

Необходимость и область применения нержавеющих анкеров

Б.Б. Луганцев¹, А.И. Чавкин¹✉, Ю.В. Турук², Э.Ю. Воронова², В.С. Исаков³

¹ ООО «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт», г. Шахты, Российская Федерация

² Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Шахты, Российская Федерация

³ Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

✉ Achavkin@mail.ru

Резюме: В процессе эксплуатации анкерной крепи иногда наблюдается коррозионный износ элементов анкеров с потерей несущей способности. Исследования, проведенные в выработках, закреплённых сталеполимерными анкерами, позволили определить закономерности коррозионного износа элементов анкерной крепи. Развитие коррозии элементов анкерной крепи наблюдается при их увлажнении. Вероятность обводнения пород кровли повышается при росте трещиноватости пород. Скорость коррозионного процесса возрастает со снижением водородного показателя воды pH. Анализ возможных способов предотвращения отказов анкерной крепи из-за коррозионного износа выявил, что наиболее экономичным из них является нанесение на элементы анкерной крепи антикоррозионных покрытий. Были разработаны технические требования к средствам антикоррозионной защиты металлической анкерной крепи, произведён выбор их среди поставляемых на рынок Российской Федерации антикоррозионных средств и проведены их шахтные испытания в наиболее агрессивной шахтной среде. По результатам шахтных испытаний было выявлено одно антикоррозионное средство, успешно прошедшее испытания. Созданное им антикоррозионное покрытие не разрушилось, коррозионного разрушения элементов анкерной крепи не наблюдалось. По результатам испытаний был сделан вывод о том, что это антикоррозионное покрытие может предотвращать потерю работоспособности анкерной крепи. Область применения нержавеющих анкеров – это выработки с длительными сроками службы анкерной крепи при увлажнении кровли водой с $\text{pH} < 7$. Экономический эффект от применения анкеров с антикоррозионным покрытием составил бы 6,6 млн руб/км. В среднем только 4,2% анкеров, поставляемых на шахты, должны иметь антикоррозионное покрытие. Прогнозирование необходимости применения нержавеющих анкеров до проходки выработки, позволит заблаговременно определять необходимый объём их закупки.

Ключевые слова: нержавеющие анкера, коррозионный износ, скорость коррозии, трещиноватость пород, обводнёность, показатель pH, антикоррозионное покрытие

Для цитирования: Луганцев Б.Б., Чавкин А.И., Турук Ю.В., Воронова Э.Ю., Исаков В.С. Необходимость и область применения нержавеющих анкеров. *Горная промышленность*. 2024;(1):94–98. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-94-98>

The need for and scope of application of stainless steel rock bolts

B.B. Lugancev¹, A.I. Chavkin¹✉, Ju.V. Turuk², E.Yu. Voronova², V.S. Isakov³

¹ LLC Shakhty Research and design and engineering Coal Institute, Shakhty, Russian Federation

² Shakhty Institute (branch) of South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Shakhty, Russian Federation

³ South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novochoerkassk, Russian Federation

✉ Achavkin@mail.ru

Abstract: Corrosion wear of the rock bolt elements with loss of their bearing capacity is sometimes observed in operation of the rock bolt support. Studies carried out in the mine workings secured with resin grouted rebar bolts allowed us to determine the patterns of corrosion wear of the rock bolt elements and measures to prevent it. Development of the rock bolt element corrosion is observed when they are moistened. The probability of free water content in the roof rocks increases with the growth of rock fracturing. The rate of the corrosion process increases with a decrease in the hydrogen index of water. Analysis

of possible ways to prevent rock bolt support failures caused by the corrosion wear revealed that the most economical of them is the application of anti-corrosion coatings on the rock bolt support elements. Technical requirements were developed for the means of anti-corrosion protection of the metal rock bolt supports, they were selected among the anti-corrosion means available in the market of the Russian Federation, and their mine tests were carried out as the anti-corrosion coatings of the rock bolts in the most aggressive mine environment. According to the results of the mine tests, one anti-corrosion medium was identified that successfully passed the tests. The anti-corrosion coating created with this medium did not fail, corrosion failure of the rock bolt support elements was not observed. According to the test results, it was concluded that the anti-corrosion coating can prevent the failure of the rock bolt support operation. The field of application for stainless rock bolts is mine workings with long service life of the rock bolt support when the roof rocks are saturated water which $\text{pH} < 7$. The economic effect of using the rock bolts with anti-corrosion coating would amount to 6.6 million rubles/km. On average, only 4.2% of the rock bolts supplied to mines should have an anti-corrosion coating. It is possible to predict the need for the use of stainless rock bolts before driving the mine working, which will allow determining the necessary volume of their purchase in advance.

