

УДК 622-1/-9, 622.023

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ РЕЗЦОВЫМ ИНСТРУМЕНТОМ

Ю. Н. Линник, В. Ю. Линник

*Государственный университет управления,
E-mail: yn_linnik@guu.ru, Рязанский проспект, 99, 109542, г. Москва, Россия*

Использована классификация угольных пластов, содержащих твердые включения, согласно которой все шахтопласты подразделяются на три группы в зависимости от размеров и содержания в пласте включений. Выявлено, что характер разрушения, формирование и величина максимальных нагрузок зависят от минералогического типа включений. Карбонатные и пиритные включения разрушаются несколькими сколами, карбонатно-пиритные, как правило, одним. При разрушении пиритных включений нагрузки на резце примерно в 1.6–1.7 раза выше по сравнению с нагрузками при перерезании карбонатных включений. Установлено пять основных типов взаимодействия резца с твердым включением: краевое и центральное перерезание; касание; вырыв; извлечение твердого включения. Самые большие нагрузки возникают при перерезании твердых включений, поэтому они должны учитываться в расчетах параметров исполнительных органов выемочных машин и трансмиссий к ним.

Углецементный блок, твердые включения, пиковая сила резания, толщина и ширина среза, минералогический тип твердого включения, ориентации резца относительно включения, сила сцепления включения с массивом, вырыв твердого включения

DOI: 10.15372/FTPRPI20240306
EDN: AJPOON

В настоящее время в расчетах по выбору оптимальных параметров исполнительных органов угледобывающих машин применительно к конкретным условиям их эксплуатации не учитывается ряд факторов, связанных с закономерностями формирования максимальных нагрузок на резцах при встрече их с твердыми включениями, что приводит к существенным ограничениям при выемке пластов сложного строения, содержащих крупные включения. Наличие таких включений в угольных пластах приводит к снижению надежности исполнительных органов выемочных машин, трансмиссий к ним и повышенному расходу режущего инструмента [1–6]. В [7] отмечается, что работа выемочного комбайна с износом резцов приводит к потере 18–25 % производительности, в [8] приведены данные о том, что с увеличением числа отказавших резцедержателей потребляемая мощность комбайна и удельные энергозатраты на выемку угля возрастают по нелинейной зависимости. Аналогичные выводы сделаны в [9, 10] применительно к работе очистных комбайнов на калийных рудниках и в угольных шахтах.

В научном плане речь идет об изучении причин и закономерностей формирования нагрузок, в практическом — о разработке обоснованного метода расчета инструментов и элементов трансмиссий при проектировании угледобывающих машин. В рамках данного исследования рассмотрен механизм формирования максимальных нагрузок при разрушении твердых включений.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследование нагрузок осуществлялось при резании углещементных блоков сопротивляемостью резанию 100, 150 и 200 Н/мм, в которые при их заливке помещались твердые включения различного минералогического состава. Размеры включений составляли по мощности 5, 5–10 и более 10 см, а отношение их длины l к мощности m — от 2 до 8, что соответствует классификации шахтопластов по содержанию твердых включений. Резание осуществлялось на мощном продольно-строгательном станке, а возникающие при этом на резце усилия регистрировались трехкомпонентным динамометром на тензометрических столбах, сигналы с которого поступали на осциллограф и записывались на ленту.

В качестве режущего инструмента во всех циклах исследований использовался один тип резца, имеющий плоскую переднюю грань и скругленную режущую кромку, ориентированную перпендикулярно вектору скорости резания. Резец имел следующие параметры:

Угол установки резца относительно горизонтальной оси шнека	0°
Ширина режущей части	14 мм
Угол заострения	75°
Угол задний	15°
Форма режущей кромки	Скругленная
Форма передней грани	Клиновидная

Для более детального рассмотрения процесса перерезания твердого включения, наряду с записью осциллограммы усилий резания, проводилась скоростная киносъемка с последующей привязкой отдельных моментов разрушения к соответствующим участкам осциллограммы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рассмотрим классификацию шахтопластов по содержанию и размерам в них твердых включений, приведенную в [11, 12], данные которой будут использоваться в ходе дальнейшего анализа. Классификация составлена по результатам планшетных съемок пластов, при проведении которых измерялись длины и мощности включений, координаты расположения их в плоскости забоя, определялся литологический тип и форма сечения включения (круг, эллипс, прямоугольник). Из табл. 1 видно, что в зависимости от содержания и размеров твердых включений все шахтопласты России распределяются на три типовые группы.

