УДК 622.232

ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТАРНЫХ СКОЛОВ В ПРОЦЕССЕ РЕЗАНИЯ УГЛЕЙ И ИЗОТРОПНЫХ МАТЕРИАЛОВ ЭТАЛОННЫМ РЕЗЦОМ ГОРНЫХ МАШИН

В.В.ГАБОВ, Д.А.ЗАДКОВ, НГУЕН Кхак Линь

Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

Процесс резания хрупких углей и пород одиночным резцом горных машин рассматривается, в отличие от общепринятого интегрального подхода, дифференцированно, с позиций формирования последовательных элементарных сколов, составляющих срез. Процесс формирования элементарного скола во времени рассматривается в виде последовательно сменяющихся друг друга фаз. Ввиду сложности и многофакторности процесса предпочтение отдается экспериментальным стендовым исследованиям с использованием эталонных резцов, изотропных материалов и реальных блоков пород.

Показано существенное влияние на значения параметров сколов времени действия статических сил, особенностей формирования полей напряжений в подрезцовой зоне массива и условий возникновения и развития магистральных трещин в околорезцовых зонах массива в процессе резания. Принятый фазово-энергетический метод анализа процесса, который наиболее полно соответствует структуре исследуемого процесса, позволил выявить более значимое, чем считалось ранее, влияние на процесс резания, изменчивости скорости резания и запаса потенциальной энергии в приводе резца. Высказано предположение о возможности целенаправленного формирования параметров элементарных сколов. Предложены новые способы повышения эффективности процесса резания углей и горных пород, в частности снижения максимальных нагрузок и удельного расхода энергии. Указана возможность снижения измельчения горной массы и пылеобразования.

Ключевые слова: уголь; порода; выемочная машина; резание; эталонный резец; элементарный скол; фазы скола; магистральная трещина

Как цитировать эту статью: Габов В.В. Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин / В.В.Габов, Д.А.Задков, Нгуен Кхак Линь // Записки Горного института. 2019. Т. 236. С. 153-161. DOI 10.31897/PMI.2019.2.153

Введение. На современном этапе развития подземной добычи угля преобладающее распространение получила технология отработки запасов длинными комплексно-механизированными очистными забоями, оснащенными комбайновыми или струговыми очистными комплексами. При этом основной объем добываемого угля обеспечивается при отработке мощных и средней мощности пологих пластов с использованием двухшнековых очистных комбайнов.

Очистные комбайны и струги отделяют уголь от массива непрерывным резанием с поверхности со сплошной обработкой забоя. Они надежны, высокотехнологичны, обеспечивают интенсивный процесс выемки, могут работать по односторонней и челноковой схемам выемки без предварительного проведения ниш. Альтернативы им в ближайшем будущем не предвидится. Однако им свойственны особенности, существенно сдерживающие рост их эффективности: чрезмерное переизмельчение отделяемой массы угля, пылеобразование [13] и ограниченная область использования машин по крепости разрушаемых массивов из-за недостаточной стойкости рабочего инструмента [6]. Эти особенности заложены в осуществляемом ими способе отделения угля от массива резанием.

Снижение качества угля по гранулометрическому составу было отмечено специалистами с внедрением первых узкозахватных комбайнов с роторными исполнительными органами. Предлагались различные технические решения для повышения крупности, в частности, разрабатывались исполнительные органы крупного скола, тангенциальные резцы, дисковые шарошки, исполнительные органы с комбинированным рабочим инструментом. С увеличением сечения срезов возрастала динамика нагрузок, снижались надежность машин и устойчивость их работы в рациональных режимах.

Выемочные машины прошли длительный путь развития. Многократно увеличились мощность приводов, металлоемкость, интенсивность процесса отделения угля от массива. Высокие динамика нагрузок [5] и удельные затраты энергии [14] не являются уже критичными ограничи-

вающими факторами. Однако существенно значимого результата по качеству добываемого угля достигнуто не было.

