

УДК 622-1/-9, 622.023

**ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЗАНИЯ И РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
НА НАГРУЗКИ ПРИ РАЗРУШЕНИИ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ
В УГОЛЬНЫХ ПЛАСТАХ**

В. Ю. Линник, Ю. Н. Линник

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

Выполнены экспериментальные исследования по установлению влияния параметров резания и режущего инструмента на нагрузки при разрушении твердых включений. Установлено, что при центральном прорезании твердых включений максимальные нагрузки на резце зависят от толщины и ширины среза, а также схемы резания и не зависят от скорости резания. Увеличение ширины режущей части резца способствует росту пиковых и среднепиковых сил резания и подачи, тогда как боковые нагрузки при резании твердых включений резцами с плоской передней гранью зависят лишь от толщины стружки. На величину пиковых усилий подачи существенно влияет форма режущей кромки резца, а на усилия резания — угол резания. Уменьшение угла клина передней грани резца приводит к снижению пиковых усилий резания и подачи, тогда как боковые силы возрастают.

Резание, твердые включения, пиковые силы резания, толщина и ширина среза, схема и скорость резания, форма режущей кромки и передней грани резца, угол резания

DOI: 10.15372/FTPRPI20240407
EDN: LWRLKP

Расчеты по выбору параметров угледобывающих машин, в том числе трансмиссий к их исполнительным органам, не в полной мере учитывают максимальные нагрузки, возникающие на резцах при разрушении ими крупных твердых включений, что приводит к существенным ограничениям при выемке пластов сложного строения. Наличие в угольных пластах Кузбасса крупных твердых включений снижает надежность исполнительных органов выемочных машин, трансмиссий к ним и повышает расход режущего инструмента [1–6]. В [7] отмечается, что работа выемочного комбайна с износом резцов приводит к потере 18–25 % его производительности. В [8, 9] установлены экспериментальные зависимости потребляемой комбайном мощности и энергоемкости выемки угля от числа отказавших резцов, с увеличением которого энергозатраты и мощность возрастают по нелинейной зависимости. Аналогичные результаты получены в [10, 11] при работе очистных комбайнов на калийных рудниках и в угольных шахтах.

В научном плане речь идет о закономерностях формирования нагрузки при резании твердых включений в зависимости от параметров резания и режущего инструмента, в практическом — использование полученных результатов в расчетах на прочность режущего инструмента и элементов трансмиссий при проектировании угледобывающих машин. Для исследования влияния параметров резания и режущего инструмента на максимальные нагрузки проведены эксперименты по резанию углещементных блоков, в которые при заливке в произвольном порядке размещались различные по размерам карбонатные включения, характерные для пластов Кузнецкого угольного бассейна. Эксперименты проводились на продольно-строгательном станке. Возникающие на резце в процессе резания твердых включений усилия регистрировались трехкомпонентным динамометром на тензометрических столбах, сигналы с которого поступали на осциллограф и записывались на ленту. Резание осуществлялось по последовательной и шахматной схемам радиальными резцами с разными геометрическими параметрами режущей части.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ШИРИНЫ СРЕЗА НА НАГРУЗКИ ПРИ ЦЕНТРАЛЬНОМ ПРОРЕЗАНИИ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Рассмотрим результаты исследований, полученные при центральном перерезании твердых включений при резании по последовательной схеме (рис. 1). Исследования влияния толщины стружки h на усилия резания показали, что с увеличением h пиковые и среднениковые значения усилий резания ($Z_{\text{пц}}$, $\bar{Z}_{\text{пц}}$), подачи ($Y_{\text{пц}}$, $\bar{Y}_{\text{пц}}$) и боковых ($X_{\text{пц}}$, $\bar{X}_{\text{пц}}$) прямолинейно возрастают, что не противоречит методике расчета максимальных нагрузок в отраслевом стандарте ОСТ 24.070.17-70 [12]. Однако данный стандарт не учитывает влияние ширины стружки (среза) t на максимальные нагрузки при перерезании твердых включений.

