

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ РАЗРАБОТКИ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

2024

№ 2

УДК 622.831.325

**ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ ВЫБРОСА УГЛЯ В ВЫРАБОТКАХ С ПОМОЩЬЮ
ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ АРОЧНОГО ТИПА**

Сяо Юнхуэй¹, Пань Ишань^{1,2}, Ли Юйвэй¹

¹*Ляонинский университет,*

E-mail: xiaoyonghui@lnu.edu.com, 110036, г. Ляонин, Китай

²*Ляонинский технический университет, 123000, г. Фусин, Китай*

Предложен метод предотвращения выброса угля на основе использования энергопоглощающей способности крепи. Спроектирована специальная энергопоглощающая гидравлическая горная крепь арочного типа для круговых и арочных выработок, состоящая из трех элементов и рассчитанная на некоторую пороговую нагрузку, при превышении которой крепь осуществляет смещение, соответствующее деформации породы, что сопровождается быстрым поглощением ударной энергии. Испытано два энергопоглощающих элемента и показано, что предел текучести односекционного противоударного элемента составляет 1840 кН, при сжатии его на 100 мм поглощается 180 кДж энергии. Средний предел текучести двухсекционного противоударного элемента составил 2460 кН, поглощение энергии при сжатии на 100 мм — 410 кДж. Оба элемента с общей энергопоглощающей способностью более 700 кДж использованы в энергопоглощающей гидравлической крепи арочного типа, установленной на действующей шахте.

Выброс угля, устойчивость выработки, энергопоглощающая гидравлическая крепь, предотвращение выброса угля

DOI: 10.15372/FTPRPI20240207

EDN: IJHBQX

Выброс угля — динамическое катастрофическое событие, характеризуемое внезапным повреждением породы вокруг выработки или угля в забое и сопровождающееся вибрацией и громким глухим шумом. Такие события способны привести к разрушению выработки, повреждению оборудования, а также к травмированию горнорабочих [1, 2]. Выброс угля в выработку — основное проявление динамических явлений на угольных шахтах Китая. Они составили 95 % от всех выбросов за прошедшие 20 лет [3–5].

Известно множество способов предотвращения выбросов угля, однако применение крепи как эффективный метод игнорировалось долгое время. Проблему выброса угля в выработку можно решить путем использования крепи. С ее помощью увеличивается усилие удержания пород от сжатия и повышается критическое внешнее напряжение, приводящее к выбросу угля.

Работа выполнена при поддержке Национального фонда естественных наук Китая (№ 52104087) и в рамках Национальной научно-исследовательской программы Китая (№ 2022YFC3004605).

Предложены теоретические обоснования применения крепи как энергетической опоры, комбинированной крепи, арочной крепи якорного типа, комбинированной крепи для критических участков, подтверждающие повышение устойчивости выработок [6–9]. В некоторых шахтах применяется крепь для повышения противовударной устойчивости выработок [10–12], в других установлены специально спроектированные мощные гидравлические крепи, обеспечивающие устойчивость выработки более 10 лет [13–15]. Способность крепи противостоять ударным нагрузкам крайне важна, так как при ее использовании риск выброса угля в выработку значительно сокращается.

В горном производстве использование мощной гидравлической крепи должно быть оправдано с финансовой и практической точек зрения. В настоящий момент удерживающая сила гидравлических крепей составляет 3000–6000 кН, их вес — 10–20 т. Во-первых, такие крепи крайне тяжело перемещать в шахте. Во-вторых, они могут противостоять только малой ударной энергии. При значительной динамической нагрузке происходит резкое увеличение локальных напряжений в крепи и при превышении критической прочности происходит разрушение всей конструкции гидравлической крепи [16, 17]. В угольной шахте в провинции Хэнань произошло два выброса угля, повлекшие за собой разрушение значительного количества гидравлических крепей. Такие события актуализируют вопросы: можно ли предотвратить выброс угля и следует ли повышать конструкционную прочность гидравлических крепей.

Известно, что выброс угля возникает из-за высвобождения большого количества энергии упругой деформации, накопленной в угольно-породном массиве в коротком промежутке времени, приводя к деформации или обрушению выработки [18–20]. Если гидравлическая крепь поглотит часть ударной энергии в случае выброса угля и обеспечит целостность своей конструкции, то она позволит удержать породу вокруг выработки от обрушения. В [10, 21] предложено устанавливать демпфирующие элементы в конструкцию крепи для быстрого поглощения ударной энергии и подавления колебаний после начала динамического явления, предотвращая полное разрушение выработки.

Цель настоящей работы — применение гидравлической крепи с энергопоглощающими элементами для обеспечения целостности и устойчивости выработок, а также предотвращения выброса угля.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КРЕПИ ДЛЯ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ ВЫБРОСА УГЛЯ

Путем упрощения конструкции крепи и идеализации окружающих выработку пород создана статическая модель работы крепи в условиях горного удара (рис. 1). Согласно [5]:

$$\frac{P_{cr}}{\sigma_c} = \frac{1}{m-1} \left\{ K \left[1 + \frac{1}{K} + \frac{1}{K}(m-1) \frac{p_s}{\sigma_c} \right]^{\frac{m+1}{2}} - K - 1 \right\},$$
$$m = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi},$$

где P_{cr} — критическое напряжение возникновения выброса угля; φ — внутренний угол трения окружающей породы; K — индекс энергии удара окружающей породы; σ_c — прочность на одностороннее сжатие; p_s — напряжение удержания выработки.