В работе [13] представлено распределение по гранулометрическому составу объемов угля в процентах при добыче его современной горной техникой на шахтах Воркутского месторождения (см. таблицу). При средней толщине среза $h = 4,0 \div 6,0$ см добыча сортовых углей (классы 6-13, 13-25, 25-50 мм и более 50 мм) составила по объему для струга ГН 5,7-60,4 %, для комбайна SL300 – 60,7 %, а для комбайна MB12 только 32,3 %. Нижний предел выхода угольной летучей пыли составляет 6-11 % от общего объема и определяется в основном особенностями взаимодействия резцов с разрушаемым массивом. Выход мелких фракций (классы 0,5-1,0; 1,0-3,0; 3,0-6,0 мм) составил соответственно 32,7; 31,4 и 57,3 %, выход пыли при добычи стругом – 6,8 %, комбайном SL300 – 7,8 %, а комбайном MB12, работающим на пластах малой мощности, 11,2 %. При существующих конструктивных исполнениях стругов и комбайнов для пластов средней мощности верхний предел выхода сортового угля (> 6 мм) составляет около 60 %.

Гранулометрический состав добываемого угля, %

Уголь	Фракция, мм	Струг ГН 5.7	Комбайн SL300	Комбайн MB12
Сортовой уголь	> 50	10,9	9,8	2,3
	13-50	33,4	30	18,5
	6-13	16,1	20,9	11,5
		$\Sigma = 60,4$	$\Sigma = 60,7$	$\Sigma = 32,3$
Штыб	3-6	12,1	13,5	26,5
	1-3	14,4	14,7	22
	0,5-1,0	6,2	3,2	8,8
		$\Sigma = 32,7$	$\Sigma = 31,4$	$\Sigma = 57,3$
Пыль	0,2-0,5	4,5	5,5	6,4
	0,0-0,2	2,3	2,3	4,8
		$\Sigma = 6,8$	$\Sigma = 7,8$	$\Sigma = 11,2$

Постановка проблемы. Выполненные ранее исследования показали, что объем отделяемого от массива угля, измельченного до уровня нелетучего штыба и летучей пыли, составляет около 40 % от общей добычи, относится по существу к потерям, значительно повышает затраты и снижает эффективность процесса подземной добычи угля.

Следует отметить, что по данным [1], в общем балансе затрат энергии в процессе резания углей и пород (рис.1) на дробление и измельчение угля приходится 50-78 % от подводимой к исполнительному органу выемочной машины энергии, на измельчение при трении 20-46 %; на образование трещин – до 10 % и на рассеяние энергии при деформациях массива и деталей машин – около 2 %.

Рис.1. Распределение энергии по составляющим процесса резания углей

1 – дробление и измельчение; 2 – измельчение при трении; 3 – образование трещин; 4 – рассеивание энергии при деформациях массива и деталей машин

Как видно из сравнения приведенных данных, их относительные значения по энергетическим затратам и объемам измельчаемого продукта совпадают: объем сортового угля составляет 60 %, при этом расходуется около 61 % от всей подводимой к исполнительному органу энергии, 32 % объем штыба и 30 % доля энергии, расходуемой на измельчение.

Несмотря на отмеченные недостатки процесс резания углей, по сравнению с другими известными способами отделения угля от массива, является предпочтительным для использования в горных машинах в обозримом будущем [7, 8], тем более, что возможности его совершенствования далеко не исчерпаны.

Теоретическое описание процесса резания наиболее полно представлено классической эксперименталь-

но-статистической теорией резания углей и пород [8]. Опираясь на ее фундаментальные положения, можно сформулировать целевые актуальные направления дальнейших исследований процессов отделения угля от массива [7], которые сводились к необходимости обоснования параметров процессов и технических средств, обеспечивающих уменьшение неравномерности и сужение спектра нагрузок, повышение производительности и улучшение гранулометрического состава добываемой горной массы, к обоснованию необходимости селективной выемки полезного ископаемого с заданной безопасностью ведения горных работ, т.е. к повышению эффективности горных машин.