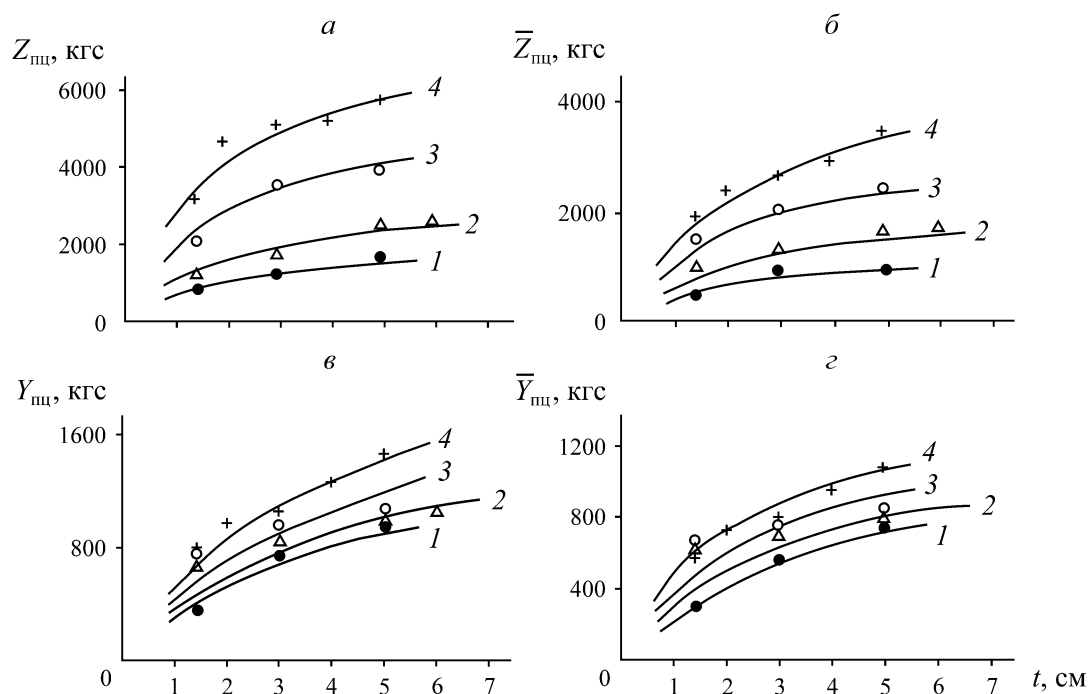


Рис. 1. Зависимость усилий резания пиковых $Z_{\text{пц}}$ (а) и среднениковых $\bar{Z}_{\text{пц}}$ (б), усилий подачи пиковых $Y_{\text{пц}}$ (в) и среднениковых $\bar{Y}_{\text{пц}}$ (г) от ширины среза t при центральном перерезании твердых включений с толщиной среза $h=0.5$ (1), 1.0 (2), 2.0 (3) и 3.0 см (4)

Установлено, что при увеличении t :

- пиковые и среднепиковые усилия резания нелинейно возрастают. С учетом влияния на них толщины стружки это свидетельствует о том, что определяющим фактором при формировании максимальных нагрузок при резании твердых включений является сечение среза. При ширине среза t , близкой к ширине режущей части резца b , наблюдается интенсивное нарастание пиковой $Z_{\text{п}}$ и среднепиковой $\bar{Z}_{\text{п}}$ сил резания, а при дальнейшем нарастании t значения усилий на резце стабилизируются (рис. 1а, б). Такой характер изменения $Z_{\text{п}}$ и $\bar{Z}_{\text{п}}$ объясняется тем, что с изменением ширины стружки изменяется форма сечения среза: при небольшой ширине среза ($t \approx b$) осуществляется полусвободное резание твердого включения практически при двух поверхностях обнажения. Дальнейшее увеличение t приводит к образованию между соседними резами чечиков, размеры которых возрастают с увеличением шага резания, уменьшая тем самым влияние предыдущих резов;

- с увеличением t пиковые и среднепиковые усилия подачи нелинейно возрастают (рис. 1в, г), являясь непосредственным следствием увеличения площади контакта задней грани резца с твердым включением. Анализируя данные отношений $Y_{\text{п}} / Z_{\text{п}}$ и $\bar{Y}_{\text{п}} / \bar{Z}_{\text{п}}$ при различной ширине среза t , видно, что увеличение t существенно не сказывается на величинах рассматриваемых отношений (табл. 1). С увеличением h пиковые и среднепиковые усилия подачи возрастают медленнее, чем пиковые и среднепиковые усилия резания, о чем свидетельствует уменьшение значений их отношений в функции от толщины среза (рис. 2);

