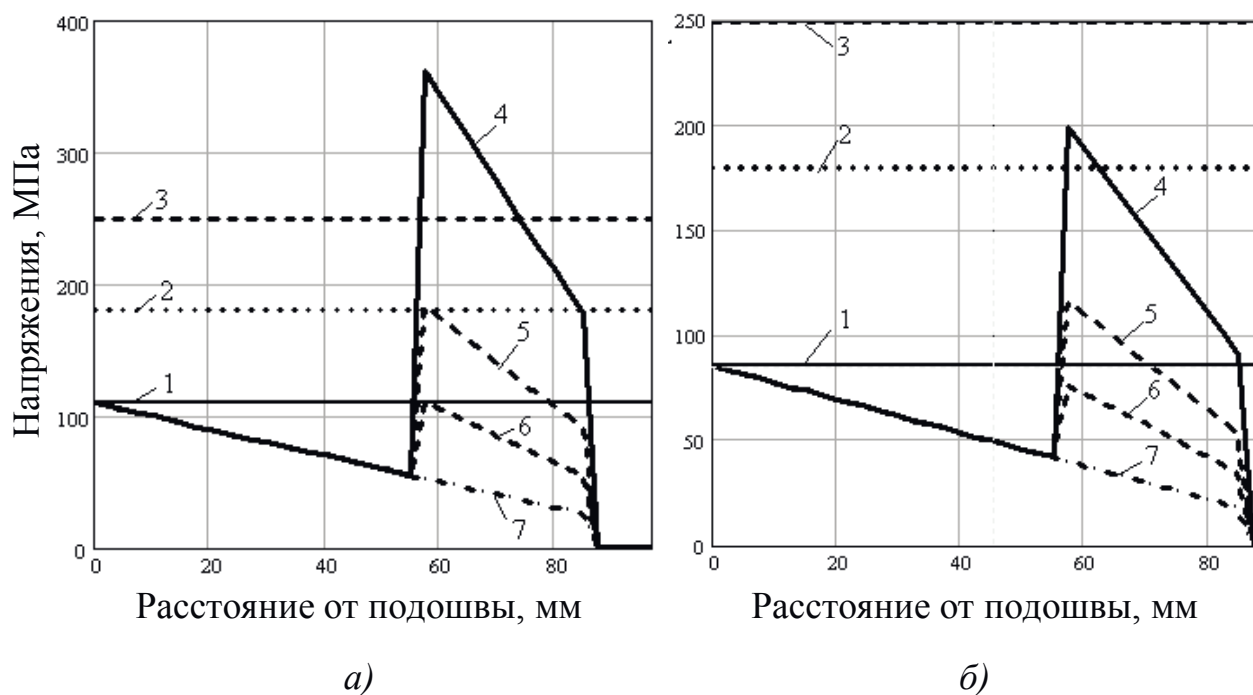


Рис. 4. Распределение напряжений по высоте шейки проводника с выточкой: а) рельс Р38, б) рельс Р43; 1 – напряжения в шейке у подошвы рельса; 2 – предельно допустимые напряжения для людского подъема; 3 – предельно допустимые напряжения для грузового подъема; 4 – напряжения при износе выточки 4 мм на сторону; 5 – напряжения при износе выточки 3 мм на сторону; 6 – напряжения при износе выточки 2 мм на сторону; 7 – напряжения при отсутствии износа выточки

При дальнейшем износе концентрация напряжений в выточке начинает превосходить напряжения в остальной части шейки и выточка становится наиболее нагруженной частью сечения проводника. В случае незначительного превышения боковой силой значения 10 кН напряжения в выточке превысят

допустимые для людских подъемов 180 МПа, а в дальнейшем и допустимые для грузовых 250 МПа [3].

На рис. 5 приведены графики зависимости концентрации напряжений в зависимости от потери сечения в выточке (%). Графики показывают, что потеря 20% сечения шейки за счет выточки приводит к концентрации напряжений в ней в 2.8 раза по сравнению с остальной частью шейки для обоих типов проводников.