Для ответа на перечисленные вопросы необходимы исследования процесса резания хрупких углей и пород с позиций выявления закономерностей формирования последовательных элементарных сколов, составляющих любой срез.

В общем случае резание хрупких углей и горных пород представляет собой в целом весьма сложный термогазофизико-механический процесс, который реализуется в виде последовательных элементарных сколов с фрикционным искрением, излучением тепла, образованием пыли, генерацией сейсмических, звуковых и электромагнитных волн [7-9, 12, 16, 18, 19, 21], а процесс добычи угля сопровождается повышенным выделением метана [17, 20] и перераспределением горного давления в призабойной зоне массива [2, 11].

Если ограничить исследования процесса резания углей одиночным резцом только механической составляющей, то и в этом случае следует выделить наиболее значимое и актуальное направление: исследование закономерностей формирования последовательных элементарных сколов в процессе резания хрупких углей и горных пород. По особенностям методов и приемов исследований это направление следует разделить на три смежные темы:

- 1) исследование процесса формирования фаз элементарного скола;
- 2) исследование процесса формирования поля напряжений в околорезцовой зоне массива при перемещении резца в процессе резания;
- 3) исследование условий возникновения и развития магистральных трещин.

Метод исследований. Любое из выделенных направлений ввиду многофакторности, вариативности условий и вероятностной природы реализации влияния факторов может быть адекватно оценено только в случае экспериментальных исследований с сохранением физико-механической природы процесса.

Исследование процесса формирования фаз элементарного скола направлено на выявление факторов, наиболее существенно влияющих на значения параметров, форму силовой и энергетической характеристик и на выявление закономерностей формирования самих фаз элементарного скола в процессе резания углей одиночным резцом.

Силовая характеристика последовательных элементарных сколов $Z_p = f(h, t)$ – это изменение силы резания при постоянной скорости резания ($V_p = \text{const}$) в течение времени t формирования цикла элементарного скола. Графически она представлена (рис.2) последовательными фазами: зачистки – 1ф, дробления-измельчения – 2ф, формирования ядра уплотнения – 3ф и скола – 4ф. Энергетическая характеристика $W_s = f(h, t)$ последовательных элементарных сколов – это распределение энергии, расходуемой по фазам элементарного скола при $V_p = \text{const}$ за время цикла $T_{ц}$.

Наибольшие затраты энергии приходятся на сопутствующие, вспомогательные 1-, 2- и 3-ю фазы – до 98 % от всей энергии, затрачиваемой за цикл элементарного скола, а в фазе скола (получение готового продукта) расходуется менее 2 % от W_s [9].

В 3-й фазе перед передней гранью движущегося резца площадь контакта резца с массивом в фазе смятия и дробления породы, напряжение в подрезцовой зоне и усилие на резце

Рис.2. Идеализированная характеристика элементарного скола

резко возрастают. С реализацией локальных дефектов и многочисленных микротрещин в подрезцовой зоне массива зарождается магистральная трещина (начало 4-й фазы), развивающаяся в направлении движения резца и к открытой поверхности.

Здесь наиболее важной целью исследований может быть выявление самой возможности перераспределения затрат энергии по фазам цикла последовательных элементарных сколов, перераспределения затрат энергии с 1-3-й фаз на основную 4-ю фазу скола.

Физическая сущность процесса формирования последовательных фаз элементарных сколов объясняется тем, что после достижения максимального усилия $Z_{p, \max}$ на резце (в конце 3-й фазы) и возникновения магистральной трещины скорость ее роста в 4-й фазе значительно превышает скорость движения резца. Образуется опережающая поверхность скола, направленная, в общем случае, под углом к плоскости резания и к открытой поверхности. При дальнейшем перемещении резца режущая кромка зачищает (в 1-й фазе) поверхность скола до плоскости резания. При этом энергия расходуется на трение и измельчение угля преимущественно истиранием, так как в этой фазе элементарного скола толщина среза h мала и соизмерима с радиусом r скругления режущей кромки резца ($h \leq 2r$).