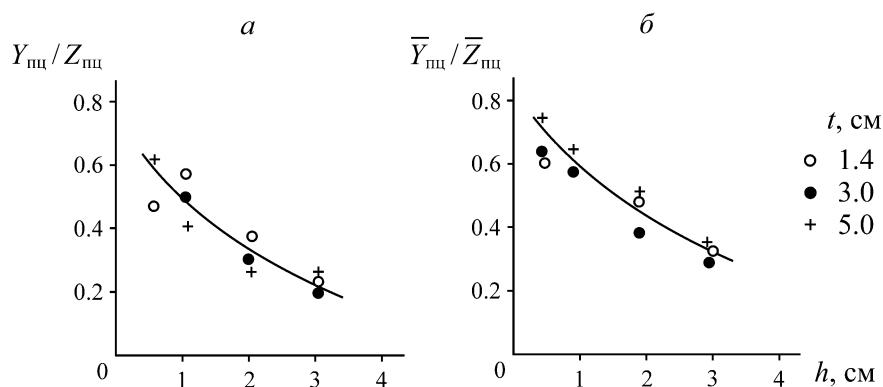


Рис. 2. Зависимость отношений пиковых усилий подачи и резания $Y_{\text{п}} / Z_{\text{п}}$ (а) и среднепиковых усилий подачи и резания $\bar{Y}_{\text{п}} / \bar{Z}_{\text{п}}$ (б) от толщины среза h при центральном перерезании твердых включений с шириной среза 1.4, 3.0 и 5.0 см

- пиковые $X_{\text{п}}$ и среднепиковые $\bar{X}_{\text{п}}$ боковые силы резания возрастают с увеличением h , однако уровень их значений существенно ниже по сравнению с другими составляющими усилий, действующих на резец при резании твердых включений. Незначительный рост боковых усилий в этом случае связан с увеличением высоты контакта резца с материалом включения при возрастании толщины стружки. Наибольшее значение $X_{\text{п}}$ наблюдается при $h = 3$ см и $t = 1.4$ см (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Результаты экспериментальных исследований максимальных нагрузок при резании карбонатных включений по последовательной схеме при центральном перерезании

h	t	$Z_{\text{пц}}$	$\bar{Z}_{\text{пц}}$	$k_{Z_{\text{пц}}}$	$k_{\bar{Z}_{\text{пц}}}$	$Y_{\text{пц}}$	$\bar{Y}_{\text{пц}}$	$k_{Y_{\text{пц}}}$	$k_{\bar{Y}_{\text{пц}}}$	$X_{\text{пц}}$	$\bar{X}_{\text{пц}}$	$k_{X_{\text{пц}}}$	$k_{\bar{X}_{\text{пц}}}$	$\frac{Y_{\text{пц}}}{Z_{\text{пц}}}$	$\frac{\bar{Y}_{\text{пц}}}{\bar{Z}_{\text{пц}}}$
0.5	1.4	770	500	28.0	2.5	350	300	26.8	25.8	110	90	38.3	18.2	0.47	0.60
0.5	3.0	1140	850	41.0	32.0	740	540	23.4	20.9	160	100	30.5	38.5	0.65	0.64
0.5	5.0	1470	960	38.0	21.0	910	720	31.5	44.2	180	110	24.0	25.9	0.62	0.75
1.0	1.4	1180	990	25.5	13.9	670	610	30.6	26.6	270	160	42.5	51.9	0.57	0.62
1.0	3.0	1650	1240	24.9	26.6	830	710	22.1	25.7	260	140	41.8	27.1	0.50	0.57
1.0	5.0	2340	1550	49.7	30.5	930	770	44.6	35.1	300	210	77.1	87.9	0.40	0.50
1.0	6.0	2400	1620	21.3	19.2	1000	810	26.3	21.2	330	200	63.1	52.7	0.42	0.50
2.0	1.4	2040	1410	24.8	28.0	760	660	15.1	17.2	380	190	38.2	65.1	0.37	0.47
2.0	3.0	3490	1950	30.6	14.9	970	720	40.7	44.3	460	300	51.5	63.1	0.29	0.37
2.0	5.0	3800	2300	27.3	29.2	1030	820	17.5	29.0	410	200	52.6	74.6	0.27	0.35
3.0	1.4	3150	1870	45.6	29.4	6900	580	33.3	31.4	600	360	44.7	59.1	0.22	0.31
3.0	2.0	4530	2330	26.2	12.7	980	730	28.2	21.8	350	210	54.9	61.2	0.21	0.31
3.0	3.0	5020	2600	43.6	27.6	1040	760	36.6	43.8	580	430	40.9	40.7	0.20	0.29
3.0	5.0	5120	2880	28.5	24.1	1260	960	36.0	44.9	530	300	63.4	71.3	0.25	0.33
3.0	6.0	5550	3360	19.0	18.3	1430	1070	28.2	21.8	480	480	43.3	38.5	0.26	0.32

Примечание. h — толщина среза, см; t — ширина среза, см; k — коэффициент вариации; $Z_{\text{пц}}$, $\bar{Z}_{\text{пц}}$ — сила резания пиковая и среднениковая, кгс; $Y_{\text{пц}}$, $\bar{Y}_{\text{пц}}$ — сила подачи пиковая и среднениковая, кгс; $X_{\text{пц}}$, $\bar{X}_{\text{пц}}$ — боковая сила пиковая и среднениковая, кгс.

