

Аналитическое исследование взаимодействия анкера фрикционным способом закрепления

Зубков Антон Анатольевич¹ zubkov69@yandex.ru
Кутлубаев Ильдар Мухаметович²⁽¹⁾ ptmr74@mail.ru
Самигулин Вадим Айратович² vad.samigullin@yandex.ru

Туркин Иван Сергеевич¹ turkin@uer74.ru
¹ ООО «УралЭнергоРесурс», Магнитогорск, Россия
² МГТУ им. Г.И. Носова, Магнитогорск, Россия

Аннотация. На основании выполненного анализа существующих анкеров с фрикционным способом закрепления предложена новая конструкция. За счет введения в головную часть вставки из материала с модулем упругости меньшим, чем у стержня анкера, обеспечивается перераспределение нагружения по его длине и увеличение несущей способности. Разработана методика расчета несущей способности. Принятая схема деформированного состояния стержня анкера подтверждена натурными испытаниями на природном блоке. Выполненные опытно-промышленные испытания в шахте подтвердили возможность увеличения несущей способности более чем в два раза по сравнению с традиционной конструкцией анкера.

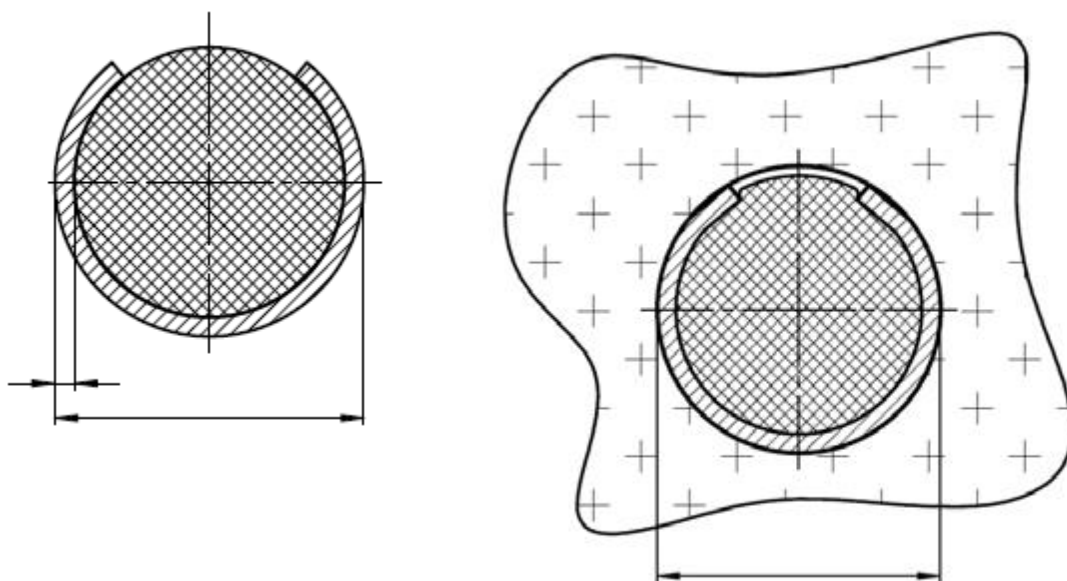
Ключевые слова: анкер с фрикционным закреплением, модуль упругости, несущая способность, методика расчета, схема нагружения, опытно-промышленные испытания

Введение. Истощение запасов полезных ископаемых на доступных горизонтах ведет к увеличению добычи на большой глубине [1, 2]. На рудных месторождениях используется преимущественно анкерный способ крепления [3]. Фрикционный анкер представляет собой полый цилиндрический стержень с продольным пазом по всей длине. Внешний диаметр стержня превышает диаметр шпура на 3–4 мм. Анкер с фрикционным способом закрепления имеет по сравнению с другими типами меньшую несущую способность [5]. В связи с этим актуальной является задача повышения их несущей способности.