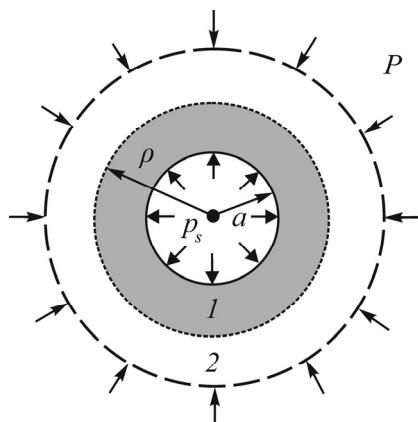


Рис. 1. Механическая модель распределения напряжений в окружающей породе при использовании крепи в условиях горного удара: 1 — зона размягчения; 2 — зона упругой деформации; P — внешнее напряжение; ρ , a — внутренний и внешний радиусы зоны размягчения

Критическое напряжение для обобщенных условий при $\varphi = 30^\circ$ равно

$$P_{cr} = \frac{\sigma_c}{2} \left(1 + \frac{1}{K} \right) \left(1 + \frac{4p_s}{\sigma_c} \right).$$

Условием возникновения горного удара является превышение внешнего сжатия P критического значения P_{cr} ($P \geq P_{cr}$). Прослеживается зависимость между каждым параметром и критическим напряжением выброса угля. Параметр p_s положительно соотносится с P_{cr} , т. е. повышение напряжения удержания выработки в 4 раза увеличивает критическое напряжение. Предотвращение выброса угля может осуществляться за счет увеличения напряжения удержания выработки системой крепи, даже если удаленное напряжение меньше критического.

Возникновение выброса угля сопровождается накоплением, высвобождением, передачей и преобразованием энергии. Часть энергии может высвободиться из зоны упругой деформации породы вокруг выработки, из трещин в кровле или подошве, а также в результате активности разлома. Часть ударной энергии поглощается окружающей породой, оставшаяся часть энергии доходит до опорных элементов выработки. Если энергия остается, произойдет разрушение массива и крепи, что приведет к выбросу угля (рис. 2) [22].

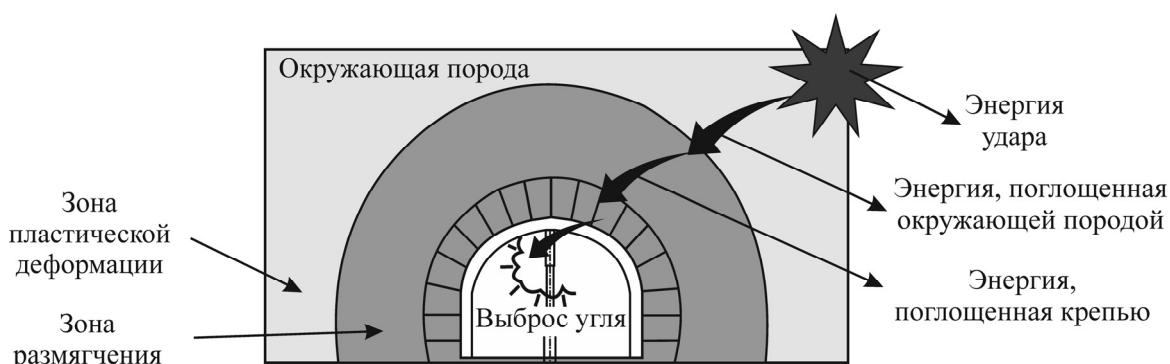


Рис. 2. Передача энергии к выработке и системе крепи

Энергетическое условие возникновения выброса угля имеет вид: $W_o - W_c - W_s > 0$, где W_o — энергия, достигшая область выработки; W_c — энергия, поглощенная окружающей породой; W_s — энергия, поглощенная крепью. Если энергия, поглощаемая окружающей породой и крепью, превышает энергию, достигшую области выработки ($W_o < W_c + W_s$), то для выброса угля энергии не остается. Горная крепь должна быть спроектирована как конструкция с энергопоглощающей способностью, а значит, содержать элементы, которые могут быстро поглотить ударную энергию и обеспечить устойчивость выработки.

ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩАЯ ГИДРАВЛИЧЕСКАЯ КРЕПЬ АРОЧНОГО ТИПА

На рис. 3 показана энергопоглощающая гидравлическая крепь арочного типа (ЭГК), разработанная для круговых выработок [23]. Ее конструкция включает в себя верхнюю арочную балку, закругленное основание и энергопоглощающие гидравлические стойки (рис. 3 a). Данные элементы формируют симметричную арочную конструкцию. Дуга верхней арочной балки, которая позволяет удерживать кровлю выработок, составляет $\pi / 2$. Элементы основания образуют единое целое за счет ограничивающего шарнирного соединения, эффективно предотвращающее вспучивание подошвы в области центральной колонны. Верхняя балка и основание соединены между собой энергопоглощающими гидравлическими стойками с совокупной силой удержания 4000 кН. В случае возникновения внезапной ударной нагрузки со стороны окружающей породы стойки способны быстро поглотить энергию, что позволяет избежать общую деформацию крепи. Энергопоглощающая способность крепи превышает 700 кДж.

Гидравлическая стойка выполняет энергопоглощающую и противоударную функции. Она состоит из гидроцилиндра, предохранительного клапана в сборе и энергопоглощающего элемента. Схема компонентов гидроцилиндра, состоящая из корпуса и подвижного штока, представлена (рис. 3 b). Корпус выполнен с входным и выходным отверстиями вверху и внизу цилиндра. В нижних отверстиях установлена система предохранительных клапанов с разным потоком, что позволяет спускать гидравлическую жидкость с разной скоростью и медленно смещать шток цилиндра. Энергопоглощающий элемент гибко соединен с нижней частью стойки и используется для быстрого поглощения энергии в случае достижения внешней ударной нагрузкой определенного значения, защищая стойку и крепь от повреждения.