ВЛИЯНИЕ ТОЛЩИНЫ И ШИРИНЫ СРЕЗА НА НАГРУЗКИ ПРИ КРАЕВОМ ПРОРЕЗАНИИ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Краевое прорезание твердых включений сопутствует их центральному прорезанию при работе исполнительного органа выемочного комбайна. При таком типе взаимодействия реза с твердым включением резание последнего осуществляется по его краевой зоне. Ширина реза всегда близка к ширине режущей части реза ($t \approx b$), поэтому на уровень нагрузок на резец влияет лишь толщина стружки h . С увеличением h пиковые и среднениковые усилия резания, подачи и боковые закономерно возрастают. Если характер поведения зависимостей $Z_{\text{пк}}$, $\bar{Z}_{\text{пк}} = f(h)$ примерно такой же, как и у зависимостей применительно к центральному прорезанию твердых включений (см. рис. 1), то при краевом прорезании твердых включений боковые усилия $X_{\text{пк}}$ и $\bar{X}_{\text{пк}}$ резко возрастают с увеличением h (рис. 3, табл. 2).

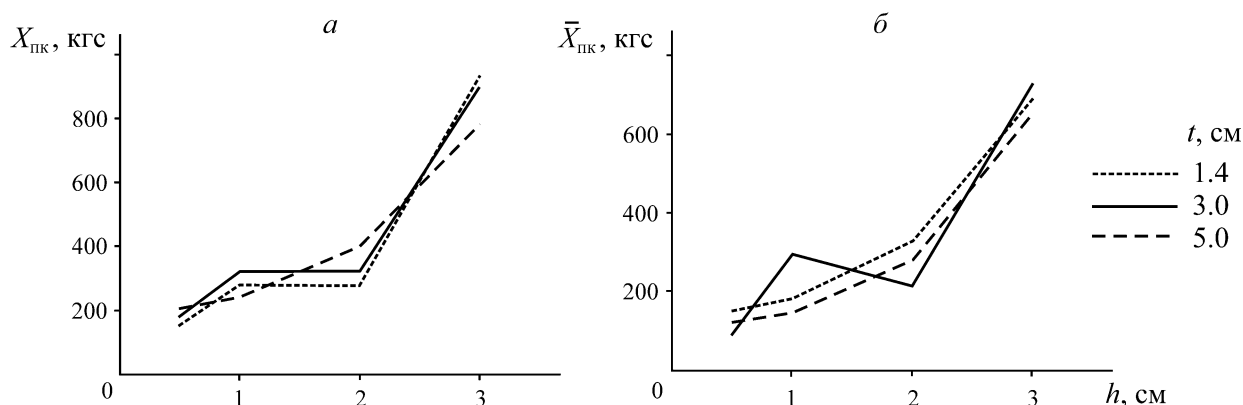


Рис. 3. Зависимость пиковых $X_{\text{пк}}$ и среднениковых $\bar{X}_{\text{пк}}$ боковых усилий от толщины среза h при краевом прорезании твердых включений с разной шириной среза

ТАБЛИЦА 2. Результаты экспериментальных исследований максимальных нагрузок при резании включений по последовательной схеме при краевом прорезании