ТАБЛИЦА 1. Классификация шахтопластов, содержащих твердые включения

Группа	Удельное содержание, %	Средняя площадь поперечного сечения, см ²	Средняя мощность, см	Удельное количество, шт./100 м
I	До 1.0	До 100	До 5	10–250
II	1.0–2.5	100–1000	5–10	10–50
III	2.5–8.0	1000–10000	Более 10	5–25

Анализ кадров киносъемки и осциллограммы резания показал, что на начальном этапе резания твердого включения вдоль передней грани резца наблюдается выброс очень мелких фракций раздробленного материала включения с нарастанием силы резания до 1500 Н. Вблизи режущей кромки резца начинает формироваться уплотненное ядро мелко раздробленного материала и при дальнейшем резании часть его с большой скоростью выбрасывается вдоль передней грани в сторону обнаженной поверхности. На следующем этапе резания нагрузка на резце возрастает, происходят сколы небольших элементов включения с последующим спадом сил резания. Продолжающееся увеличение площади контакта резца с включением приводит к увеличению размеров уплотненного ядра и при достижении максимальной нагрузки происходит скол весьма крупного элемента от твердого включения, сопровождающийся резким выбросом мелкораздробленного материала. Затем силы резания резко падают, что свидетельствует о завершении процесса разрушения твердого включения. Данный процесс разрушения твердого включения аналогичен процессу резания угля, подробно описанному в [13].

Рассмотрим особенности разрушения твердых включений, отличающихся своими размерами и минералогическим составом. Весь цикл исследований проводился с одним типом резца (с плоской передней гранью и криволинейной режущей кромкой, ориентированных перпендикулярно вектору скорости резания). Резание углецементных блоков с залитыми в нем твердыми включениями осуществлялось по последовательной схеме с толщиной стружки $h=2$ см, шагом резания $t=4.5$ см. Полученные в опытах максимальные нагрузки при прорезании твердых включений относились к среднему значению усилия резания угля, которое было постоянным на протяжении всего цикла исследований. В табл. 2 приведены данные, оценивающие влияние минералогического типа и размеров (мощности) включений на пиковые и среднепиковые силы резания.

ТАБЛИЦА 2. Оценка влияния размеров и минералогического типа твердых включений на максимальные нагрузки при резании

Минералогический тип включений	Отношение среднепиковой силы резания включений к средней силе резания угля \bar{Z}_n / \bar{Z}_{yt}			Отношение пиковой силы резания включений к средней силе резания угля Z_n / \bar{Z}_{yt}			Группа пластов по содержанию твердых включений (табл. 1)
	Диапазон изменения	Среднее значение	Отклонение от среднего, %	Диапазон изменения	Среднее значение	Отклонение от среднего, %	
Карбонатные	5.1 – 13.1	9.0	30.0	8.8 – 15.5	12.2	17.0	I
Карбонатно-пиритные	—	—	—	8.1 – 24.2	14.4	45.0	
Пиритные	8.7 – 24.0	15.3	36.2	12.0 – 26.9	19.5	33.0	
Карбонатные	5.1 – 11.4	8.1	27.9	13.8 – 17.2	15.9	7.9	II
Карбонатно-пиритные	—	—	—	6.8 – 26.0	15.4	45.7	
Карбонатные	7.6 – 12.3	9.8	18.2	14.5 – 23.4	18.7	21.9	III

Наблюдения за процессом резания и анализ данных (табл. 2) показал следующее.

- При разрушении пиритных твердых включений нагрузки на резце в 1.6–1.7 раза выше по сравнению с нагрузками при прорезании карбонатных включений.

- Максимальная пиковая сила резания, возникающая при сколе первого крупного элемента от карбонатно-пиритных включений, в 1.2 раза выше пиковой нагрузки при резании карбонатных включений.