Материалы и методы. Несущая способность анкера с фрикционным закреплением обеспечивается силой трения, создаваемой упругодеформированным стержнем. Ее величина в поперечном сечении стержня распределяется неравномерно [6].

Увеличение несущей способности может быть достигнуто за счет сопряжения стержня и стенок шпура по всему периметру. В соответствии с патентом РФ № 220177 в головную часть стержня вводится вставка из материала с модулем упругости меньше, чем у стержня. При этом изменяется механизм взаимодействия стержня и шпура.

Результаты. Поперечное сечение головного участка стержня представлено на рис. 1.



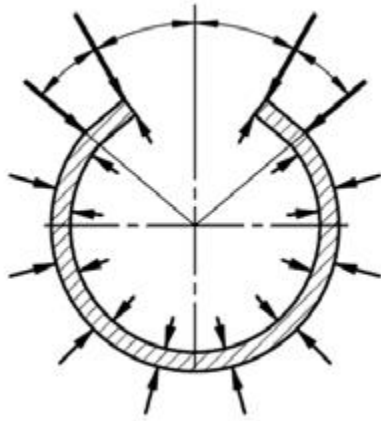


Рис. 1. Сечение стержня:

a — до установки в шпур; *b* — после установки в шпур; *в* — схема нагружения

В точках *A* и *A1* действуют сосредоточенные силы RA и $RA1$. На поверхности распределенные нагрузки: на внешней — Q , на внутренней — q .

Исходные параметры:

$d_{ш}$ — диаметр шпура;

$d_{ст}$ — диаметр стержня;

$E_{вс}$ — модуль упругости вставки;

$H_{вс}$ — длина вставки;

t — толщина стенки стержня;

$d_{вс}$ — диаметр вставки.

Нагрузочная способность стержня определяется как

$$F_{ш} = (Q \cdot l_{п} + 2 RA) \cdot H_{вс} \cdot f_{тр},$$

где $l_{п}$ — длина линии сопряжения стержня и шпура, мм; $f_{тр}$ — коэффициент трения покоя стержень — шпур; неизвестными являются: q , Q , RA .

Распределенная нагрузка q определяется из условия упругой деформации вставки:

$$q = E_{вс} [d_{вс} - (d_{ш} - 2t)] / d_{вс}.$$

На участке ББ1 постоянная кривизна, что возможно при неизменном изгибающем моменте:

$$M_{ББ1} = E \cdot J_{xx} \cdot \rho l,$$

где E — модуль упругости стержня; J_{xx} — момент инерции сечения стержня:

$$J_{xx} = l \cdot t^3 / 12;$$

ρl — изменение кривизны на участке ББ1:

$$\rho l = 2 (d_{ст} - d_{ш}) / (d_{ст} \cdot d_{ш}).$$

В произвольном сечении на участке ББ1 момент определяется следующим выражением:

$$M_{ББ1} = 0,5 RA \cdot d_{ш} \cdot s \cdot s + 0,125 Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \sin^2(\alpha - \gamma) + 0,125 Q \cdot d_{ш}^2 [1 - \cos(\alpha - \gamma)]^2 - 0,125 q \cdot d_{вс}^2 \cdot \sin^2 \alpha - 0,125 q \cdot d_{вс}^2 \cdot (1 - \cos \alpha)^2. \quad (1)$$

Преобразовав выражения (1) имеем:

$$M_{ББ1} = \sin \alpha (0,5 RA \cdot d_{ш} - 0,25 Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \sin \gamma + 0,25 q \cdot d_{вс}^2 \cdot \sin \gamma) - \cos \alpha (0,25 Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \cos \gamma - 0,5 q \cdot d_{вс}^2 \cdot \cos \gamma) + (0,25 Q \cdot d_{ш}^2 - 0,25 q \cdot d_{вс}^2). \quad (2)$$

Значение момента $M_{ББ1}$ постоянно, если первое и второе слагаемые равны нулю, то

$$RA \cdot d_{ш} - 0,5 Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \sin \gamma + 0,5 q \cdot d_{вс}^2 \cdot \sin \gamma = 0; \quad (3) \quad 0,5 Q \cdot d_{ш}^2 \cdot \cos \gamma - q \cdot d_{вс}^2 \cdot \cos \gamma = 0.$$