h	t	$Z_{\text{пк}}$	$\bar{Z}_{\text{пк}}$	$Y_{\text{пк}}$	$\bar{Y}_{\text{пк}}$	$X_{\text{пк}}$	$\bar{X}_{\text{пк}}$	$\frac{Z_{\text{пц}}}{Z_{\text{пк}}}$	$\frac{\bar{Z}_{\text{пц}}}{\bar{Z}_{\text{пк}}}$	$\frac{Y_{\text{пц}}}{Y_{\text{пк}}}$	$\frac{\bar{Y}_{\text{пц}}}{\bar{Y}_{\text{пк}}}$	$\frac{X_{\text{пц}}}{X_{\text{пк}}}$	$\frac{\bar{X}_{\text{пц}}}{\bar{X}_{\text{пк}}}$	$\frac{Z_{\text{пк}}}{Z_{\text{пц}}}$	$\frac{\bar{Z}_{\text{пк}}}{\bar{Z}_{\text{пц}}}$
0.5	1.4	670	490	250	190	180	100	1.14	1.02	1.40	1.57	1.62	1.11	0.88	0.98
0.5	3.0	710	510	520	390	170	120	1.60	1.66	1.42	1.38	1.06	1.20	0.63	0.60
0.5	5.0	410	280	440	320	190	110	3.58	3.42	2.06	2.25	1.05	1.00	0.28	0.29
1.0	1.4	760	600	550	440	310	280	1.55	1.65	1.21	1.38	1.14	1.75	0.65	0.61
1.0	3.0	1160	750	660	560	270	180	1.42	1.65	1.25	1.26	1.03	1.28	0.70	0.61
1.0	5.0	1080	820	450	390	250	160	2.16	1.89	2.06	1.97	0.83	0.76	0.46	0.53
1.0	6.0	1100	990	480	450	290	240	2.18	1.63	2.08	1.80	0.87	1.20	0.46	0.61
2.0	1.4	1090	880	590	450	310	220	1.87	1.60	1.28	1.46	0.81	1.15	0.54	0.63
2.0	3.0	1500	1170	660	580	280	330	2.32	1.66	1.46	1.24	0.60	1.10	0.43	0.60
2.0	5.0	1180	1050	630	420	400	270	3.22	2.19	1.63	1.95	0.97	1.35	0.31	0.46
3.0	1.4	2260	1340	960	780	880	770	1.39	1.39	0.71	0.74	1.46	2.13	0.72	0.72
3.0	2.0	2620	1880	850	760	1130	820	1.72	1.23	1.15	0.96	3.22	3.90	0.58	0.81
3.0	3.0	1630	1600	870	690	900	690	3.07	1.62	1.19	1.10	1.55	1.60	0.33	0.62
3.0	5.0	2070	1450	920	720	870	700	2.47	1.98	1.36	1.33	1.64	2.33	0.41	0.51
3.0	6.0	1800	1280	650	560	790	680	3.02	2.62	2.20	1.91	2.07	1.41	0.33	0.38

Примечание. h — толщина среза, см; t — ширина среза, см; $Z_{\text{пк}}$, $\bar{Z}_{\text{пк}}$ — сила резания пиковая и среднепиковая, кгс; $Y_{\text{пк}}$, $\bar{Y}_{\text{пк}}$ — сила подачи пиковая и среднепиковая, кгс; $X_{\text{пк}}$, $\bar{X}_{\text{пк}}$ — боковая сила пиковая и среднепиковая, кгс.

Сравним пиковые нагрузки, возникающие на резце при краевом прорезании твердых включений с соответствующими им по режиму резания нагрузками, возникающими при центральном прорезании включений. Анализ отношений $Z_{\text{пц}} / Z_{\text{пк}}$, $\bar{Z}_{\text{пц}} / \bar{Z}_{\text{пк}}$, $Y_{\text{пц}} / Y_{\text{пк}}$, $\bar{Y}_{\text{пц}} / \bar{Y}_{\text{пк}}$ показал, что пиковые усилия резания и подачи ($Z_{\text{пц}}$, $Y_{\text{пц}}$) при центральном прорезании твердых включений в 2.2 и 1.5 раза выше по сравнению с пиковыми усилиями резания и подачи ($Z_{\text{пк}}$, $Y_{\text{пк}}$) при краевом прорезании включений (табл. 2). Отношения среднепиковых усилий резания $\bar{Z}_{\text{пц}} / \bar{Z}_{\text{пк}}$ и подачи $\bar{Y}_{\text{пц}} / \bar{Y}_{\text{пк}}$ при центральном и краевом прорезании включений показали примерно такие же значения (в 1.8 и 1.5 раза соответственно). Что касается боковых нагрузок ($X_{\text{пк}}$, $\bar{X}_{\text{пк}}$), то при краевом прорезании включений они в 1.3 и 1.6 раза выше соответствующих нагрузок ($X_{\text{пц}}$, $\bar{X}_{\text{пц}}$) при центральном прорезании включений.

Рассмотрим, как на формирование максимальных нагрузок при резании твердых включений влияют схемы резания. Исследования проводились при резании карбонатных включений по последовательной и шахматной схемах. В обоих случаях толщина и ширина среза постоянны: $h = 2$ см, $t = 4.5$ см. Опыты проводились при центральном и краевом прорезании твердых включений. Усредненные по более 20 опытам результаты экспериментов приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты экспериментальных исследований влияния схемы резания на силовую нагруженность резца при резании твердых включений

Схема резания	Вид прорезания включений	Сила резания, кгс		Сила подачи, кгс		Боковая сила, кгс	
		пиковая	среднепиковая	пиковая	среднепиковая	пиковая	среднепиковая
Последовательная	Центральное	3210	1770	790	620	490	250
Шахматная	>>	3790	1950	820	590	350	290
Последовательная	Краевое	1760	1100	510	430	680	410
Шахматная	>>	1610	1010	590	400	710	540