- Увеличение размеров твердых включений не влияет на среднепиковые нагрузки. Карбонатные включения, относящиеся к группе III по содержанию в пластах твердых включений, разрушаются при \bar{Z}_n в 1.09 раза больше, чем включений, относящихся к группе I.

- Максимальная пиковая сила резания Z_n возрастает с увеличением размеров включений: Z_n при резании включений, относящихся к группе III, примерно в 1.3 раза выше, чем Z_n при резании включений группы I, а Z_n при резании включений группы II по сравнению с включениями группы I выше всего в 1.2 раза. Такая тенденция свидетельствует о преобладающем влиянии на Z_n площади сечения твердых включений и, соответственно, поверхности откола первого крупного элемента. Размеры включений группы I типовых условий таковы, что первый скол их происходит почти по всему сечению твердого включения. Увеличение размеров включений приводит к тому, что при тех же условиях резания поверхность откола твердого элемента возрастает, что влечет за собой соответствующее увеличение максимальной нагрузки на резце Z_n .

Стабильность среднепиковых усилий резания \bar{Z}_n объясняется следующим. Несмотря на то, что Z_n с увеличением размеров включений растет, возрастает также и длина среза по включению, а следовательно, и число сколов отдельных относительно крупных элементов при значениях пиковых сил резания, близких к \bar{Z}_n . Последнее приводит к нивелированию нагрузок \bar{Z}_n при резании включений, относящихся к группам II и III типовых условий по сравнению с группой I.

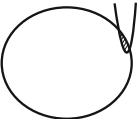
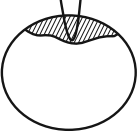
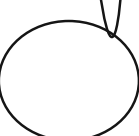
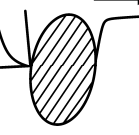
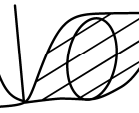
Справедливо предположить, что пиковая нагрузка и характер разрушения твердого включения зависят от того, как ориентирован резец относительно поверхности включения при его резании. Для установления возможных типов взаимодействия резцов исполнительных органов угледобывающих комбайнов с твердыми включениями и определения уровня действующих нагрузок выполнены эксперименты по резанию углецементных блоков, содержащих случайным образом расположенные твердые включения. При проведении исследований использовались результаты из [14–17], где наблюдения были расширены в части:

- определения ориентации резца относительно поверхности включения;
- характера разрушения включения после его разрушения резцом;
- анализа структуры поверхности скола включения;
- анализа поверхности сцепления твердого включения с массивом в случае его вырыва.

В результате проведенных исследований [15] установлены пять видов взаимодействия резца с твердыми включениями, отличающихся различными уровнями нагрузки на резец, ориентацией резца относительно включения, размером поверхности откола.

В табл. 3 приведены характерные виды взаимодействия резца с твердыми включениями и отношения максимальных нагрузок при разных видах взаимодействия к максимальной нагрузке при центральном перерезании.

ТАБЛИЦА 3. Оценка влияния размеров и минералогического типа твердых включений на максимальные нагрузки при резании

Вид взаимодействия	Индекс вида взаимодействия	Схема взаимодействия	Относительная максимальная нагрузка
Краевое перерезание	I		0.3 – 0.9
Центральное перерезание	II		1.0
Касание	III		0.1 – 0.3
Вырыв	IV		0.2 – 0.9
Извлечение	V		0 – 0.1

Остановимся на установленных видах взаимодействия резца с включениями:

I — *краевое перерезание*. В этом случае линия резания проходит по краю включения. Расстояние от внешней боковой кромки резца до края включения меньше ширины режущей части резца b . Разрушение включения в сторону его центра не наблюдается. Площадь поверхности откола материала включения невелика.

II — *центральное перерезание*. Линия резания проходит в центральной части включения, ширина включения l' и шаг резания t таковы, что в соседних справа и слева линиях резания возможны типы взаимодействия I и III резца с включением, т. е. $l' > 2t$. Поверхность откола значительно больше, чем при типе I взаимодействия.

III — *касание с твердым включением*. Линия резания относительно включения проходит так, что резец режет твердое включение с толщиной среза менее 0.5 см одной или двумя своими главными режущими кромками. Твердое включение разрушается незначительно, в пределах высоты контакта по режущей кромке резца.