Keywords: stainless steel rock bolt, corrosion wear, corrosion rate, rock fracturing, water cut, pH, anti-corrosion coating

For citation: Lugancev B.B., Chavkin A.I., Turuk Ju.V., Voronova E.Yu., Isakov V.S. The need for and scope of application of stainless steel rock bolts. *Russian Mining Industry*. 2024;(1):94–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2024-1-94-98>

Введение

В процессе эксплуатации анкерной крепи иногда наблюдается коррозионный износ элементов анкеров с потерей несущей способности. Поэтому «Инструкцией по расчёту и применению анкерной крепи на угольных шахтах» предусмотрено по истечении пяти лет эксплуатации анкерной крепи производить исследовательские работы с целью определения её работоспособности.

По результатам обследования составляется акт о состоянии выработки, в котором в случае необходимости указываются меры по приведению выработки в безопасное состояние. Такой мерой может быть перекрепление выработки из-за массовых отказов анкеров в результате коррозионного износа их элементов.

В связи с этим актуальной задачей является определение области применения нержавеющей анкеров, обеспечивающих работоспособность анкерной крепи в течение всего срока поддержания выработки в условиях активно действующих коррозионных факторов.

Закономерности коррозионного износа элементов анкерной крепи

Специалистами ООО «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ШахтНИУИ) было обследовано 49 выработок со сталеполимерной анкерной крепью суммарной протяжённостью 42019 м. Исследования позволили определить закономерности коррозионного износа элементов анкерной крепи.

Развитие коррозии элементов анкерной крепи наблюдается при их увлажнении с водородным показателем $\text{pH} < 7$. Скорость коррозионного процесса возрастает со снижением водородного показателя воды pH [1].

В кровле обследованных выработок залегали преимущественно песчаные сланцы, реже – песчано-глинистые сланцы. Иногда встречались песчаники и глинистые сланцы. Основной кровлей, как правило, являлся мощный слой песчаника или крепкого песчаного сланца, расстояние до которых от кровли выработки изменялось в широких пределах.

На одной из шахт были проведены наблюдения за расслоением пород кровли горных выработок с фиксацией количества трещин расслоения, величины раскрытия трещин и высоты зоны расслоения в шпурах длиной до 3,5 м, пробуренных примерно посередине выработки с шагом 30 м. Одновременно отмечалась степень обводнённости пород кровли. Массив исходной информации был обработан с целью определения зависимости обводнённости от параметров расслоения заанкерowanych пород кровли.

Было установлено, что обводнённость пород слабо зависит от высоты зоны расслоения (коэффициент корреляции 0,49). Зависимость обводнённости от суммарной величины раскрытия трещин является средней (коэффициент корреляции 0,63). Сильно зависит обводнённость от количества трещин расслоения (коэффициент корреляции 0,80). Видимо, этот параметр характеризует общую трещиноватость пород, залегающих в кровле пласта на данном участке выработки.

Из 49 выработок с длительными сроками службы анкерной крепи на угольных шахтах Российского Донбасса только в восьми (16,3%) потребовалось выполнение мероприятий по обеспечению поддержания кровли выработки:

- 1) в условиях относительно устойчивой кровли – установка новой сталеполимерной крепи – 1529 м (87,7%);
- 2) когда наблюдались вывалы пород, навесы, заколы – установка рамной металлической крепи – 55 м (3,1%);
- 3) при сохранении достаточной несущей способности анкера на момент обследования, когда по прогнозу остаточный срок его службы меньше остаточного срока службы выработки, – нанесение битумной мастики на выступающие в выработку элементы анкерной крепи – 160 м (9,2%).

Суммарная протяжённость проблемных участков выработок (1744 м) составила всего 4,2% от суммарной протяжённости выработок с длительными сроками службы анкерной сталеполимерной крепи и 11,4% от суммарной протяжённости участков этих выработок с обводнённой кровлей.