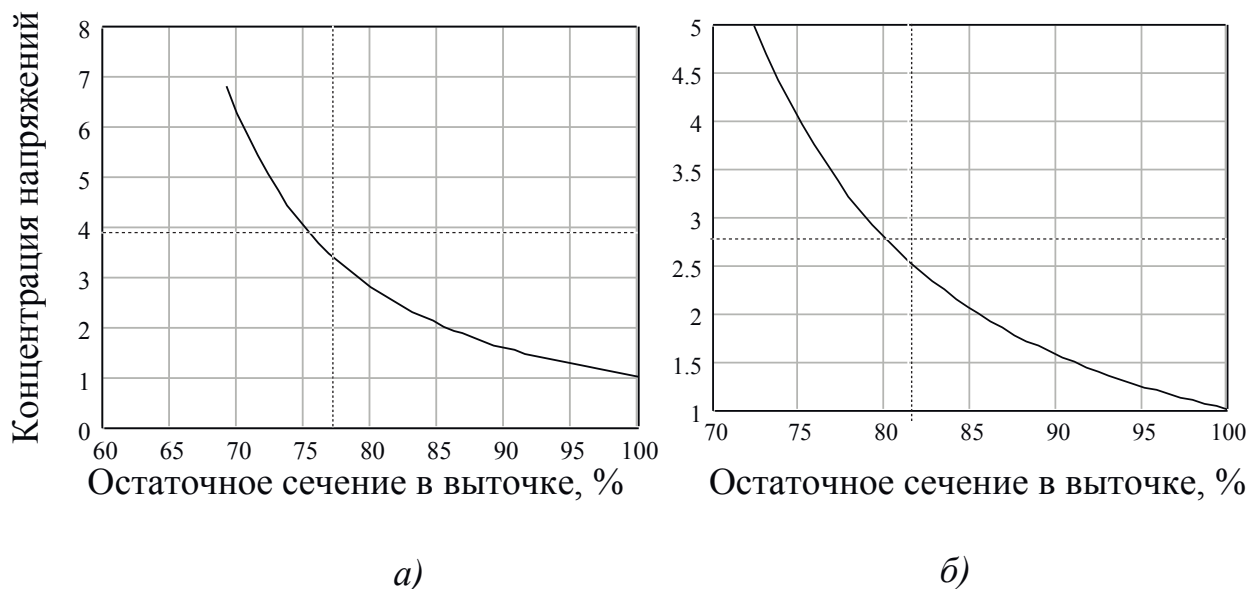


Рис. 5. Зависимость концентрации напряжений в выточке от ее глубины:  
 а) рельс Р38; б) рельс Р43

На рис. 6 приведены графики допустимых боковых нагрузок на проводники в зависимости от глубины выточки. Горизонтальная прямая №1 показывает значение допустимой боковой нагрузки на головку рельса для людских подъемов (в модели отрезка проводника с заземленной подошвой без смежных расстрелов). Видно, что концентратор напряжений находится у подошвы и является ограничителем допустимых напряжений по предельно допустимому значению напряжения 180 МПа. По мере роста износа выточки свыше 2.5 мм на сторону допустимые нагрузки резко уменьшаются по критерию превышения допустимого напряжения в сечении выточки, наиболее близком к подошве. По длине выточки в направлении головки из-за уменьшения плеча боковой силы напряжения в сечениях выточки будут меньше, а допустимые нагрузки больше. Поэтому, встречающееся на практике в некоторых случаях положение выточки с некоторым отступом от нижней части головки на допустимые нагрузки влияния не оказывает. При глубине выточки свыше 2.5 мм, (кривая №5) расстояние от выточки до подошвы рельса является параметром, определяющим допустимую боковую нагрузку на головку рельса.