IV — *вырыв твердого включения из массива*. Такой вид взаимодействия наблюдается при встрече резца с частично разрушенным или цельным включением. Вырыв происходит при определенном соотношении, с одной стороны, нагрузки, приложенной к включению $Z_{\text{нIV}}$, с другой — поверхности сцепления включения с массивом $S_{\text{сц}}$ (или поверхности опоры включения $S_{\text{оп}}$) и показателей физико-механических свойств разрушаемого угольного массива. При вырыве твердые включения не разрушаются. Задняя часть лунки, остающаяся на поверхности массива после вырыва включения, деформируется.

V — извлечение твердого включения из массива вместе с частью разрушенного угла. Наблюдается в тех случаях, когда линия резания проходит по центральной части включения или близко от нее и толщина стружки больше длины включения l или соизмерима с ней и извлечение включения происходит по материалу окружающего угла.

В табл. 4–6 приведены результаты экспериментов при наиболее характерных типах взаимодействия реза с включениями.

ТАБЛИЦА 4. Результаты экспериментальных исследований максимальных нагрузок при резании карбонатных включений по последовательной схеме при центральном перерезании

Параметр режима резания, см		Сила резания, Н		Сила подачи, Н		$\frac{Y_{\text{нп}}}{Z_{\text{нп}}}$	$\frac{\bar{Y}_{\text{нп}}}{\bar{Z}_{\text{нп}}}$
Толщина среза h	Ширина среза t	пиковая $Z_{\text{нп}}$	среднепиковая $\bar{Z}_{\text{нп}}$	пиковая $Y_{\text{нп}}$	среднепиковая $\bar{Y}_{\text{нп}}$		
0.5	1.4	7551	904	632	542	0.47	0.60
0.5	3.0	11180	1536	1337	976	0.65	0.64
0.5	5.0	14416	1735	1644	1301	0.62	0.75
1.0	1.4	11572	1789	1211	1102	0.57	0.62
1.0	3.0	16182	2241	1500	1283	0.50	0.57
1.0	5.0	22948	2801	1681	1391	0.40	0.50
1.0	6.0	23537	2927	1807	1464	0.42	0.50
2.0	1.4	20006	2548	1373	1193	0.37	0.47
2.0	3.0	34226	3524	1753	1301	0.29	0.37
2.0	5.0	37267	4156	1861	1482	0.27	0.35
3.0	1.4	30892	3379	12468	1048	0.22	0.31
3.0	2.0	44426	4210	1771	1319	0.21	0.31
3.0	3.0	49231	4698	1879	1373	0.20	0.29
3.0	5.0	50212	5204	2277	1735	0.25	0.33
3.0	6.0	54429	6072	2584	1933	0.26	0.32

ТАБЛИЦА 5. Пиковые значения силы резания при вырыве включений из массива

Параметр режима резания, см		Среднее значение пиковой силы резания, Н		$\frac{Z_{\text{нпV}}}{Z_{\text{нп}}}$	Средние по опытам размеры включений, см		Средняя по опытам площадь поверхности, см ²	
Толщина среза h	Ширина среза t	при вырыве	при центральном перерезании		Мощность	Длина	сцепления	опоры
0.5	5.0	1970	2656	0.74	9.0	7.8	70.0	13.5
1.0	1.4	1541	2132	0.75	5.7	7.4	35.7	7.5
1.0	3.0	1012	2982	0.34	5.5	5.5	30.0	7.1
1.0	5.0	1590	4770	0.38	7.5	9.5	66.0	13.4
2.0	1.4	2331	3686	0.63	7.4	8.0	51.3	10.6
2.0	3.0	4328	6306	0.69	6.6	7.4	67.5	14.0
2.0	5.0	2349	6867	0.34	5.5	6.7	37.5	7.3
3.0	3.0	6026	9071	0.66	6.4	6.9	60.0	11.6
3.0	4.0	3632	9252	0.39	9.5	10.0	85.0	16.4
3.0	5.0	6650	10029	0.67	7.6	8.8	60.8	12.8