На одной из шахт доля выработок с длительными сроками эксплуатации, в которых потребовалось усиление анкерной крепи из-за высокого коррозионного износа, на-

много больше средних показателей и составляет 50% от их числа и 35,4% от их протяжённости. Это вызвано низким водородным показателем воды pH = 3–5.

На другой же шахте при значительной обводнённости большинства выработок наблюдались низкие показатели коррозионного износа элементов анкерной крепи из-за нейтрального и слабощелочного значения водородного показателя воды (pH = 7–8). При щелочной воде на элементах анкерной крепи в отдельных выработках наблюдались плотные и прочные покрытия из угольно-породной пыли, защищающие анкеры от коррозионного разрушения. Когда в породах кровли присутствовали вкрапления серного колчедана, водородный показатель pH снижался. Но такие зоны в выработках шахты встречаются редко.

В распоряжении геолога угольной шахты имеется достаточно информации для того, чтобы прогнозировать возможность увлажнения пород кровли выработки водой с pH < 7.

Многочисленные исследования, выполненные в нашей стране [2; 3] и за рубежом [4–11], показали, что коррозионный процесс зависит от большого числа факторов, действие которых учесть и спрогнозировать с достаточной степенью достоверности невозможно. В связи с этим предотвращение коррозии анкеров обеспечило бы безремонтное поддержание выработок.

Выбор и шахтные испытания антикоррозионных средств

В ШахтНИУИ были разработаны технические требования к антикоррозионному покрытию анкерной металлической крепи:

- сохранять свои свойства при нагружении элементов анкерной крепи в процессе её эксплуатации до уровня расчётного сопротивления;
- наноситься на поверхность элементов анкерной крепи без трудоёмкой предварительной подготовки;

- наноситься простейшими способами;
- наноситься в один-два слоя;
- иметь время высыхания не более одних суток, полного отверждения – не более двух суток при естественной сушке;
- обеспечивать равномерное сплошное покрытие элементов анкерной крепи при толщине слоя 0,1–0,5 мм;
- обеспечивать хорошую адгезию к поверхностям элементов анкерной крепи;
- обладать эластичностью и высокой ударопрочностью;
- обладать высокой стойкостью к истиранию;
- быть водостойкими;
- обладать высокой укрывистостью (не менее 4 м²/л);
- обладать минимальной стоимостью.

Исходя из этих технических требований были выбраны и приняты к испытаниям девять антикоррозионных средств, доступных в Российской Федерации. Все они обладают высокой адгезией к стали, влагостойкостью, стойкостью в агрессивных средах, высокой прочностью, т.е. всеми определяющими требованиями к средствам антикоррозионной защиты элементов металлических анкерных крепей.

Шахтные испытания антикоррозионных средств проводились в течение четырёх лет на шахте, в выработках которой были зафиксированы максимальные для шахт Российского Донбасса скорости коррозии элементов анкерной крепи.

По результатам испытаний пригодным для создания антикоррозионных покрытий на элементах анкерной крепи было признано только одно антикоррозионное средство. Созданное им антикоррозионное покрытие не разрушилось, коррозионного разрушения элементов анкерной крепи не наблюдалось. В то же время средняя скорость коррозионного разрушения элементов анкерной крепи, не имеющих антикоррозионного покрытия, на участке испытаний составила: для опорного элемента (полосового подхвата) – 0,422 мм/год; для стержня – 0,667 мм/год.

Таблица 1
Стоимость материалов на перекрепление или крепление 1 м выработки

Table 1
The cost of materials for replacement or installation of mine support of 1 running m of the mine workings

Наименования вариантов и условий эксплуатации	Стоимость, руб.
<i>Базовый вариант (при сохранении устойчивости кровли)</i>	
– первоначальное крепление	7697
– дополнительное крепление	7697
Итого базовый вариант (при сохранении устойчивости кровли):	15394
<i>Базовый вариант (при обрушениях пород)</i>	
– первоначальное крепление	7697
– усиление рамной крепью	15742
Итого базовый вариант (при обрушениях пород):	23439
<i>Анкеры с антикоррозионным покрытием</i>	
– анкерная крепь без антикоррозионного покрытия	7697
– антикоррозионный материал без учёта затрат на его нанесение	1348
Итого анкеры с антикоррозионным покрытием:	9045
<i>Анкеры из нержавеющей стали</i>	
– анкерная крепь из стали 20X13	17707

По результатам шахтных испытаний был сделан вывод о том, что антикоррозионное покрытие может предотвратить потерю работоспособности анкерной крепи.