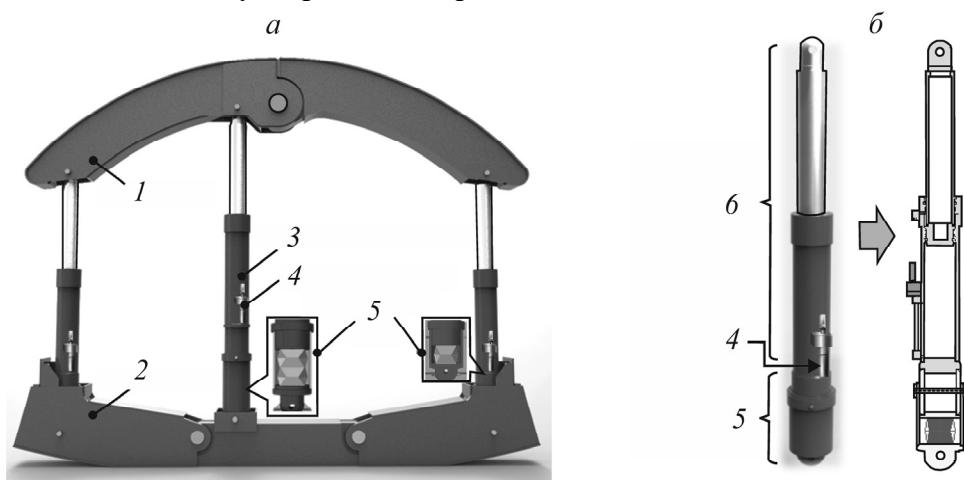


Рис. 3. Энергопоглощающая гидравлическая крепь арочного типа (a) и компоненты энергопоглощающей стойки (b): 1 — жесткая верхняя балка; 2 — противовспучивающее основание; 3 — противоударная гидравлическая стойка; 4 — система предохранительных клапанов; 5 — энергопоглощающее устройство; 6 — цилиндр

При ударном воздействии окружающей породы на традиционную крепь нагрузка резко достигает пикового значения, так как предохранительный клапан не успевает открыться или с открытием сброс жидкости происходит слишком медленно. Крепь в этом случае повреждается, ее несущая способность резко падает, приводя к разрушению выработки в результате ударной нагрузки. Крепи с энергопоглощающим элементом обладают некоторым защитным порогом. Если ударная нагрузка превышает значение такого порога, наблюдается равномерная пластическая деформация энергопоглощающего элемента до остановки смещения окружающей породы и происходит быстрое поглощение ударной энергии (рис. 4).

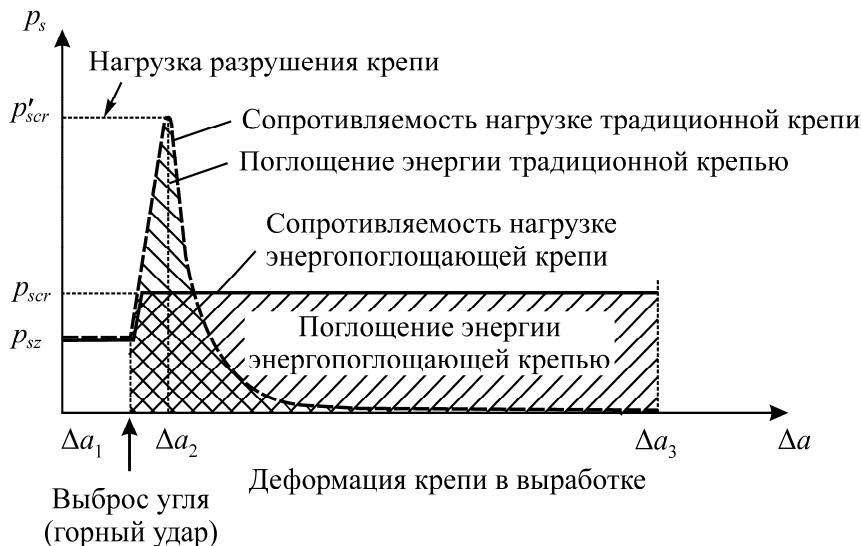


Рис. 4. Сравнение энергопоглощающей гидравлической крепи с традиционной

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩЕГО ЭЛЕМЕНТА

Для обеспечения безопасности энергопоглощающий элемент при деформировании должен поглотить энергию и снизить ударную нагрузку на крепь за десятки миллисекунд [24]. Характеристики эффективности энергопоглощающего элемента включают: точную силу деформации продольного изгиба; высокую сопротивляемость в заданном направлении; устойчивый характер деформации; высокую способность к поглощению энергии.

На рис. 5а показано энергопоглощающее устройство. При помощи фланцевой пластины направляющий стержень удерживается в корпусе, который предотвращает боковое сжатие энергопоглощающего элемента. Функция направляющего стержня — передача ударной нагрузки на энергопоглощающий элемент и его сжатие. Энергопоглощающий элемент — ключевая деталь рассматриваемого устройства. Он соединяется с основанием крепи шарообразным основанием. Энергопоглощающий элемент представляет собой тонкостенную квадратную металлическую трубу со специальным предварительным изгибом (рис. 5б). Предварительный изгиб при осевом сжатии позволяет получить ромбовидный (в форме бриллианта) характер деформации круглых труб и деформацию прогрессирующего изгиба квадратных труб [25]. При сжатии энергопоглощающий элемент испытывает или пластическую деформацию и при этом поглощает работу внешних сил, или ударную кинетическую энергию, преобразуя ее в рассеянную неупругую энергию. Механическое поведение можно описать как неравномерный продольный изгиб.



Рис. 5. Конструкция энергопоглощающего устройства (а) и характер деформации энергопоглощающего элемента (б)

Разработаны два типа энергопоглощающих элементов, которые испытывались на сжатие. Статическая нагрузка испытательной установки составляла 2000 кН, скорость сжатия — 10 мм/мин, динамическая нагрузка — 2000 кН, скорость сжатия при полной нагрузке — 10 м/с. Регистрация смещения, давления удара и гидравлического давления осуществлялась с частотой 2000 Гц. Деформация односекционного элемента установлена на отм. 100 мм, двухсекционного — на отм. 200 мм. Во время сжатия торцы элементов ограничивались плоскими стальными пластинами. Нагрузка и деформация энергопоглощающих элементов регистрировались на протяжении всего испытания. В ходе испытания проводилась фотосъемка образцов.

Общая форма деформации односекционных энергопоглощающих элементов относительно симметрична, максимальная деформация произошла по области сгиба (рис. 6). Видно, что все четыре испытанных элемента полностью деформировались со смещением внутрь четырех ребер верхнего торца, тогда как нижний торец остался недеформированным.