ТАБЛИЦА 6. Результаты экспериментальных исследований максимальных нагрузок при резании включений по последовательной схеме при краевом перерезании

Параметр режима резания, см		Сила резания, Н		$\frac{Z_{\text{нII}}}{Z_{\text{нI}}}$	$\frac{\bar{Z}_{\text{нII}}}{\bar{Z}_{\text{нI}}}$	$\frac{Z_{\text{нI}}}{Z_{\text{нII}}}$	$\frac{\bar{Z}_{\text{нI}}}{\bar{Z}_{\text{нII}}}$
Толщина среза h	Ширина среза t	пиковая $Z_{\text{нI}}$	среднепиковая $\bar{Z}_{\text{нI}}$				
0.5	1.4	1211	885	1.14	1.02	0.88	0.98
0.5	3.0	1283	922	1.60	1.66	0.63	0.60
0.5	5.0	741	506	3.58	3.42	0.28	0.29
1.0	1.4	1373	1084	1.55	1.65	0.65	0.61
1.0	3.0	2096	1355	1.42	1.65	0.70	0.61
1.0	5.0	1952	1482	2.16	1.89	0.46	0.53
1.0	6.0	1988	1789	2.18	1.63	0.46	0.61
2.0	1.4	1970	1590	1.87	1.60	0.54	0.63
2.0	3.0	2711	2114	2.32	1.66	0.43	0.60
2.0	5.0	2132	1897	3.22	2.19	0.31	0.46
3.0	1.4	4084	2421	1.39	1.39	0.72	0.72
3.0	2.0	4734	3397	1.72	1.23	0.58	0.81
3.0	3.0	2945	2891	3.07	1.62	0.33	0.62
3.0	5.0	3740	2620	2.47	1.98	0.41	0.51
3.0	6.0	3253	2313	3.02	2.62	0.33	0.38

Анализ результатов исследований показал, что наибольший уровень максимальных нагрузок отмечается при центральном перерезании твердых включений (табл. 4, 5). В случаях вырыва включений из массива среднее значение отношения $Z_{\text{нIV}} / Z_{\text{нII}}$ составляет 0.62 (табл. 5), в случае краевого перерезания $Z_{\text{нI}} / Z_{\text{нII}}$ и $\bar{Z}_{\text{нI}} / \bar{Z}_{\text{нII}}$ — соответственно 0.5 и 0.6 (табл. 6).

При извлечении включения из массива пиковых нагрузок, близких по уровню к нагрузкам при I, II, III и IV видах взаимодействия, не наблюдалось. Это объясняется тем, что при подходе к включению резец, скалывая уголь перед ним, разрушает связь последнего с поверхностью включения, что снижает до минимума нагрузки на резце.

При III типе взаимодействия (касание резца с включением) уровень нагрузок на резце не превышает 0.3 от пиковых усилий при центральном перерезании включений, что объясняется малой толщиной среза по включению.

Определенный интерес представляет процесс вырыва твердых включений из разрушаемого угольного массива и возникающие при этом нагрузки. В случаях сильной связи включения с массивом максимальная нагрузка при таком типе взаимодействия резца с включениями зависит от размеров последних и физико-механических свойств разрушаемого угля. Возникающие при вырыве включений из массива пиковые нагрузки полностью расходятся на разрыв связи включений с углем и не превышают значений пиковых нагрузок, возникающих при центральном перерезании включений. Пиковые нагрузки на передней и задней гранях резца при вырыве твердых включений из угольного массива $Z_{\text{нIV}}$ и $Y_{\text{нIV}}$ имеют вид одиночных импульсов, причем продолжительность импульса нагрузки $Z_{\text{нIV}}$ несколько больше, чем продолжительность импульса $Y_{\text{нIV}}$. Такая структура формирования нагрузок свидетельствует о разрушении угольного массива, окружающего включение в момент его вырыва. Путь преобладающего действия $Z_{\text{нIV}}$