Анализ полученных экспериментальных данных показал:

— максимальные пиковые и среднепиковые силы резания при центральном прорезании твердых включений ($Z_{\text{пц}}$, $\bar{Z}_{\text{пц}}$) по шахматной схеме выше в 1.18 и 1.10 раза соответственно по сравнению с резанием по последовательной схеме. Незначительная разница в усилиях резания объясняется тем, что при резании твердых включений по шахматной схеме ввиду конечных (малых) размеров включений относительно окружающего угольного массива преимущества данной схемы реализуются не в полной мере;

— изменение схемы резания не влияет на максимальные силы подачи и боковые нагрузки при центральном прорезании твердых включений, поскольку независимо от схемы резания площадь контакта резца по задней грани и высота контакта по боковым режущим кромкам остаются неизменными;

— при краевом прорезании твердых включений изменение схемы резания не влияет на максимальные силы резания $Z_{\text{пк}}$, $\bar{Z}_{\text{пк}}$, подачи $Y_{\text{пк}}$, $\bar{Y}_{\text{пк}}$ и боковые $X_{\text{пк}}$, $\bar{X}_{\text{пк}}$, что объясняется неизменностью ориентации резца относительно включений.

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ РЕЗАНИЯ НА ХАРАКТЕР РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Анализ публикаций, посвященных стендовым и шахтным исследованиям влияния скорости резания на процесс разрушения углей и горных пород, весьма противоречив. В зависимости от условий резания при увеличении скорости резания в одних работах отмечается уменьшение силы резания, в других — увеличение, в некоторых — постоянство нагрузок при резании. Исследования процессов разрушения крепких горных пород при динамическом нагружении [13, 14] показали, что при изменении скорости резания от 0 до 10 м/с средние усилия резания изменяются незначительно. Поскольку указанные исследования выполнялись на образцах угля и горных пород, для проверки сделанных выводов проведены эксперименты с твердыми включениями тех типов, которые чаще всего встречаются в угольных пластах. Как известно, физико-механические свойства горных пород, в том числе твердых включений, даже в пределах одного минералогического состава значительно разнятся. Поэтому оценка влияния скорости резания на нагрузки при резании осуществлялась на одном образце крупного твердого включения с неизменяемыми свойствами. Технические возможности продольно-строговательного станка, на котором выполнялись эксперименты, позволили изменять скорость подачи стола от 0.10 до 1.25 м/с. Такое почти десятикратное изменение скорости резания V_r позволило исследовать влияние V_r на пиковые усилия резания $Z_{\text{пц}}$ и длины сколов $l_{\text{ски}}$ отдельных крупных элементов твердого включения в широком диапазоне изменения скоростей резания. Эксперименты проводились при трех фиксированных скоростях резания 0.1, 0.8 и 1.2 м/с.

Анализ полученных экспериментальных данных показал:

- амплитуда пиковых сил резания $Z_{\text{пц}}$ практически не зависит от скорости резания в рассмотренном диапазоне скоростей резания;

- длина пути до сколов отдельных крупных элементов твердого включения при $V_r = 0.8$ м/с в 1.5 раза больше, чем при $V_r = 1.2$ м/с, при этом длины самих сколов $l_{\text{ски}}$ при $V_r = 0.8$ и 1.2 м/с практически совпадают. Полагаем, что при $V_r > 0.8$ м/с пиковые силы резания $Z_{\text{пц}}$ остаются на одинаковом уровне, а длина пути до сколов крупных элементов твердого включения с увеличением скорости резания стабилизируется, асимптотически приближаясь к постоянной величине.

При прорезании твердых включений установлены взаимосвязи между длиной пути резания до скола первого крупного элемента твердого включения l_{cki} и пиковой силой резания $Z_{пц}$ (рис. 4а), а также среднего пути резания \bar{l}_{ck} , проходимого резцом до скола i -го элемента включения, и среднепиковой силой резания $\bar{Z}_{пц}$ (рис. 4б), которые аппроксимируются (коэффициент корреляции $r=0.7$) следующими эмпирическими выражениями:

$$l_{cki} = \frac{2.78Z_{пц}}{5000 + Z_{пц}}, \quad \bar{l}_{ck} = \frac{3.88\bar{Z}_{пц}}{6400 + \bar{Z}_{пц}}.$$

Установлено, что средняя длина промежутка между соседними сколами элементов твердого включения l_0 в 2–4 раза превышает средний путь до скола его крупных элементов \bar{l}_{ck} . Общая длина пути резца, на которой проявляется среднепиковая нагрузка $L_{п.ck}$, определяется как

$$L_{п.ck} = \bar{l}_{ck} n_{ck} + l_0 (n_{ck} - 1) \approx \bar{l}_{ck} (4n_{ck} - 3),$$

где n_{ck} — число сколов при прорезании твердого включения.