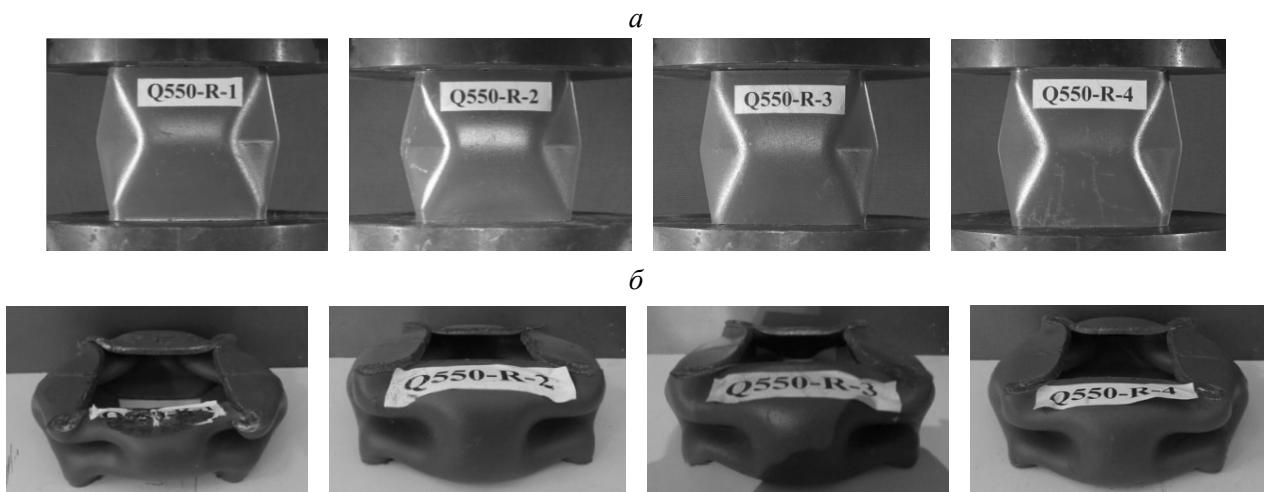


Рис. 6. Односекционный энергопоглощающий элемент (а) и морфология его разрушения (б)

В процессе сжатия односекционного энергопоглощающего элемента наблюдалось два типа деформации продольного изгиба: сначала деформировалась либо верхняя, либо нижняя половина элемента (рис. 7). Под воздействием квазистатического давления порядок деформации верхней или нижней половины определялся случайным образом. Форма деформации верхней и нижней половины становится несимметричной, фиксируется граница между половинами в виде своеобразного пояса.



Рис. 7. Продольный изгиб односекционного энергопоглощающего элемента

Односекционный энергопоглощающий элемент показал устойчивый процесс деформации и обладал хорошей формой изгиба (рис. 8). Средняя сопротивляемость смещению односекционного энергопоглощающего элемента составила 2202 кН, поглощение энергии — 162 кДж.

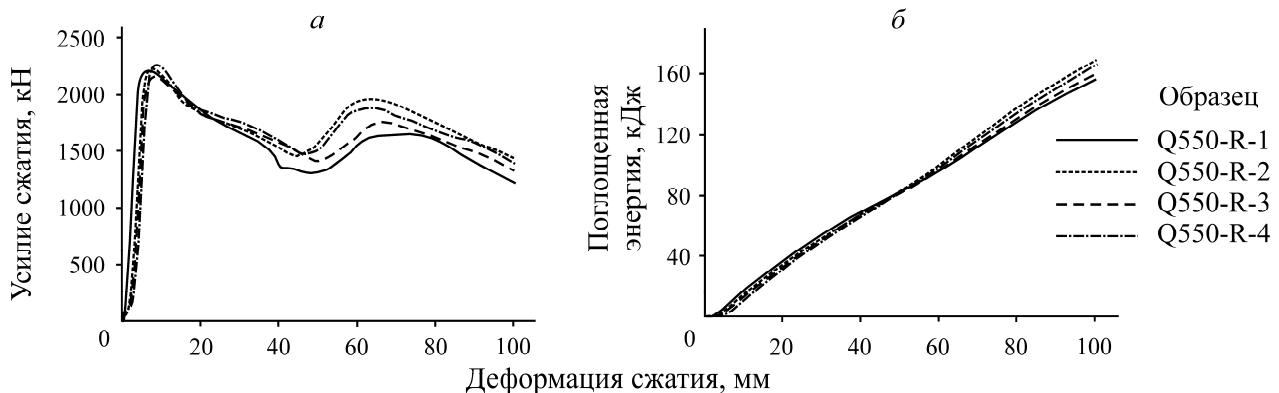


Рис. 8. Результаты испытаний односекционного энергопоглощающего элемента: соотношение усилия сжатия (а), поглощенной энергии (б) и деформации

Деформация двухсекционных энергопоглощающих элементов также имела симметричную форму (рис. 9). Четыре зоны деформации в виде ромба в каждой секции позволили достичь конструктивной цели предварительного сгибания. Сжатие двухсекционного элемента подобно односекционному: сначала деформируется верхняя половина, затем нижняя или наоборот. Порядок деформации при квазистатическом сжатии случайный.