составляет в среднем 1–3 мм. После разрыва связи включения с углем при достижении максимального значения силы резания $Z_{\text{нIV}}$ продолжение действия нагрузки на переднюю грань резца приводит к проворачиванию включения в лунке с разрушением ее задней части и, как следствие, к вырыву включения. Поверхность, по которой происходит разрыв связи включения с угольным массивом, соответствует поверхности твердого включения в момент его вырыва $S_{\text{ц}}$. Если предположить, что по передней (ближней к резцу) части поверхности вырыва $S_{\text{ц}}$ на угольный массив действуют растягивающие усилия, а по задней — сжимающие усилия, то на двух элементарных симметричных площадках, лежащих на передней и задней частях поверхности $S_{\text{ц}}$, элементарные сопротивления вырыву можно представить в виде:

$$\begin{aligned}\overrightarrow{dR}_{\text{п}} &= \overrightarrow{\sigma}_r dS_{\text{ц,п}} \cos \alpha, \\ \overrightarrow{dR}_{\text{з}} &= \overrightarrow{\sigma}_r dS_{\text{ц,з}} \cos \alpha,\end{aligned}\quad (1)$$

где $\overrightarrow{dR}_{\text{п}}$, $\overrightarrow{dR}_{\text{з}}$ — элементарные сопротивления вырыву на выделенных элементарных площадках соответственно на передней $dS_{\text{ц,п}}$ и задней $dS_{\text{ц,з}}$ частях поверхностей сцепления; α — текущий угол между вектором сопротивления вырыву R и внешней силой, согласно предположению, что $R = Z_{\text{нIV}}$.

Интегрируя уравнение (1) по поверхности сцепления, получим

$$Z_{\text{нIV}} = S_{\text{оп}} (\sigma_r + \sigma_s). \quad (2)$$

Здесь $S_{\text{оп}}$ — опорная поверхность, расположенная перпендикулярно направлению вектора $\overrightarrow{Z}_{\text{нIV}}$ и ограниченная проекцией контура включения на плоскость, ортогональную вектору $\overrightarrow{Z}_{\text{нIV}}$, см; σ_r , σ_s — временные сопротивления растяжению и сжатию окружающего включение угольного массива, 10 Н/см². Площадь опоры включения и поверхности сцепления для включений преобладающей округлой и эллипсоидальной форм связаны выражением $S_{\text{оп}} \cong 0.25 S_{\text{ц}}$. Анализ экспериментальных данных, средние значения которых приведены в табл. 4, подтвердил наличие прямой корреляционной связи между $Z_{\text{нIV}}$ и $S_{\text{оп}}$ с коэффициентом корреляции $r=0.7$ при критерии Стьюдента $t = 5.9 > t_{\text{табл}} = 2.6$.

Рассмотрим, каким образом размеры твердых включений влияют на нагрузки при их вырыве из массива. Оценить размеры включения, которое не будет вырвано из угольного массива, а перерезано резцом, можно, приняв во внимание следующие соображения.

1. При встрече резца с крупным твердым включением, которое не вырывается из массива при сколе первого крупного элемента, формируются максимальные нагрузки [18], которые при последовательной схеме резания с достаточной точностью аппроксимируются выражениями:

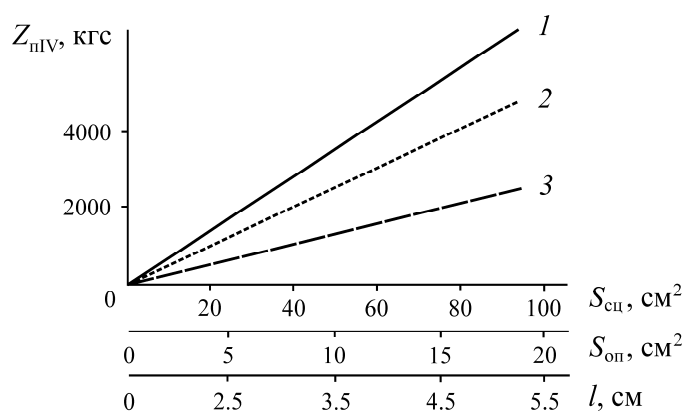
$$\begin{aligned}Z_{\text{нII}} &= \frac{650(1+3.4h)t}{t+1.8}, \quad \overline{Z}_{\text{нII}} = \frac{650(1+2h)t}{t+2.5}, \\ Y_{\text{нII}} &= \frac{1100(1+0.3h)t}{t+3.7}, \quad \overline{Y}_{\text{нII}} = \frac{960(1+0.3h)t}{t+3.4}.\end{aligned}\quad (3)$$