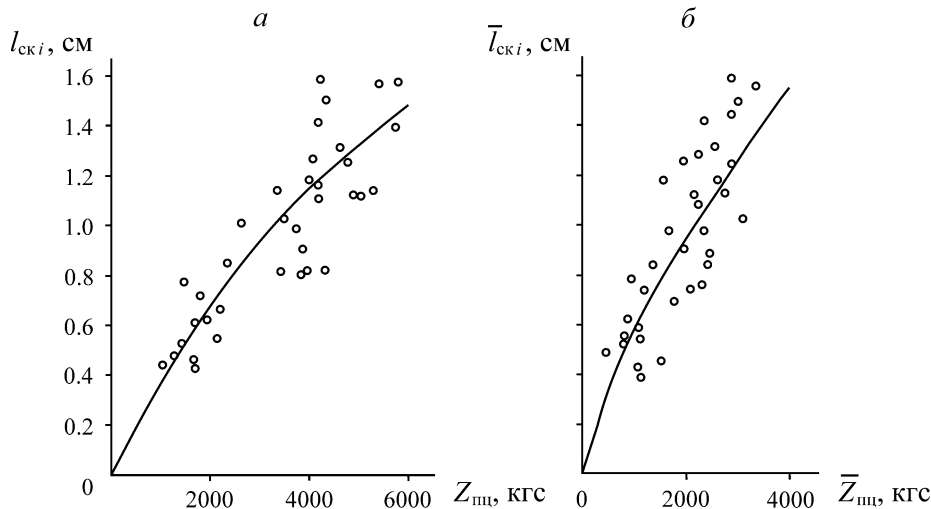


Рис. 4. Взаимосвязь между длиной пути резания до скола первого крупного элемента твердого включения l_{cki} и пиковой силой резания $Z_{пц}$ (а) и средней длиной пути резания \bar{l}_{ck} , проходимого резцом до скола i -го элемента включения, и среднепиковой силой резания $\bar{Z}_{пц}$ (б)

В расчетах, связанных с установлением влияния пиковых сил резания на долговечность режущего инструмента и элементов трансмиссий угледобывающих комбайнов, важное значение имеет продолжительность действия максимальных нагрузок при прорезании твердых включений. Продолжительность действия максимальных пиковых сил резания равна

$$t_{п1} = \frac{l_{cki}}{100V_r},$$

продолжительность действия среднепиковой силы резания —

$$T_{п.ck} = \frac{L_{п.ck}}{100V_r}.$$

Значения максимальных нагрузок, соответствующих моментам скалывания крупных элементов материала твердых включений, существенно изменяются даже при постоянных толщинах и шагах резания. Для характеристики изменения пиковых и среднепиковых нагрузок при исследовании любого из факторов, влияющих на их значение, принят коэффициент вариации. Установлено, что с увеличением $Z_{\text{пц}}$ и $\bar{Z}_{\text{пц}}$ наблюдается тенденция снижения их коэффициентов вариации.

Зависимость коэффициента вариации пиковых $Z_{\text{пц}}$ и среднепиковых $\bar{Z}_{\text{пц}}$ усилий при резании твердых включений от их абсолютных значений определяется как

$$v_{\text{ск}} = \frac{1100}{Z + 500} + 0.13,$$

где Z — абсолютные значения пиковых или среднепиковых сил резания.

При проведении экспериментов отмечено, что несмотря на общую тенденцию снижения $Z_{\text{пц}}$ и $\bar{Z}_{\text{пц}}$, при их больших значениях наблюдались отдельные высокие коэффициенты вариации. Полагаем, что в реальных условиях эксплуатации угледобывающих комбайнов с увеличением силовой нагруженности режущего инструмента при больших толщинах среза твердого включения появление отдельных пиковых значений максимальных нагрузок весьма вероятно. Поэтому в практических расчетах, связанных с определением требуемой надежности и долговечности резцов и элементов трансмиссий комбайнов, полученные расчетным путем значения пиковых и среднепиковых нагрузок необходимо увеличивать как минимум на $2v_{\text{ск}}$, что повысит надежность прочностных расчетов.

ВЛИЯНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ РЕЗЦОВ НА НАГРУЗКИ ПРИ РЕЗАНИИ ТВЕРДЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ

Экспериментальные исследования проводились при резании углещементных блоков с карбонатными твердыми включениями. Зачетными считались резы, выполненные при центральном перерезании твердых включений. Целью экспериментов являлось установление влияния на максимальные нагрузки ширины режущей части резца, формы его режущей кромки и передней грани, а также угла резания. При определении влияния каждого из этих параметров остальные были неизменными. Исследованиями охвачен весь диапазон изменения параметров как серийно выпускаемых резцов, так и вновь проектируемых образцов.