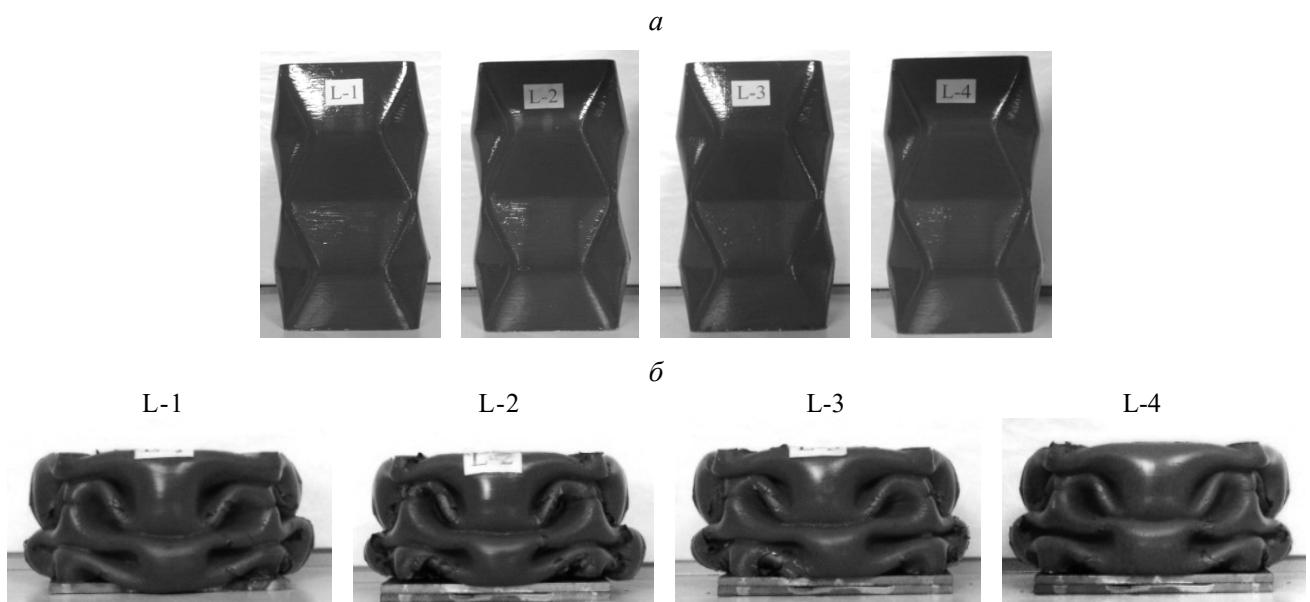


Рис. 9. Двухсекционный энергопоглощающий элемент (а) и морфология его разрушения (б)

Изгибающая сила для четырех образцов примерно одинакова (рис. 10). Средняя сопротивляемость деформации двухсекционного энергопоглощающего элемента составила 2667 кН, среднее поглощение энергии — 395 кДж. В соответствии с проектными требованиями, два односекционных и один двухсекционный противоударные энергопоглощающие компоненты могут обеспечить общее энергопоглощение в 719 кДж.

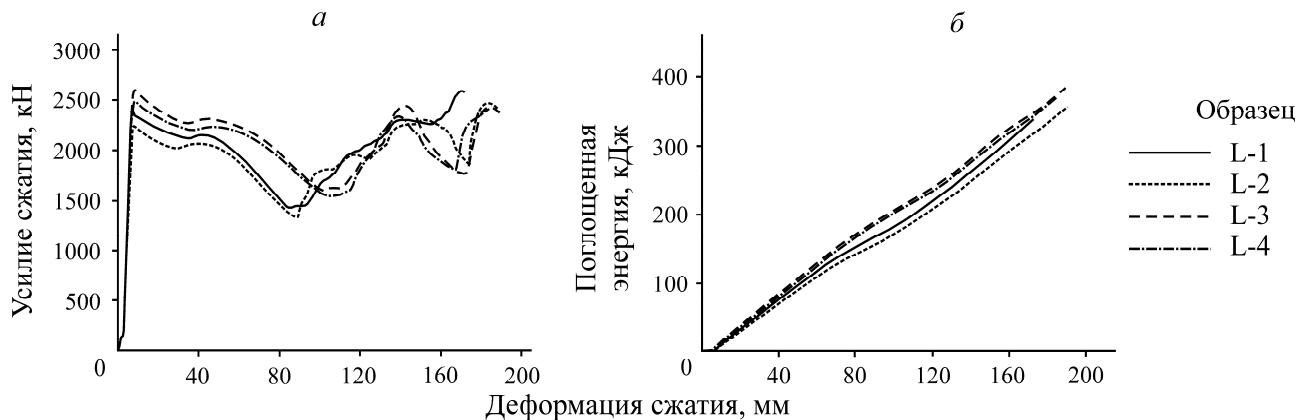


Рис. 10. Испытание двухсекционного энергопоглощающего элемента: соотношение усилия сжатия (а), поглощенной энергии (б) и деформации сжатия

ПОЛЕВОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПОРТАЛЬНОЙ ЭНЕРГОПОГЛОЩАЮЩЕЙ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ КРЕПИ

В соответствии с требованиями по размеру в поперечном разрезе и напряжения удержания в экспериментальной шахтной выработке разработана порталная энергопоглощающая гидравлическая крепь ZHDF4150/36/52 (рис. 11). Верхняя балка имеет кривизну $\pi / 2$ (радиус 3.6 м) и разделена на две симметричные части с ограничивающим шарнирным соединением посередине с внешним углом ограничения 0° . Основание имеет дугообразную форму с угловым размером $\pi / 6$, радиусом 10 м и разделено на три части с двумя ограничивающими шарнирными соединениями с внешним углом ограничения 0° . Верхняя балка и основание соединены тремя противоударными гидравлическими стойками. Средняя стойка отклонена от осевой линии на 0.4 м, расстояние от левой и правой стойки до центральной 2.72 и 1.82 м соответственно.

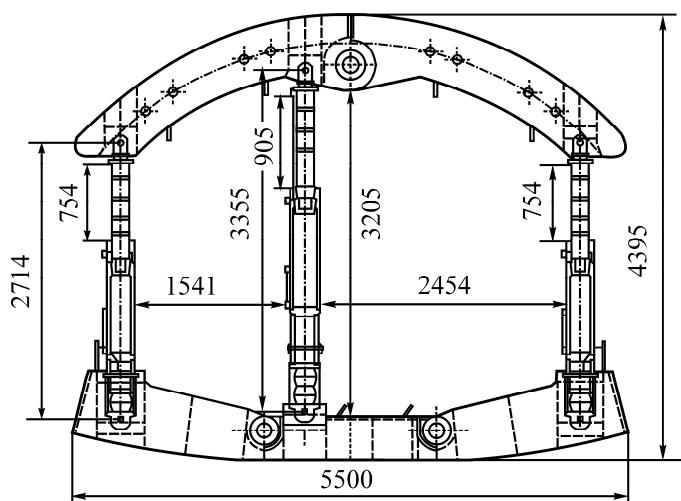


Рис. 11. Схема энергопоглощающей гидравлической крепи

Деформирование крепи моделировалось в программном обеспечении Abaqus с помощью метода конечных элементов (рис. 12).

