

УДК 622.28

*Бабюк Г.В., д.т.н., проф., Леонов А.А., к.т.н., доц., Замаев Р.В., студ. гр. ГС-08-м,
Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Украина*

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УЗЛОВ ПОДАТЛИВОСТИ РАСПОРНО-ПОДАТЛИВОЙ КРЕПИ С ВКЛАДЫШАМИ

Одной из актуальных проблем угольной отрасли является поддержание подготовительных выработок при интенсивном проявлении горного давления. На данный момент параметры крепи (сечение выработки, сопротивление в податливом режиме, тип спецпрофиля, плотность установки рам, число узлов и конструктивная податливость) назначаются на стадии проектирования выработки, а, корректировать их в процессе её эксплуатации невозможно. Поэтому при изменении геомеханической ситуации крепь деформируется, а выработку приходится ремонтировать.

Цель работы состояла в обосновании параметров распорно-податливой крепи путем теоретических исследований устойчивости деформируемых систем.

На рис. 1 представлена предлагаемая конструкция крепи [1]. Данная крепь оснащена распорно-податливыми узлами, которые позволяют регулировать параметры крепи при эксплуатации выработки. В состав узлов входят регулировочные вкладыши повышенного сопротивления, которые деформируются вследствие потери устойчивости. Параметры работы крепи регулируются за счет изменения формы, длины и момента сопротивления вкладышей в узлах податливости. Для предупреждения работы крепи в нежелательных режимах при эксплуатации выработки периодически контролируют процесс деформирования вкладышей. Для этого в выработке оборудуют специальные наблюдательные пункты, которые состоят из вкладышей и измерительных устройств. Их монтируют в узлах податливости в местенумерации пикетов через 10-20 м для автоматизированного измерения податливости узлов и прогиба вкладыша. Данные о состоянии вкладыша передаются по каналам связи на пункт принятия информации на поверхности шахты. По полученной информации определяют усилия сопротивления узла податливости в данный момент, оценивают взаимосвязь деформаций разрушенных вокруг выработки пород со смещениями арки крепи, диагностируют форму проявления горного давления и, если ситуация становится критической, принимают решения по управлению состоянием крепи и пород в зоне неупругих деформаций путем замены деформированных вкладышей на новые и силового распора арки с помощью гидроцилиндров, монтируя их непосредственно на раме. Управление гидроцилиндрами осуществляется передвижными насосными гидравлическими станциями, например, НЕР-300.

Для обоснования параметров предлагаемой крепи проведены теоретические исследования предельной сжимающей нагрузки для вкладышей. Согласно существующим подходам к анализу деформируемых систем [2] под действием сжимающей силы $P > P_{кр}$ (где $P_{кр}$ – некоторое критическое значение) во вкладыше, рассматриваемом как упругий стержень, возникают изгибающие моменты, линейная зависимость между нагрузками и деформациями нарушается и наблюдается сильное нарастание прогибов при малом увеличении сжимающей силы. Это явление называется продольным изгибом. Переход в критическое состояние, как правило, сопровождается потерей устойчивости.

Впервые задача определения критической силы для центрально сжатого стержня была решена Л. Эйлером (1774 г.). Критической силой по Эйлеру называется наименьшее значение сжимающей силы, приложенной к прямолинейному стержню, при котором наблюдается изгиб стержня. Величину критической силы определяют по формуле:

$$P_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{(\mu \cdot l)^2} \quad (1)$$

где E – модуль упругости материала, из которого изготовлен вкладыш; J_{\min} – минимальный момент инерции вкладыша; l – длина вкладыша; μ – коэффициент приведения длины, зависящий от способа закрепления вкладыша.

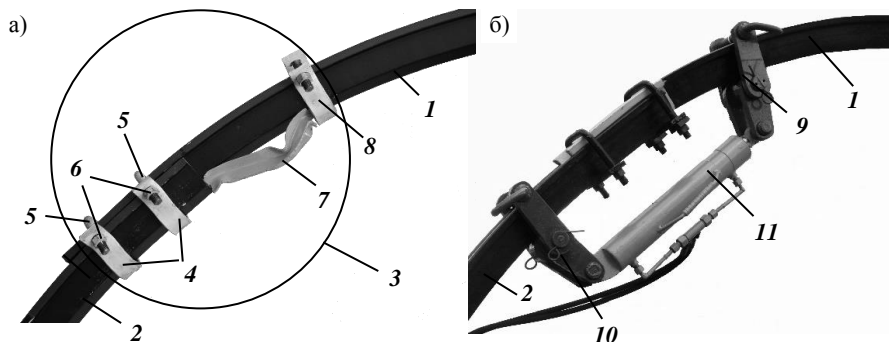


Рисунок 1 – Общий вид распорно-податливого узла металлической крепи из спецпрофиля: а – с деформированным вкладышем таврового сечения; б – с установленным гидроцилиндром для распора арки и установки вкладыша