Оценка экономической эффективности применения нержавеющей анкеров

Нержавеющих анкеров два типа:

- 1) с антикоррозионным покрытием;
- 2) из нержавеющей стали.

Применение армополимерных и стеклопластиковых анкеров невозможно, потому что они, неплохо работая на растяжение [12], легко срезаются при небольших боковых усилиях, которые всегда имеют место при поддержании выработок для повторного использования.

Сравнение производилось с базовыми вариантами. Первый из них: при устойчивых породных обнажениях производится установка сталеполимерных анкеров с теми же параметрами, что и первоначально. Второй: при обрушениях пород кровли устанавливается рамная крепь КПС.

Расчёт экономической эффективности был выполнен на основе сопоставления расходов на крепёжные материалы для базовых вариантов и для вариантов с нержавеющей анкерами. Результаты расчёта приведены в таблице.

Расчёт производился для выработки шириной 5,3 м, закреплённой анкерами А20В длиной 2,2 м с шагом 0,9 м, количеством анкеров в ряду – 6 шт., с установкой под два металлических полосовых подхвата размерами 3100x100x8 мм и 2100x100x8 мм и закреплением в шпуре тремя ампулами: двумя АП-470 и одной АП-330У.

Считалось, что толщина антикоррозионного покрытия 500 мкм, расход – 0,5 л/м². Коэффициент перерасхода – 1,05. Расчёт производился для анкеров из нержавеющей стали.

Стоимость материалов приведена по состоянию на август 2023 г., представлена в табл. 1.

Стоимость анкеров из нержавеющей стали достаточно высока.

Экономический эффект от применения анкеров с антикоррозионным покрытием составил бы:

– вместо установки дополнительной анкерной крепи на длине 1529 м:

$$1529(15394 - 9045) \approx 9\,708\,000 \text{ руб.};$$

– вместо установки рамной крепи на длине 55 м:

$$55(23439 - 9045) \approx 792\,000 \text{ руб.}$$

Суммарный экономический эффект составил бы 10,5 млн руб., или 6,6 млн руб./км.

Определение необходимости применения нержавеющей анкеров должно производиться на основе прогноза гидрогеологических условий проведения выработки.

Выводы

1. Высокая скорость коррозионного износа анкеров наблюдается при увлажнении пород кровли водой с $\text{pH} < 7$.
2. Вероятность обводнения пород кровли повышается при росте трещиноватости пород.
3. Область применения нержавеющей анкеров – выработки с длительными сроками службы анкерной крепи при влажных породах кровли с $\text{pH} < 7$.
4. Экономический эффект от применения анкеров с антикоррозионным покрытием составил бы 6,6 млн. руб./км.
5. В среднем только 4,2% анкеров, поставляемых на шахты, должны иметь антикоррозионное покрытие.
6. Прогнозирование необходимости применения нержавеющей анкеров до проходки выработки позволит заблаговременно определять необходимый объём их закупки.

Список литературы / References

1. Чавкин А.И. Причины, динамика коррозионного износа и прогноз срока службы анкерной крепи в условиях коррозионно-активной среды. Уголь. 2004;(3):15–16. Chavkin A.I. Reasons, dynamics corrosion wearing and prognosis of longleaf anker support for saving of heading and tunneling. Ugol'. 2004;(3):15–16. (In Russ.)
2. Чавкин А.И. Обеспечение проектных сроков эксплуатации анкерных металлических крепей. Горный информационно-аналитический бюллетень. 2008;(12):327–332. Режим доступа: https://www.giab-online.ru/files/Data/2008/12/3_CHavkin.pdf (дата обращения: 03.12.2023). Chavkin A.I. Ensuring the design life of metal roof bolting supports. Mining Informational and Analytical Bulletin. 2008;(12):327–332. (In Russ.) Available at: https://www.giab-online.ru/files/Data/2008/12/3_CHavkin.pdf (accessed: 03.12.2023).
3. Федотов С.Д., Улыбин А.В., Шабров Н.Н. О методике определения коррозионного износа стальных конструкций. Инженерно-строительный журнал. 2013;(1):12–20. <https://doi.org/10.5862/MCE.36.2> Fedotov S.D., Ulybin A.V., Shabrov N.N. The methodology of determining the corrosion of steel structures. Magazine of Civil Engineering. 2013;(1):12–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.5862/MCE.36.2>
4. Mubarak G., Elkhodbia M., Gadala I., AlFantazi A., Barsoum I. Failure analysis, corrosion rate prediction, and integrity assessment of J55 downhole tubing in ultra-deep gas and condensate well. Engineering Failure Analysis. 2023;151:107381. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2023.107381>
5. Mohammed H.K., Jafar S.A., Humadi J.I., Sehgal S., Saxena K.K., Abdullah G.H., Saeed L.I., Salman M.S., Abdullah W.S. Investigation of carbon steel corrosion rate in different acidic environments. In: Materials Today: Proceedings. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.792>