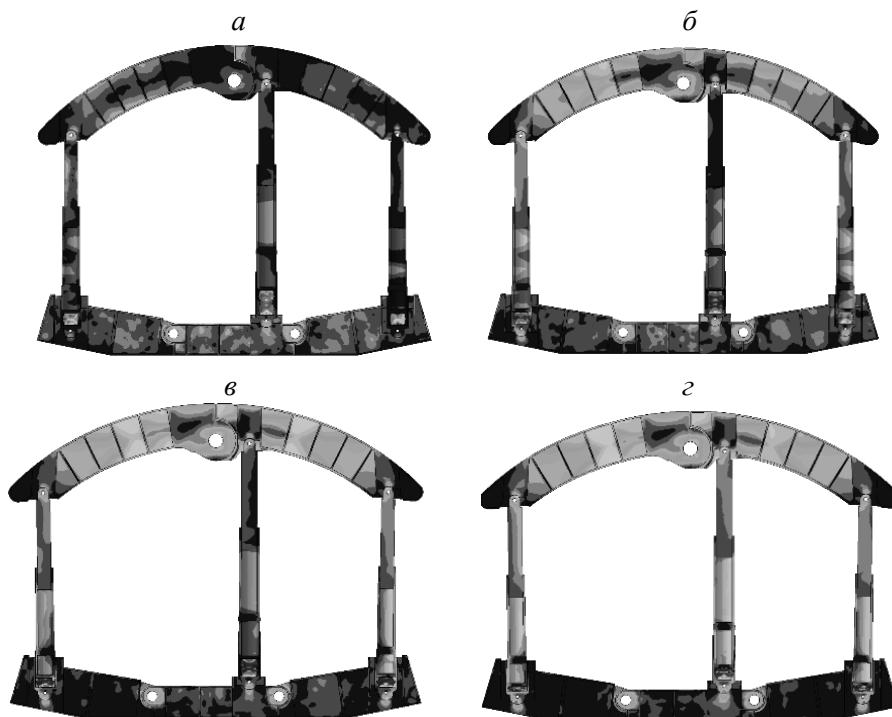


Рис. 12. Напряжение при продольном смещении верхней балки, мм: 20 (а), 50 (б), 100 (в), 200 (г)

Результаты экспериментов представлены на рис. 13. Сопротивляемость нагрузке резко увеличивается до отметки смещения 20 мм, происходит стадия упругой деформации. Сопротивляемость крепи смещению достигает 6000 кН, что в 1.5 раза больше рабочей сопротивляемости. Крепь продолжает деформироваться и переходит в стадию пластической деформации, напряжение энергопоглощающих элементов увеличивается и они деформируются; сопротивляемость крепи уменьшается, достигая наименьшего значения. После чего крепь переходит в стадию пластического сжатия, сопротивляемость крепи увеличивается и достигает максимального значения. Энергопоглощающие элементы вносят ожидаемый вклад в поглощение энергии, обеспечивая быстрое смещение крепи как единого целого и оказывая противоударный эффект.

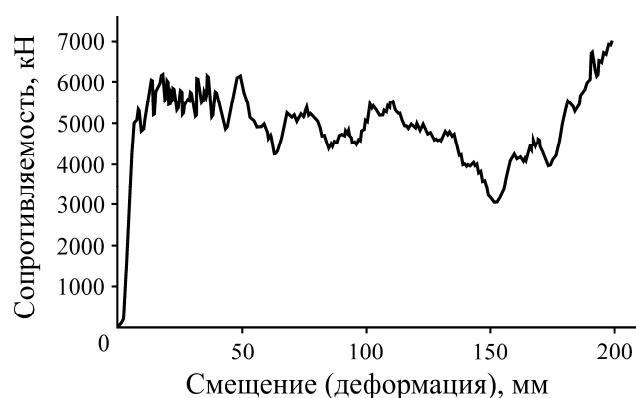


Рис. 13. Соотношение сопротивляемости смещению и деформации при ударном воздействии

После механического анализа и проверки прочностных свойств, а также получив подтверждение того, что каждая деталь отвечает проектировочным требованиям, сделан заказ на производство 50 крепей (рис. 14).



Рис. 14. Физическое исполнение крепей арочного типа (а) и их применение в подземной выработке (б)

В угольной выработке между отметками 40 и 260 м размещались порталные энергопоглощающие гидравлические крепи модели ZHDF4150/36/52. Расстояние между крепями 3 м. Они устанавливались совместно с традиционными гидравлическими крепями и находились между U-образными стальными рамами. Основание каждой крепи фиксировалось анкерами к подошве. На основаниях располагались рельсовые пути и конвейерные ленты. Для плотного крепления и надежного удержания кровли применялись деревянные вставки между верхней балкой и кровлей. Для предотвращения поперечных смещений верхние балки закреплялись анкерными кабелями и фиксаторами через специальные отверстия. Вертикальность энергопоглощающих стоек обеспечивалась с помощью цементации. В наклонной выработке крепи наклонены до соответствия контуру выработки.

В рассматриваемых выработках произошло несколько высокомагнитудных явлений. В результате удара 10.06.2017 г. с магнитудой ML 3.0 горнорабочие не пострадали и система крепи осталась неповрежденной (рис. 15а). До установки ЭГК 22.12.2015 г. произошел горный удар на том же участке с магнитудой ML 2.7. Выработка на тот момент была укреплена U-образными стальными рамами и гидравлическими крепями. Последствия события представлены на рис. 15б.