1 – верхняк; 2 – стойка; 3 – распорно-податливый узел; 4 – прижимная фигурная планка; 5 – скоба; 6 – гайка; 7 – вкладыш; 8 – съемный упор; 9, 10 – эксцентриквые захваты; 11 – гидроцилиндр

Формулой Эйлера не всегда можно пользоваться. При ее выводе использовалась гипотеза о линейно-упругом характере работы материала по закону Гука, который справедлив до тех пор, пока напряжения не превосходят предела пропорциональности.

Для того чтобы установить пределы применимости формулы Эйлера, определим критическое напряжение, т.е. напряжение, возникающее в поперечном сечении вкладыша при действии критической нагрузки,

$$\sigma_{кр} = \frac{P_{кр}}{A} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_{\min}}{(\mu \cdot l)^2 \cdot A} = \frac{\pi^2 \cdot E}{(\mu \cdot l / i)^2}, \quad (2)$$

где A – площадь поперечного сечения вкладыша; $i = \sqrt{J_{\min} / A}$ – наименьший радиус инерции поперечного сечения стержня.

Обозначим $\lambda = \mu \cdot l / i$. Величина λ называется гибкостью стержня, следовательно, критические напряжения равны

$$\sigma_{кр} = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}. \quad (3)$$

Приравняв критические напряжения пределу пропорциональности, получаем выражение для предельного значения гибкости

$$\lambda'_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{ny}}}, \quad (4)$$

где σ_{ny} – предел пропорциональности материала.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать следующий вывод. Для вкладышей, обладающих гибкостью $\lambda > \lambda'_0$, величина предельной сжимающей нагрузки должна определяться по формуле Эйлера. Если же $\lambda < \lambda'_0$, то формулой Эйлера пользоваться нельзя. Для низкоуглеродистых сталей $\sigma_{ny} = 200$ МПа и $E = 2,0 \cdot 10^5$ МПа

$$\lambda'_0 = \sqrt{\frac{\pi^2 \cdot E}{\sigma_{ny}}} = \sqrt{\frac{3,14^2 \cdot 2 \cdot 10^{11}}{200 \cdot 10^6}} = 99,3 \approx 100.$$

Если стержень работает за пределами линейно упругих деформаций критическую силу необходимо вычислять по формуле Тетмайера–Ясинского. На основе аппроксимации большого числа экспериментальных данных Ф.С. Ясинский предложил следующую эмпирическую формулу для определения критических напряжений:

$$\sigma_{кр} = a - b \cdot \lambda, \quad (5)$$

где a и b – коэффициенты, зависящие от материала стержня.

Для низкоуглеродистых сталей $a = 310$ МПа, $b = 1,14$ МПа.

Необходимо отметить, что при малой гибкости стержня вместо потери устойчивости достигается опасное состояние материала, из которого изготовлен стержень, и формулой Ясинского пользоваться нельзя. В низкоуглеродистых сталях опасное состояние материала соответствует появлению пластических деформаций. Следовательно, формула Ясинского применима, если выполняется следующее условие $\sigma_{кр} < \sigma_m$. Тогда, принимая $\sigma_m = 240$ МПа, определим предельное значение гибкости:

$$\lambda''_0 = \frac{a - \sigma_m}{b} = 61,4.$$

Исследование зависимости предельной сжимающей нагрузки вкладышей от влияющих факторов (способа закрепления, длины, формы и размеров поперечного сечения) производилось с использованием программного пакета Maple [3]. Расчеты проведены для вкладышей в форме составного тавра, швеллера и составного прямоугольного поперечного сечения. Исследования показали, что несущая способность вкладышей изменяется в довольно широких пределах: от 2 кН (для вкладыша прямоугольного сечения 4×50 мм длиной 500 мм) до 276 кН (для вкладыша из швеллера №8 длиной 50 мм).