В тех случаях, когда размеры включения уменьшаются до определенного предела и после встречи резца с ним оно вырывается из угольного массива, сила резания $Z_{\text{нIV}}$ определяется по формуле (2). Результаты экспериментов показали, что даже в условиях сильной связи включений с угольным массивом, когда геометрические размеры включений близки к предельным,

при их вырыве соблюдается условие $Z_{\text{нIV}} \leq Z_{\text{нII}}$. Предположив, что вырыв включения все же может произойти при нагрузке $Z_{\text{нIV}} = Z_{\text{нII}}$, определим опорную поверхность включения $S_{\text{оп}}$, рассчитав по формуле (3) $Z_{\text{нII}}$ и приравняв ее к $Z_{\text{нIV}}$ из выражения (2).

2. В нашем случае σ_r и σ_s оценивают силу связи включений с угольным массивом. Согласно [19–21], σ_r и σ_s зависят от сопротивляемости угля резанию $A_{\text{уг}}$: чем выше $A_{\text{уг}}$, тем больше σ_r и σ_s , и тем выше связь включений с угольным массивом.

На рисунке показаны зависимости пиковых усилий резания $Z_{\text{нIV}}$ при вырыве включений от площади поверхностей сцепления $S_{\text{сц}}$ и опоры $S_{\text{оп}}$ включения при разных уровнях связи последних с угольным массивом. С увеличением длины включения l поверхности сцепления $S_{\text{сц}}$ и опоры $S_{\text{оп}}$ нагрузки $Z_{\text{нIV}}$ на резце закономерно возрастают: чем выше уровень связи включений с угольным массивом, тем выше общий уровень $Z_{\text{нIV}}$ на протяжении всего пути резания.



Взаимосвязь пиковых усилий резания при вырыве включений $Z_{\text{нIV}}$ с поверхностью их сцепления с угольным массивом $S_{\text{сц}}$, поверхностью опоры $S_{\text{оп}}$ и длиной l включений при сильной (1), нормальной (2), слабой (3) связи твердых включений с окружающим угольным массивом

3. В угольных пластах чаще всего встречаются твердые включения, длина и ширина которых примерно одинаковы, что обусловлено условиями образования их формы. Исходя из данного допущения, минимальный размер включения (длина / ширина), при котором оно не вырывается из угольного массива, а перерезается режущим инструментом, рассчитывается как

$$l_p = 1.13 \sqrt{S_{\text{оп}}} 1.13 \sqrt{\frac{Z_{\text{нII}}(Z_{\text{нIV}})}{\sigma_r + \sigma_s}}.$$