Рис. 15. Состояние выработки после высокоэнергетического события 10.06.2017 г. (а) и после горного удара 22.12.2015 г. (б)

В связи с катастрофой 22.12.2015 г. погибло двое рабочих. Горный удар зафиксирован на расстоянии 160 м от выработки и ее нижняя часть получила различные повреждения, произошло опрокидывание вагонетки. Выявлен наклон конвейерной ленты на расстоянии 70 м. На тот момент в выработке находилось 35 гидравлических крепей, 30 из которых оказались поврежденными, 7 опор сломалось и 11 изогнулось. Из-за удара выработка наполнилась обломками угля, что затрудняло перемещение рабочих. Слева на верхней стороне остался проход высотой 1 м и шириной 0.4 м. На расстоянии 155 м от текущего очистного забоя ширина выработки составляла 3.12 м, высота — 2.23 м; на расстоянии 80 м ширина — 2.37 м, высота — 1.7 м; на расстоянии 45 м ширина — 1.8 м, высота — 2.1 м.

Событие 10.06.2017 г. показало значительную разницу в повреждениях участка выработки с установленными ЭГК по сравнению со стандартными гидравлическими крепями. Удар привел к структурным повреждениям крепей 11, 12 и 14, расположенных около измерительной точки № 4. Деформация возникла при выбросе угля в выработку. На участке выработки 48–60 м три стандартные гидравлические крепи получили значительные повреждения и наклонились вдоль оси выработки. Произошло разрушение пальца основания, наклон опорной колонны по направлению к верхней стороне, подъем оснований крепей, основания колонн сдвинулись внутрь выработки. Верхняя часть колонн, соединенная шарниром с верхней балкой, сдвинулась наружу. На участке выработки 80–100 м с установленными ЭГК произошла деформация энергопоглощающих элементов на 2–16 см, вследствие чего удалось предотвратить последствия удара.

В рабочем забое 13230 18.12.2016 г. произошло событие с энергией $2.9 \cdot 10^6$ Дж, оказавшее значительное воздействие на крепи, расположенные в нижних выработках. Датчик мониторинга в точке № 13 (ЭГК № 48), расположенный на расстоянии 75 м от забоя, зафиксировал повышение давления в момент горного удара. Внезапная нагрузка в средней и нижней стойках превысила давление открытия предохранительного клапана и достигла значения деформации энергопоглощающего элемента. В результате удара определена деформация энергопоглощающего элемента в средней стойке на 8 мм, в боковой стойке — на 5 мм. Соседние энергопоглощающие элементы также выполнили свою функцию: деформация элемента в центральной стойке крепей 45, 47 и 49 составила ~5 мм. Энергия удара была в основном поглощена за счет упругой деформации элементов, предотвратив ударное разрушение окружающих пород.

На точке мониторинга № 13 энергия данного события составила ~20 кДж, общая поглощенная энергия могла достигать 35 кДж.

На рис. 16 приведено детальное описание эпицентра горного удара 10.06.2017 г. в рабочем забое 13230. По данным мониторинговой системы ARAMIS, эпицентр удара располагался на расстоянии 93 м по длине выработки и на высоте 25.6 м над выработкой, энергия удара составляла $1.90 \cdot 10^6$ Дж. Согласно информации мониторинговой системы ESG, эпицентр удара располагался на расстоянии 84.7 м по длине выработки и на высоте 13.4 м над выработкой, энергия удара — $5.08 \cdot 10^8$ Дж. В процессе удара в выработках наблюдалась сильная вибрация, которая сопровождалась отслоением угля на участке 15–275 м по длине выработки. На участке 275–375 м произошло разрушение адгезионного покрытия стенок выработки и пять гидравлических крепей сдвинулись на 0.1–0.2 м на участке 68–83 м. В пяти ЭГК, расположенных ближе к удару, произошла деформация энергопоглощающего элемента.

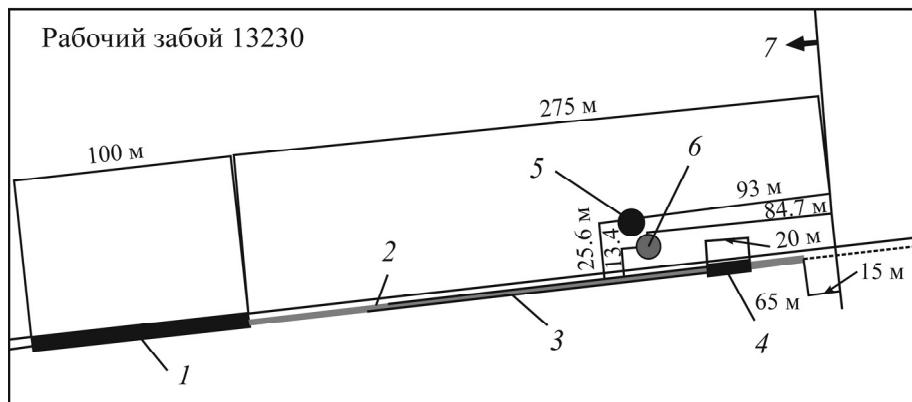


Рис. 16. Расположение эпицентра энергетического события 10.06.2017 г. и распределение повреждений в выработке: 1 — участок разрушения адгезионного покрытия выработки; 2 — участок фрагментации и отслоения угля; 3 — участок размещения ЭГК; 4 — участок снятия давления; 5 — расположение эпицентра по данным системы микросейсмического мониторинга ARAMIS; 6 — расположение эпицентра по данным системы микросейсмического мониторинга ESG; 7 — направление подвигания забоя

В соответствии с измерениями, выполненными после удара, выявлено, что смещение энергопоглощающей стойки составило 20 мм и обнаружены очевидные признаки сброса гидравлической жидкости из цилиндра через предохранительный клапан. Таким образом, в результате горного удара энергопоглощающее устройство не только выполнило свою функцию поглощения энергии за счет пластической деформации, но и позволило снять давление за счет сброса гидравлической жидкости. В результате нагрузка на ЭГК опустилась до рабочего значения 1250 кН.

ВЫВОДЫ

Предложен метод предотвращения выброса угля за счет применения энергопоглощающей крепи арочного типа. Спроектированная крепь обладает предустановленной пороговой нагрузкой, при превышении которой осуществляется деформация энергопоглощающего элемента и происходит быстрое поглощение ударной энергии со стороны окружающих пород.