С углублением режущей кромки движущегося резца (2-я фаза) скалываемые кусочки угля накапливаются на передней его поверхности и дробятся. Формируются ядро уплотнения (3-я фаза) и общая область напряжений в околорезцовой зоне массива, которые сопровождаются импульсивным ростом напряжений в зоне массива, размеров зон повышенных напряжений и сил резания.

Формирование такой структуры последовательных элементарных сколов характерно для процесса резания хрупких пород с постоянной скоростью (комбайны, струговые установки, агрегаты), которая значительно меньше скорости распространения магистральной трещины в массиве при критических напряжениях. При изменении параметров режима резания (толщина среза, вектор скорости резца к направлению слоистости или преобладающей трещиноватости массива) параметры последовательных элементарных сколов и структура силовой и энергетической характеристик существенно изменяются.

Известно множество форм элементарных сколов. Изменчивость форм элементарных сколов и значений их параметров принято оценивать вероятностными характеристиками. Установлено, что реализуются преимущественно (более 90 %) сколы, соответствующие треугольным формам. Вероятность реализации треугольных форм повышается с увеличением хрупкости угля, толщины среза и с уменьшением угла резания [8].

Каждому сколу предшествуют образование локальной зоны напряжений в подрезцовой зоне массива, возникновение и распространение магистральной трещины. При резании угля или породы одиночным резцом всегда можно выбрать движение резца по направлению устойчивой их трещиноватости, слоистости или слойчатости, что обеспечит распространение магистральной трещины по заданному направлению, соответствующему наименьшему сопротивлению.

В этом случае относительные затраты энергии на зачистку (1-я фаза), дробление и измельчение (2-я фаза) могут существенно уменьшиться. Уменьшится и суммарная энергия реализации единичного элементарного скола. Такая технология может быть осуществлена с освоением избирательных способов отделения угля от массива [14].

Исследование процесса формирования поля напряжений в околорезцовой зоне массива при перемещении резца в процессе резания возникло как необходимое звено при выявлении закономерностей развития каждой фазы последовательности элементарных сколов.

В общем случае параметры состояний поля напряжений в подрезцовой зоне массива зависят как от параметров резца, режима его работы, так и от структуры массива, направления движения резца относительно этой структуры, степени деформации и смещений элементов структуры по отношению друг к другу и к резцу. Все это может оказывать существенное влияние на соотношение напряжений сжатия, сдвига и растяжения в околорезцовой зоне массива и на их взаимные смещения при движении резца.

Естественно предположить, что более устойчивые структуры и параметры полей напряжений и процесса элементарного скола могут быть получены при резании массива с неизменными (квазиизотропными) прочностными свойствами. Была рассмотрена модель (рис.3, а) процесса резания идеального изотропного массива [15], которая может быть принята за исходную для

Рис.3. Формирование поля напряжений в подрезцовой зоне: а – модель; б – эксперимент

1 – поле слабых напряжений; 2 – поле максимальных напряжений; 3 – граница магистральной трещины; 4 – резец; 5 – след элементарного скола; 6 – след зачистки (на рис.3, б след не виден)

дальнейших исследований более сложных структурных моделей массивов. В модели учитываются: поле слабых напряжений; поле максимальных напряжений; граница вершины магистральной трещины; резец; след элементарного скола; след зачистки. В процессе резания в подрезцовом пространстве массива зона упругой деформации, зоны остаточной деформации и разрушений существуют одновременно, занимая смежные пространства, смещаясь и последовательно замещая друг друга при непрерывном движении резца.

Для проверки адекватности рассмотренной модели были проведены экспериментальные исследования процесса резания изотропного материала, в качестве которого было выбрано прозрачное акриловое стекло. Это позволило существенно уменьшить влияние многофакторности и случайности на процесс формирования поля напряжений и на параметры элементарных сколов. Были определены, с одной стороны, режимы, исключающие формирование сливной стружки, определяемой явлением ползучести материала, при малых скоростях резания, с другой – скоростные режимы по условиям теплового режима резания.