6. De-León-Escobedo D. Risk-based maintenance time for oil and gas steel pipelines under corrosion including uncertainty on the corrosion rate and consequence-based target reliability. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*. 2023;203:104927. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2023.104927>
7. Andrade C. Steel corrosion rates in concrete in contact to sea water. *Cement and Concrete Research*. 2023;165:107085. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2022.107085>
8. Li A.-J., Wen H.-C., Batistuta V.H., Cheng S.-H. Influence of ground anchors corrosion and uncertainty strength parameters: A case study slope failure in northern Taiwan. *Soils and Foundations*. 2023;63(3):101316. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2023.101316>
9. Wang Y., Sun X., Ren A. Investigations of rock anchor corrosion and its influence factors by exhumations in four typical field sites. *Engineering Failure Analysis*. 2019;101:357–382. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2019.03.022>
10. Lin N., Zhang H., Zou J., Han P., Ma Y., Tang B. Improvements in Wear and Corrosion Resistance of RB400 Anchor Rod Steel by Electroless Ni-P Plating. *International Journal of Electrochemical Science*. 2015;10(1):356–372. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)04998-2](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)04998-2)
11. Chen Z., Jin Y., Yin X., Chen Y., Liu Y., Ying H., Yang W. Self-doped poly(aniline-co-metaniolic acid) copolymer coatings for enhancing the corrosion resistance of 304 stainless steel. *Thin Solid Films*. 2022;761:139524. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2022.139524>
12. Muciaccia G., Khorasani M., Mostofinejad D. Effect of different parameters on the performance of FRP anchors in combination with EBR-FRP strengthening systems: A review. *Construction and Building Materials*. 2022;354:129181. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129181>

Информация об авторах

Луганцев Борис Борисович – доктор технических наук, профессор, действительный член Академии горных наук, председатель совета директоров ООО «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИУИ»), г. Шахты, Российская Федерация

Чавкин Александр Иванович – кандидат технических наук, заведующий лабораторией ООО «Шахтинский научно-исследовательский и проектно-конструкторский угольный институт» (ООО «ШахтНИУИ»), г. Шахты, Российская Федерация; e-mail: Achavkin@mail.ru

Турок Юрий Владимирович – доктор технических наук, профессор, Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Шахты, Российская Федерация

Воронова Элеонора Юрьевна – доктор технических наук, доцент, заведующая кафедрой, Шахтинский институт (филиал) Южно-Российского государственного политехнического университета (НПИ) имени М.И. Платова, г. Шахты, Российская Федерация

Исаков Владимир Семёнович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова, г. Новочеркасск, Российская Федерация

Information about the authors

Boris B. Lugancev – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Full Member of Academy Mining Sciences, Chairman of the Board of Directors, LLC Shakhty Research and Design and Engineering Coal Institute (LLC Shakhtniui), Shakhty, Russian Federation

Aleksandr I. Chavkin – Cand. Sci. (Eng.), Head of Laboratory, LLC Shakhty Research and design and engineering Coal Institute (LLC Shakhtniui), Shakhty, Russian Federation; e-mail: Achavkin@mail.ru

Jurij V. Turuk – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Shakhty Institute (branch) of South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Shakhty, Russian Federation

Eleonora Yu. Voronova – Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor, Head of the Department, Shakhty Institute (branch) of South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Shakhty, Russian Federation

Vladimir S. Isakov – Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Department, South Russian State Polytechnic University (NPI) named after M.I. Platov, Novocherkassk, Russian Federation

Article info

Received: 25.11.2023

Revised: 11.01.2024

Accepted: 16.01.2024

Информация о статье

Поступила в редакцию: 25.11.2023

Поступила после рецензирования: 11.01.2024

Принята к публикации: 16.01.2024