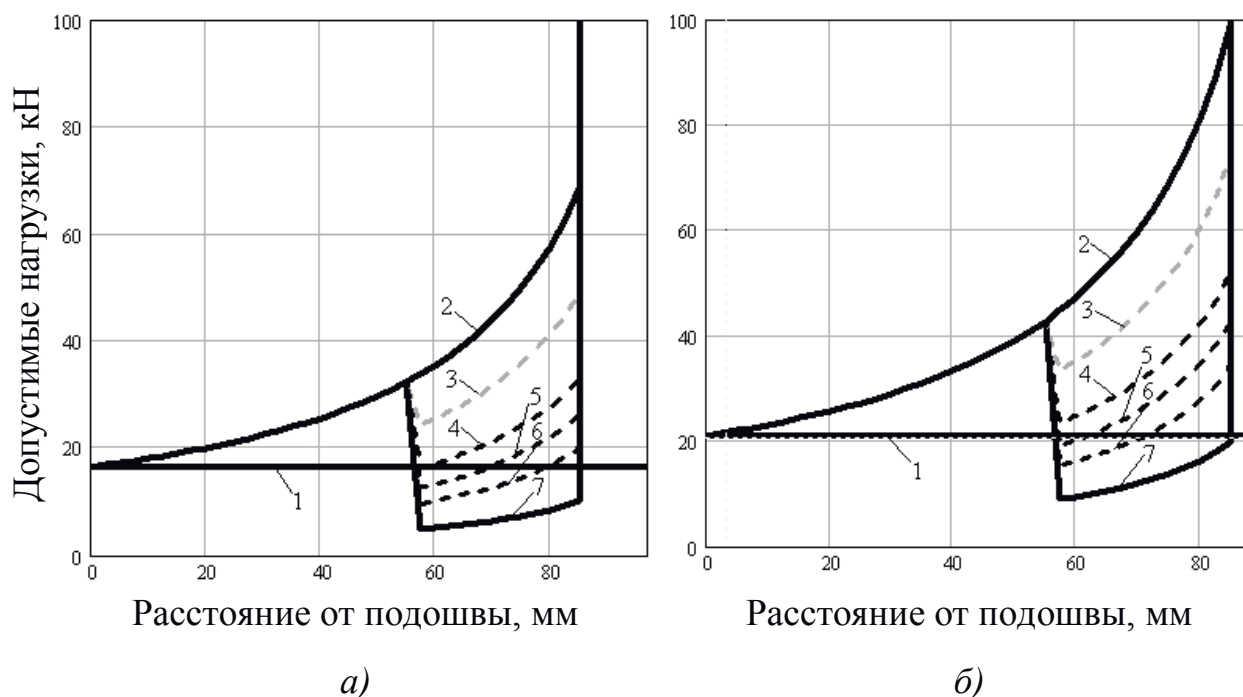


Рис. 6. Графики допустимых боковых нагрузок на проводники в зависимости от глубины выточки: *а)* рельс Р38, *б)* рельс Р43; 1 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечении неизношенной шейки у подошвы; 2 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечениях неизношенной шейки; 3 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечениях выточки с износом 1 мм на сторону; 4 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечениях выточки с износом 2 мм на сторону; 5 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечениях выточки с износом 2,5 мм на сторону; 6 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечениях выточки с износом 3 мм на сторону; 7 – минимально допустимые нагрузки по напряжениям в сечениях выточки с износом 4 мм на сторону

Таким образом, полученные результаты показали, что в случае повышенных боковых зазоров между рабочими башмаками закрытого типа и головкой рельса, которые приводят к появлению выточки на шейке из-за контакта с губками башмака, ограничивающим критерием для допустимых значений боковых динамических нагрузок являются напряжения в сечениях шейки (концентраторов напряжений), положение которых зависит от величины износа шейки в выточке и у основания рельса. Аварийно опасное напряженно-деформированное состояние рельсового проводника по критерию разрушения шейки в выточке возникает в тех случаях, когда в результате выполнения ремонтных работ с заменой башмаков и приведением боковых зазоров к нормативным значениям восстанавливается передача бокового контактного усилия через головку рельсового проводника. При износе выточки до 20% происходит 3-х кратное повышение напряжений в ее сечении, наиболее удаленном от головки рельса.

**Выводы.** Наиболее опасное эксплуатационное состояние по критерию разрушения шейки рельсовых проводников, имеющих выточку, возникает после выполнения восстановительных работ по замене вкладышей и возобновления передачи боковой силы от подъемного сосуда через головку рельса.

При незначительной потере сечения в выточке (20%) напряжения в ней возрастают до 3-х раз для проводников Р38 и Р43.

В тех случаях, когда предыдущая эксплуатация системы «сосуд – рельсовый проводник» привела к образованию выточки на шейке проводника, дальнейшая работа подъема без замены пролетов изношенных проводников должна проводиться только после специальных обследований с определением параметров напряженно-деформированного состояния армировки с учетом фактических боковых эксплуатационных нагрузок.

#### Список литературы

1. Единые правила безопасности при разработке рудных, нерудных и россыпных месторождений подземным способом. – М.: Недра: 1977. – 223 с.
2. Справочник по сопротивлению материалов. // Г.С. Писаренко, А.П. Яковлев, В.В. Матвеев / Наукова Думка. Киев. – 1975. – 704 с.
3. Методика расчета жестких армировок вертикальных стволов шахт. – Донецк.: НИИГМ им. М.М.Федорова, 1994. – 145 с.

*Рекомендовано до публікації д.т.н. Самусею В.І.  
Надійшла до редакції 17.03.2015*

УДК 621.85.01

© Н.А. Лубенец

### **СКОЛЬЖЕНИЕ ОБЪЕМНОГО ГИБКОГО ТЕЛА ПО БЛОКУ**

Впервые обоснована модель реального объемного гибкого тела и выведены результаты решения классической задачи Эйлера о скольжении гибкого тела по неподвижному блоку.

Вперше обґрунтована модель реального об'ємного гнучкого тіла і виведені результати розв'язання класичної задачі Ейлера про ковзання гнучкого тіла по нерухомому блоці.

First sound model of the real volume of the flexible body and displays the results of the classical solutions of the Euler problem of slip flexible body on the fixed block.

Исследователями предпринимались многие попытки установить влияние геометрических размеров гибкого тела на реализацию тягового усилия при трении по блоку [1]. Однако они не дали положительного результата. В реализации тягового усилия общепризнанным является решение задачи о скольжении идеального гибкого тела по неподвижному блоку Эйлера (закон трения гибких тел Эйлера,