Исследования процесса осуществлялось на специальном стенде [15] резанием пластины акрилового стекла резцом с эталонными параметрами за исключением ширины режущей кромки (10 мм). Рамка со стеклом подавалась на неподвижный резец вращением винта. В процессе резания акриловое стекло подсвечивалось через специальное устройство плоско-поляризованным светом, что обеспечивало наблюдение, фото- и видеорегистрацию последовательно формирующихся зон напряжений, возникновения и роста магистральных трещин, формирования фаз элементарного скола и поверхности среза (рис.3, б). Было отмечено наличие пульсирующего движения зон слабых и максимальных напряжений, границ магистральной трещины.

Поле максимальных напряжений возникает на линии контакта резца с массивом, увеличивается в размерах преимущественно в направлении движения резца, в момент быстрого роста магистральной трещины отделяется от резца, движется вместе с границей магистральной трещины и исчезает со сколом, чтобы вновь возникнуть при последующем контакте режущей кромки резца с разрушаемым массивом.

Форма элементарных сколов напоминает форму морской ракушки (рис.4) с характерными линиями замкнутых дуг, покрывающих всю поверхность скола. На границах этих дуг наблюдаются микротрещины, совпадающие по направлению с направлениями движения резца.

Рис.4. Характерная последовательность следов элементарных сколов в срезе
 t – шаг скола

Наблюдаются устойчивые чередования последовательных элементарных сколов, их формы и размеров, чередования фаз в процессе формирования каждого элементарного скола (см. рис.3, б).

Такие устойчивые особенности формирования поля напряжений и параметров элементарных сколов в процессе резания изотропного материала (с устойчивым распределением прочностных свойств) подтверждают возможность целенаправленного формирования структуры и параметров элементарных сколов в процессе резания и анизотропных материалов, но с устойчивым распределением прочностных свойств, в частности, отделения угля от массива рабочим инструментом горных машин. Однако особенности процесса возникновения и роста магистральных трещин в околорезцовых зонах угольного массива в процессе резания и их роль в формировании нагрузок, гранулометрического состава отделяемого угля и в затратах энергии по фазам элементарного скола недостаточно исследованы.

Исследование условий возникновения и развития магистральных трещин в околорезцовой зоне массива в процессе резания выполняли многие исследователи (в частности, акад. А.В.Докукин, проф. А.Г.Фролов [3]). Особый интерес этот вопрос представляет для условий отделения полезных ископаемых от анизотропных трещиновато-слоистых массивов, к которым относятся угольные пласты.

Угольные пласты состоят из слоев, ослабленных плоскостями спайности и разделенных трещинами систем кососекущих трещиноватостей (со следами скольжений) на блоки. Блоки разбиты на более мелкие отдельности закрытыми трещинами, относящимися к системам нормальных трещиноватостей, как правило, довольно устойчивых по геометрическим параметрам и интенсивности. Такая структура угольного массива не может не влиять на условия возникновения и роста магистральных трещин в околорезцовой зоне угольного массива, на их параметры, т.е. на формообразование и, следовательно, на распределение энергии по фазам элементарного скола.

Особый интерес представляют: зависимость критического напряжения в околорезцовой зоне массива от времени силового воздействия резца на массив; влияние подводимой энергии к резцу и запаса потенциальной энергии в приводе резца на условия возникновения и распространения магистральных трещин за цикл элементарного скола.

Для выявления зависимости времени ожидания скола от приложенной квазистатической нагрузки, меньшей критического значения, были проведены стендовые экспериментальные исследования [4], в результате которых получены аппроксимированные зависимости максимальных статических сил резания от времени ожидания скола (рис.5) при толщине среза 3-6 мм и щелевой его форме. Каждая точка на графике отражает осредненный результат совокупности опытов при одинаковых условиях. Зависимость максимальной (квазистатической) силы резания от времени действия нагрузки в общем виде может быть представлена формулой

$$\bar{Z}_{п(t)} = \bar{Z}_{п.э} (1 - \lambda \ln(t')), \quad (1)$$

Рис.5. Зависимость времени ожидания скола от статических сил, действующих на резец

где $\bar{Z}_{п.э}$ — среднениковое (эталонное) значение силы резания при постоянной скорости резания; λ — коэффициент, характеризующий хрупкопластические свойства и трещиноватость угля; t' — относительное время от момента приложения нагрузки до начала скола.