Выполнено сжатие двух типов энергопоглощающих элементов. Средний предел текучести односекционного элемента составил 1840 кН, поглощенная энергия при сжатии на 100 мм — 180 кДж, средний предел текучести двухсекционного элемента — 2460 кН, поглощенная энергия при сжатии на 100 мм — 410 кДж. Оба элемента встроены в разработанную крепь арочного типа с общей энергопоглощающей способностью более 700 кДж.

Для проверки предложенной конструкции в угольной шахте Gengsun размещено 50 энергопоглощающих крепей. Установлено, что в ходе удара с магнитудой ML 3.0 крепь сминалась на 16 см за счет деформации энергопоглощающих элементов. Энергопоглощающее устройство выполнило свою функцию, показав рациональность применения энергопоглощающих крепей арочного типа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pan Yishan. Study on the occurrence and failure process of coal burst, Beijing, Tsinghua University, 1999. — P. 25–50.
2. Pan Yi-shan. Coalburst of coal mine, Beijing, Science Press, 2018. — P. 486–522.

3. **Pan Yishan, Song Yimin, and Liu Jun.** Pattern, change and new situation of coal mine coal burst prevention and control in China, Chinese J. Rock Mech. Eng., 2023, Vol. 42, No. 9. — P. 486–522.
4. **Qi Qingxin, Li Yizhe, Zhao Shankun, et al.** Seventy years development of coal mine coal burst in China: establish and consideration of theory and technology system, J. Coal Sci. Technol., 2019, Vol. 47, No. 9. — P. 1–40.
5. **Pan Yishan.** Disturbance response instability theory of coal burst in coal mine, J. China Coal Society, 2018, Vol. 43, No. 8. — P. 2091–2098.
6. **Lai Ying-dei, Cui Lan-xiu, and Sun Hui-lan.** Introduction to energy support, J. Shan Xi Coal, 1994.
7. **Zheng Yun-tian, Wang Ming-su, Peng Yong-xuan, et al.** Soft rock tunnels in simulation experiments, J. Mine Construction Technol., 1988.
8. **Sun Jun.** The understanding to develop the high stress zone lithology and tunnel surrounding rock stability, Chinese J. Rock Mech. Eng., 1988, Vo. 7, No. 2. — P. 185–188.
9. **He Man-chao and Li Cun-hua.** Two key points of anchor supporting technology and its application, J. Mine Construction Technol., 1994, Vol. 19, No. 1. — P. 21–31.
10. **Pan Yi-shan, Xiao Yong-hui, Li Zhong-hua, et al.** Study of tunnel support theory of coal burst in coal mine and its application, J. China Coal Society, 2014, Vol. 39, No. 2. — P. 222–227.
11. **Jiang Yao-dong, Pan Yi-shan, Jiang Fu-xing, et al.** State of the art review on mechanism and prevention of coal bumps in China, J. China Coal Society, 2014, Vol. 39, No. 2. — P. 205–213.
12. **Kang Hong-pu, Wu Yong-zheng, He Jie, et al.** Rock bolting performance and field practice in deep tunnels with coalburst, J. Rock Soil Mech., 2015, Vol. 36, No. 9. — P. 2225–2233.
13. **Li Zhao-fu, Zhang Sheng-xiang, Cao Wei, et al.** Development and application of antidumping gateway hydraulic powered support, J. Coal Technol., 2007, Vol. 35, No. 1. — P. 54–58.
14. **Xu Wan-jun and GU hui-jun.** Heighten of coal burst performance of hydraulic support in mine, J. Coal Technol., 2010, Vol. 35, No. 11. — P. 1809–1814.
15. **Yu Zhi-hong and Guan Wen-tao.** Comprehensive measures should be taken to use anti-erosion tunnels supports to ensure the safe production of severe impact ground pressure areas, J. Open-cast Min. Technol., 2013, No. 5. — P. 81–84.
16. **Zheng Lin-jie.** The application of tunnels hydraulic support in the percussion ground pressure working face, J. Zhongzhou Coal, 2011, No. 12. — P. 71–74.
17. **Yan Hai-qin and Gong Yu.** Analysis of coal burst performance of hydraulic support, J. Coal Technol., 2010, Vol. 35, No. 11. — P. 1809–1814.
18. **Wang W., Pan Y. S., and Xiao Y. H.** Synergistic resin anchoring technology of rebar bolts in coal mine tunnels, Int. J. Rock Mech. Min. Sci., 2022, Vol. 151. — 105034.
19. **Wang W., Pan Y. S., and Xiao Y. H.** Synergistic mechanism and technology of cable bolt resin anchoring for tunnels roofs with weak interlayers, J. Rock Mech. Rock Eng., 2022, Vol. 55, No. 6. — P. 3451–3472.
20. **Kong R., Tuncay E., Ulusay R., Zhang X., and Feng X. T.** An experimental investigation on stress-induced cracking mechanisms of a volcanic rock, J. Eng. Geol., 2021, Vol. 280. — 105934.
21. **Wang Kai-xing and Pan Yi-shan.** An unified theory of energy absorbing and anti-impact for surrounding rock and support in coalburst mine, J. Rock Soil Mech., 2015, Vol. 36, No. 9. — P. 2585–2590.
22. **Pan Yishan, Xiao Yonghui, Luo Hao, et al.** Study on safety of coal burst mine, J. China Coal Society, 2023, Vol. 48, No. 5. — P. 1846–1860.

23. **Pan Yi-shan, Xiao Yong-hui, and Li Guo-zhen.** Tunnels hydraulic support for coal burst prevention in coal mine and its application, J. China Coal Society, 2020, Vol. 45, No. 1. — P. 90–99.
24. **Xiao Yong-hui, Pan Yi-shan, Chen Jian-qiang, et al.** Study on buckling energy absorbing reliability of energy absorbing component of tunnels coal burst preventing support, J. Min. Safety Eng., 2022, Vol. 39, No. 2. — P. 317–327.
25. **Ma Xiao, Pan Yi-shan, Zhang Jian-zhuo, et al.** Design and performance re-search on core energy absorption component of anti-impact support, J. China Coal Society, 2018, Vol. 43, No. 4. — P. 1171–1178.

Поступила в редакцию 06/II 2024

После доработки 10/III 2024

Принята к публикации 14/III 2024