ВЫВОДЫ

Пиковые нагрузки на резце возникают в момент скола от твердого включения крупных элементов. Характер разрушения и формирование максимальных нагрузок зависят от минералогического типа включений — карбонатные и пиритные включения разрушаются несколькими сколами, карбонатно-пиритные, как правило, одним. В расчетах параметров исполнительных органов выемочных машин и трансмиссий к ним должны учитываться пиковые нагрузки, возникающие при центральном перерезании твердых включений, уровень которых превышает нагрузки при других видах взаимодействия резцов с включениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линник Ю. Н., Линник В. Ю., Воронова Э. Ю., Евстратов В. А., Цих А. Анализ структуры отказов шнеков очистных комбайнов // Уголь. — 2021. — № 4 (1141). — С. 20–24.
2. Хорешок А. А., Маметьев Л. Е., Цехин А. М., Борисов А. Ю. Актуальные вопросы использования дискового инструмента на рабочих органах проходческих комбайнов избирательного действия // Техника и технология горного дела. — 2021. — № 4 (15). — С. 40–63.
3. Мышковский М., Пашедаг У. Разработка длинными очистными забоями угольных пластов средней мощности. Сравнение эффективности струговой и комбайновой выемки в сопоставимых условиях эксплуатации, Caterpillar, Inc., 2015. — 51 с. <https://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10525855>.
4. Линник В. Ю., Линник Ю. Н., Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин Е. А. Нормирование расхода резцов угледобывающих комбайнов в зависимости от условий эксплуатации // Уголь. — 2019. — № 12. — С. 26–30.
5. Krauze K., Mucha K., Wydro T., and Pieczora E. Functional and operational requirements to be fulfilled by conical picks regarding their wear rate and investment costs, Energies, 2021, Vol. 14, Issue 12. — 3696.
6. Габов В. В., Задков Д. А., Нгуен Ван Суан, Хамитов М. С., Молчанов В. В. К проблеме совершенствования рабочего инструмента горных выемочных машин // ГИАБ. — 2022. — № 6-2. — С. 205–222.
7. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б. Контроль технического состояния исполнительного органа выемочных машин // Горн. журн. — 2018. — № 1. — С. 107–113.
8. Линник Ю. Н., Жабин А. Б., Цих А. Закономерности влияния надежности исполнительных органов и свойств угольных пластов на производительность очистных комбайнов // ГИАБ. — 2021. — № 11. — С. 169–180.
9. Шишлянников Д. И., Иванов С. Л., Звонарев И. Е., Зверев В. Ю. Повышение эффективности применения выемочных и транспортирующих машин комбайновых комплексов калийных рудников // ГИАБ. — 2020. — № 9. — С. 116–124.
10. Cheluszka P., Mikula S., and Mikula J. Conical picks of mining machines with increased utility properties — selected construction and technological aspects, Acta Montanistica Slovaca, 2021, Vol. 26, No. 2. — P. 195–204.
11. Позин Е. З., Кунтыш М. Ф. К методике комплексной оценки разрушаемости угольных пластов инструментами // Проблемы горного дела. — М.: Недра, 1974. — С. 279–286.
12. Кунтыш М. Ф., Баронская Э. И. Методы оценки свойств угольных пластов сложного строения. — М.: Наука, 1980. — 142 с.
13. Берон А. И., Казанский А. С., Лейбов Б. М., Позин Е. З. Резание угля. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 469 с.
14. Позин Е. З., Кунтыш М. Ф., Тон В. В., Хургин З. Я., Бурдин В. Е. Основные принципы моделирования процесса резания угольных пластов, содержащих твердые включения // ФТПРПИ. — 1974. — № 2. — С. 50–55.
15. Албул И. Н. Характер разрушения и максимальные нагрузки при резании твердых включений инструментами // Физико-технические методы разрушения горных пород и углей. Научные сообщения ИГД им. А. А. Скочинского. — 1976. — Вып. 140. — С. 34–39.

16. **Guo Jingna, Liu Jiang Feng, Qiang Li, and Xu Chen.** Variation law of coal permeability under cyclic loading and unloading, *Thermal Sci.*, 2019, Vol. 23, No. 3, Part A. — P. 1487–1494.
17. **Шер Е. Н.** Численная оценка сопротивления внедрению клиновидного инструмента в хрупкий породный массив с учетом равновесного развития магистральной трещины // ФТПРПИ. — 2021. — № 6. — С. 85–94.
18. **Габов В. В., Задков Д. А., Нгуен К. Л.** Особенности формирования элементарных сколов в процессе резания углей и изотропных материалов эталонным резцом горных машин // Зап. Горн. ин-та. — 2019. — Т. 236. — С. 153–161.
19. **Bai X., Wang D. K., and Tian F. C.** Permeability model of damaged coal under triaxial stress loading-unloading, *Chin. J. Rock Mech. Eng.*, 2021, Vol. 40, No. 8. — 1536.
20. **Wang Tuo, Zhanguo Ma, Gong Peng, and Ning Li.** Analysis of failure characteristics and strength criterion of coal-rock combined body with different height ratios, *Adv. Civ. Eng.*, 2020, Vol. 2020. — 8842206.
21. **Жабин А. Б., Поляков А. В., Аверин А. Е., Линник Ю. Н., Линник В. Ю.** Пути развития теории разрушения углей и горных пород резцовым инструментом // Уголь. — 2019. — № 9. — С. 24–28.

Поступила в редакцию 10/I 2024

После доработки 22/II 2024

Принята к публикации 17/V 2024