Обсуждение результатов. Полученные результаты подтверждают возможности существенного снижения нагрузок на резцы, или разрушения более крепких массивов, изменением времени приложения квазистатических нагрузок.

Рассматривая особенности процесса единичного скола (см. рис.2) и последовательности сколов при реза-

нии углей с позиций механики возникновения и развития магистральных трещин и кинетической теории разрушения хрупких массивов, можно отметить, что передний фронт нарастания силы резания формируется с ростом толщины среза, смятием угля на передней поверхности резца и ростом числа мелких трещин вокруг ядра уплотнения. Крутизна спадающей части характеристики определяется особенностями развития магистральной трещины, длина и площадь поверхности которой зависят от толщины среза, запаса потенциальной энергии в приводе резца и напряжения в полюсе трещины.

Известно, что для возникновения магистральной трещины напряжения в подрезцово-й зоне массива, в окрестности режущей кромки резца, должны быть больше, чем критическое напряжение в полюсе трещины после ее возникновения ($\sigma_{тр} > \sigma_{кр}$), так как часть энергии расходуется на образование мелких трещин. Напряжение растяжения в вершине трещины в момент начала ее роста также должно быть больше критического:

$$\sigma = \sigma_{кр} q = \sigma_{кр} \left(1 + 2\sqrt{c/r}\right), \quad (2)$$

где q – коэффициент концентрации напряжений; c – длина половины центральной трещины, мкм; r – радиус вершины трещины, мкм.

Таким образом напряжение, образуемое подводом энергии к магистральной трещине, равно произведению критического напряжения на коэффициент концентрации напряжения, значения которого зависят от отношения полудлины трещины к радиусу вершины трещины.

Как следует из (2), на скорость распространения магистральной трещины влияет радиус вершины трещины. В хрупких углях расстояние между закрытыми эндогенными микротрещинами, с реализацией которых распространяется магистральная трещина, равно 1-10 мм. При достижении критических напряжений в вершине трещины происходят смещения структурных элементов по плоскостям эндогенных трещин. Радиус в вершине трещин может быть определен как расстояние между эндогенными трещинами или половиной длины трещины $0,5\ell_{тр.э}$ в зависимости от направления резания. Такие смещения вызывают расход поверхностной энергии трещин в 10^1 - 10^3 раз больший, чем при распространении трещин в однородных материалах, и соответствующее снижение скорости распространения магистральной трещины. Следовательно, скорость распространения магистральной трещины в неоднородных трещиноватых массивах (углях) может быть представлена в виде

$$V_{м.тр} = k_c k_r \sqrt{E_y / \rho_y}, \quad (3)$$

где k_c – коэффициент структуры материала; k_r – коэффициент радиуса вершины трещины; E_y – модуль упругости, МПа; ρ_y – плотность материала, кг/м³.

В таком случае скорость распространения магистральной трещины будет значительно ниже, чем в однородных материалах, и может оказаться одного порядка или настолько близкой к скоростям перемещения резцов горных машин, что существенно скажется на формировании параметров элементарных сколов.

Формирование характеристики элементарного скола может быть обеспечено изменением квазистатической нагрузки и времени ее приложения, а при зарождении магистральной трещины – поддержанием напряжения в полюсе трещины подводом потенциальной энергии к гидроцилиндру привода резца от пневмогидроаккумулятора [22].

Особенностями стенда с гидравлическим приводом являются [10]: возможность резания угольного блока с неизменяемой (постоянной) скоростью (при отключенных пневмогидроаккумуляторах); возможность резания в режиме постоянного силового воздействия (при подключенных к гидросистеме пневмогидроаккумуляторах) и малая инерционная масса движущихся деталей привода резца. Количество потенциальной энергии, запасаемой пневмогидроаккумуляторами, пропорционально давлению рабочей жидкости в гидросистеме, т.е. пропорционально силе резания.