Из третьего слагаемого определяется величина Q :

$$Q = (4 M_{ББ1} + q \cdot d_{вс}^2) / d_{ш}^2.$$

В уравнении (2) две неизвестные: γ , RA . Силы RA и $RA1$ действуют в пределах площадок в виде распределенной нагрузки с протяженностью зависящей от прочности породы $\sigma_{сж}$:

$$RA / [l \cdot (\tau - 0,5 d_{ш})] \leq \sigma_{сж}.$$

Исходя из этого можно записать

$$RA = \sigma_{сж} \cdot l \cdot (\tau - 0,5 d_{ш}).$$

Изгибающий момент:

$$M_{ББ1} = \sigma_{сж} \cdot l \cdot (\tau - 0,5 d_{ш}) \cdot [0,5 d_{ш} \cdot \sin(\gamma - 0,5 \tau)] -$$

$$-(0,5 d_{вс} \cdot \gamma \cdot q) \cdot (0,5 d_{вс} \sin \gamma / 2). \quad (4)$$

Неизвестные углы τ и γ определяются из совместного решения уравнений (3) и (4).

Экспериментальные исследования. Для подтверждения принятой модели выполнены исследования на мраморном блоке (рис. 2). Анкер с $d_{ст} = 48$ мм и длиной 400 мм устанавливался в шпур с $d_{ш} = 45$ мм. В анкере помещалась трубка из ПВХ длиной 200 мм.

Несущая способность составила 34 кН.



Принятая схема взаимодействия стержня и вставки подтвердилась. В условиях ООО «ЕвроХим-ВолгаКалий» проведены испытания шести анкеров длиной 1850 мм, $d_{ст} = 48$ мм. Вставка — трубка ПВХ 300 мм. Шпур с $d_{ш} = 45$ мм. Несущая способность составила 84–91 кН. Несущая способность контрольных анкеров составила 32–39 кН.

Обсуждение полученных результатов. Разработана аналитическая модель расчета несущей способности. Экспериментальные исследования подтвердили принятую модель взаимодействия стержня и шпура. Проведенные испытания позволяют утверждать, что анкер

со вставкой обеспечивает увеличение несущей способности. Абсолютное значение, при креплении в соляных породах, превышает несущую способность традиционного анкера в 2,3–2,6 раза.

Заключение. Повышение несущей способности фрикционного анкера обеспечивается за счет введения в переднюю часть вставки из материала с модулем упругости меньше материала стержня. Аналитическая модель позволяет оценивать влияние каждого из параметров на его несущую способность. Анкер может быть рекомендован для закрепления поверхностей выработок с невысокой прочностью пород.

Список источников

- [1] Skrzypkowski K. et al. Adjustment of the yielding system of mechanical rock bolts for room and pillar mining method in stratified rock mass. *Energies*, 2020, vol. 13, no. 8, art. 2082.
- [2] Nguyen N.M., Pham D.T. Tendencies of mining technology development in relation to deep mines. *Gornye nauki i tekhnologii Mining Science and Technology*, 2019, vol. 4, no. 1, pp. 16–22.
- [3] Ghorbani M. et al. A critical review on the developments of rock support systems in high stress ground conditions. *International Journal of Mining Science and Technology*, 2020, vol. 30, no. 5, pp. 555–572.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2020.06.002>
- [4] Louchnikov V. Selecting an optimal ground support system for rockbursting conditions. *Proceedings of the Eighth International Conference on Deep and High Stress Mining*. Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2017, pp. 613–623.
https://doi.org/10.36487/ACG_rep/1704_41_Louchnikov
- [5] Zubkov A.A., Kutlubaev I.M., Muhamedjarova M.S. Calculation of Load-bearing Capacity of Tubular Anchor of Friction Type. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Institute of Physics Publishing, 2019, vol. 272, no. 2.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/272/2/022052>