В качестве примера на рис.2 представлены зависимости изменения несущей способности вкладышей для различных видов закреплений и форм поперечного сечения.

Из анализа рисунка следует, что для всех форм поперечного сечения вкладыша и во всем диапазоне изменения параметров (за исключением прямоугольного вкладыша длиной $l = 50$ см при шарнирном его закреплении) справедливой является формула Ф.С. Ясинского

(5). Расчеты с использованием этой формулы свидетельствуют, что, независимо от формы сечения вкладышей, наибольшая их несущая способность достигается при двух заземленных концах ($\mu=0,5$) и минимальной длине. По мере роста длины вкладышей критическая сила уменьшается, причем максимальное снижение достигается при шарнирном закреплении их концов, то есть при значении коэффициента приведения длины стержня $\mu=1$. Снижение несущей способности вкладышей с прямоугольной формой поперечного сечения происходит более стремительно, чем для вкладышей в форме тавра и швеллера. Следует заметить, что критическая сжимающая нагрузка для вкладыша должна ограничиваться предельной несущей способностью профиля крепи, определяемой из условия образования пластического шарнира в самом нагруженном сечении.

Таким образом, для управления сопротивлением крепи в податливом режиме и приближения его к несущей способности крепи следует применять вкладыши в виде

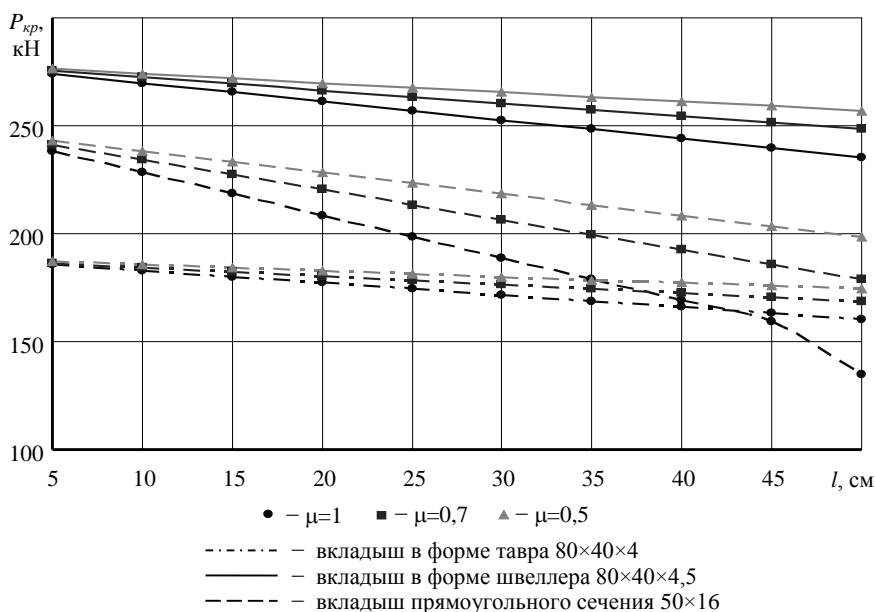


Рисунок 2 – Зависимости изменения предельной несущей способности вкладышей для различных видов закреплений и форм поперечного сечения

швеллера или тавра, изготовленного из двух уголков. Для более точного определения параметров вкладыша необходимо решить задачу о деформировании стержня при нагрузках превышающих критические с учетом сближения концов стержня, реальной величины прогиба, углов поворота на краях стержня и пластической стадии работы материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 63550 Україна, МПК9 Е 21 D 11/14. Адаптивне розпірно-піддатливе кріплення / Бабиюк Г.В., Леонов А.О. (Україна); заявник і патентовласник Донбас. держ. техн. ун-т. – №и 20110376, заявл. 25.03.2011; опубл. 10.10.2011, Бюл. №19.
2. Беляев Н.М. Сопротивление материалов / Н.М. Беляев. – М.: Главная редакция физико-математической литературы изд-ва «Наука», 1976. – 608с.
3. Кирсанов М.Н. Maple и Maple / М.Н. Кирсанов. – Решения задач механики: Учебное пособие. – СПб.: Издательство «Лань», 2012. – 512с.