При резании угля с постоянной скоростью резец только периодически создает напряжение в массиве, так как опережающие сколы прерывают контакт резца с массивом. Для обеспечения режима с постоянным силовым воздействием резца на массив необходим запас потенциальной

Рис.6. Процесс резания при щелевом виде среза без пневмогидроаккумуляторов (а) и с пневмогидроаккумуляторами (б), толщина среза $h = 10$ мм

энергии в приводе для придания резцу ускорения и поддержания критического напряжения в полюсе трещины при ее росте. При увеличении сопротивляемости массива резанию скорость движения резца снижается, вплоть до его полной остановки.

Эксперименты на стенде с гидроприводом проводились при резании блока угля марки Ж из пласта «Мощный» пачки n_{14} , n_{13} шахты «Комсомольская» ОАО «Воркутауголь». Среднее значение сопротивляемости угля резанию $A = 180$ кН/м.

Осциллограммы резания щелевых по форме сечения срезов ($h = 10$ мм) без пневмогидроаккумуляторов (с постоянной скоростью резания V_p) (рис.6, а) и с пневмогидроаккумуляторами (рис.6, б) четко отражают принципиальное различие процессов. Первая осциллограмма подтверждает классический характер процесса с постоянной скоростью резания ($V_p = \text{const}$) и высокой динамикой силы резания (Z_p), вторая – квазипостоянное значение силы резания и высокую динамику скорости резания.

Полученный эффект доказывает, что скорости распространения магистральной трещины близки к скорости движения резца. При этом необходимо отметить, что частота сколов при подключении пневмогидроаккумуляторов уменьшается, а шаг t – увеличивается, что может благоприятно влиять на уменьшении выхода мелких классов угля и пыли.

Выводы

1. Высокая динамика нагрузок на резец при резании углей с постоянной скоростью не является только следствием хрупкости углей, а зависит от свойств привода резца.
2. Изменением свойств привода резца можно формировать как режимы резания угля с постоянной скоростью, или с постоянным силовым воздействием, так и промежуточные режимы по соотношению изменчивости скорости и сил резания.
3. Фазово-энергетический подход является перспективным для исследования закономерностей процесса резания хрупких углей и пород, в частности для исследований формирования последовательных элементарных сколов и распределения энергии по фазам элементарного скола.

4. Доказана сама возможность активного влияния на форму механической характеристики процесса элементарного скола.

5. Результаты экспериментальных исследований подтвердили снижение не только пиковых сил резания, но и средних нагрузок.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берон А.И. Об оценке энергетического баланса процесса резания углей / А.И.Берон, Е.З.Позин // Тр. ИГД им. А.А.Скочинского. Подземная разработка угольных пластов. 1972. Вып. 93. С. 10-20.
2. Буялич Г.Д. О направлении снижения напряженно-деформированного состояния призабойной зоны угольного пласта / Г.Д.Буялич, Ю.А.Антонов, В.И.Шейкин // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. Отд. вып. № 2: Горное машиностроение. С. 198-202.
3. Докукин А.В. Совершенствование машин для добычи угля на основе кинетической теории прочности / А.В.Докукин, А.Г.Фролов // Научн. сообщ. ИГД им. А.А.Скочинского. 1977. Вып. 149. С. 33-41.
4. Зависимость максимальных сил резания хрупких трещиноватых углей от времени действия нагрузки / В.В.Габов, В.С.Соловьев, Д.А.Задков, Г.И.Коломоец // Горное оборудование и электромеханика. 2006. № 7. С. 37-39.
5. Загривный Э.А. Формирование внешней динамики горных машин / Э.А.Загривный, Г.Г.Басин // Записки Горного института. 2016. Т. 217. С. 140-149.
6. Особенности эксплуатации проходческих комбайнов на шахтах ОАО «Воркутауголь» / В.В.Габов, Д.А.Задков, Ю.В.Лыков, А.И.Гурицкий, С.И.Шпилько // Горное оборудование и электромеханика. 2008. № 12. С. 2-6.
7. Позин Е.З. Исследование процесса разрушения углей механическим способом в ИГД им. А.А. Скочинского // Уголь. 1992. № 12. С. 60-62.
8. Позин Е.З. Разрушение углей выемочными машинами / Е.З.Позин, В.З.Меламед, В.В.Тон. М.: Недра, 1984. 288 с.
9. Фролов А.Г. К методике решения задач увеличения выхода крупных классов и уменьшения пылеобразования при добыче угля // Науч. сообщ. ИГД им. А.А.Скочинского. 1972. Вып. 100. С. 152-161.
10. Balaji Aresh. Fundamental Study into the Mechanics of Material Removal in Rock Cutting: Doktorat thesis / University of Northumbria at Newcastle upon Tyne. 2012. 169 p.
11. Buyalich G.D. Study of Falling Roof Vibrations in a Production Face at Roof Support Resistance in the Form of Concentrated Force / G.D.Buyalich, K.G.Buyalich, V.Yu.Umrikhina // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. IOP Publishing. 2016. Vol. 142. P. 012120. DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012120
12. Crosland D. Changes in Acoustic Emissions When Cutting Different Rock Types / D.Crosland, R.Mitra, P.Hagan // Coal Operators' Conference / University of Wollongong & the Australasian Institute of Mining and Metallurgy. 2009. P. 329-339.
13. Gabov V.V. Analyzing coal breakage while mining at the mines of Vorkuta / V.V.Gabov, Y.V.Lykov, A.A.Bannikov // International Mining Conference Advanced mining for sustainable development. Halong, 2010. P. 283-285.
14. Gabov V.V. Energy-saving modular units for selective coal cutting / V.V.Gabov, D.A.Zadkov // Eurasian mining. 2016. № 1. P. 37-40. DOI: 10.17580/em.2016.01.06.
15. Gabov V.V. Peculiarities of stress field formation during cutting isotropic material by mining machine cutters / V.V.Gabov, D.A.Zadkov // IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. IPDME. 2017. Vol. 87. P. 022007. DOI:10.1088/1755-1315/87/2/022007.
16. Hua Gua. Rock cutting studies using fracture mechanics principles. Doctor of Philosophy thesis / Department of Civil and Mining Engineering, University of Wollongong, 1990. 225 p.
17. Kazanin O.I. Interaction between gas dynamic and geomechanical processes in coal mines / O.I.Kazanin, A.A.Sidorenko // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2017. Vol. 12. Iss. 5. P. 1458-1462.
18. Khair A.W. Research and Innovations for Continuous Miner's Cutting Head, for Efficient Cutting Process of Rock/Coal // 17 International Mining Congress and Exhibition of Turkey-IMCET 2001. P. 45-55.
19. Shen H.W. Laboratory study of acoustic emission and particle size distribution during rotary cutting / H.W.Shen, H.R.Hardy, A.W.Khair // International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences. 1997. Vol. 34. Iss. 3-4. P. 121.e1-121.e16. DOI: 10.1016/S1365-1609(97)00247-5.
20. Sidorenko A.A. Estimation of methane emission from a longwall panel / A.A.Sidorenko, J.M.Sishchuk, I.G.Gerasimova // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. № 7. P. 4448-4454.
21. Wang S. Energy dissipation characteristics of sandstone cutting under mechanical impact load / S.Wang, J.Su, P.Hagan // Computer modelling & new technologies. 2014. 18(3). P. 13-20.
22. Zadkov D. Mining machinery: enhancing cutting efficiency / D.Zadkov, V.Bolshakov // Russian mining. 2005. № 1. P. 19-21.

Авторы: В.В.Габов, д-р техн. наук, профессор, GVV40@mail.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Д.А.Задков, канд. техн. наук, доцент, Dzadkov@yandex.ru (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия), Нгуен Кхак Линь, аспирант, khaclinhung@gmail.com (Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия).

Статья поступила в редакцию 10.07.2018.

Статья принята к публикации 15.11.2018.