Влияние ширины режущей части резца b . Эксперименты проводились с резцами, ширина режущей части которых составляла 1.1, 1.4, 2.0 и 2.5 см при разрушении включений с различными параметрами схем резания (толщиной стружки h и шагом резания t). Выявлено, что с увеличением b при постоянных h и t пиковые $Z_{\text{пц}}$ и среднепиковые $\bar{Z}_{\text{пц}}$ усилия резания прямолинейно возрастают (рис. 5). Анализ показал, как влияют на нагрузки изменения параметров схемы резания: толщина стружки h и шаг резания t определяют общий уровень силовой нагруженности резца при принятом сечении среза, рост $Z_{\text{пц}}$ и $\bar{Z}_{\text{пц}}$ происходит за счет дополнительного увеличения площади сечения стружки с ростом ширины режущей части резца b . Согласно данным экспериментов, с ростом ширины режущей части резца при одинаковых режимах резания увеличиваются пиковые $Y_{\text{пц}}$ и среднепиковые $\bar{Y}_{\text{пц}}$ усилия подачи. Причем характер зависимостей $Y_{\text{пц}}$, $\bar{Y}_{\text{пц}} = f(b)$ такой же, как и у пиковых усилий резания.

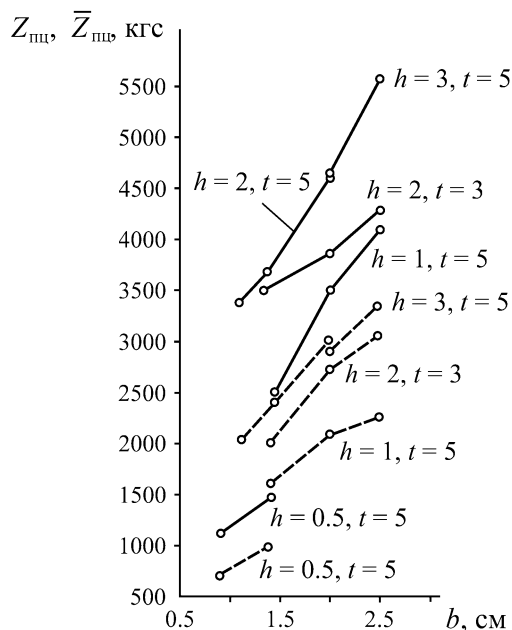


Рис. 5. Зависимость максимальных пиковых $Z_{пц}$ и среднепиковых $\bar{Z}_{пц}$ усилий резания от ширины режущей части резца b при различных значениях толщины стружки h и шага резания t : $Z_{пц}$ — сплошные линии; $\bar{Z}_{пц}$ — штриховые

Уровень боковых нагрузок $X_{пц}$, $\bar{X}_{пц}$ с увеличением b не изменяется при прочих неизменных параметрах, а увеличивается с ростом толщины стружки h , что подтверждают результаты исследований [15–19].

Влияние формы режущей кромки резца. Наиболее существенное влияние форма режущей части оказывает на пиковые нагрузки в направлении подачи (табл. 4). Об этом свидетельствует сравнение данных о пиковых $Y_{пц}$ и среднепиковых $\bar{Y}_{пц}$ усилиях подачи, возникающих с одной стороны на резцах с прямоугольной и овальной режущей кромками, с другой — с треугольной. Видно, что $Y_{пц}$ и $\bar{Y}_{пц}$ в первом случае почти в 2 раза выше, чем во втором. Снижение максимальных усилий подачи при резании включений резцами с треугольной режущей кромкой связано со снижением высоты контакта резца с разрушаемым материалом.

ТАБЛИЦА 4. Результаты экспериментальных исследований силовой нагруженности резцов с различными формами режущей кромки, кгс

Форма режущей кромки	Параметры схемы резания		Сила резания		Сила подачи	
	Толщина стружки, см	Шаг резания, см	пиковая	среднепиковая	пиковая	среднепиковая
Прямоугольная	2.0	5.0	3860	2400	1200	970
Овальная	0.5		1470	960	910	720
	1.0		2340	1550	930	770
	2.0		3800	2300	1030	820
Треугольная	0.5		1050	720	440	310
	1.0		1860	1150	560	380
	2.0		3770	2250	720	530

Влияние угла резания δ . Влияние δ на силовую нагруженность резцов при резании углей и горных пород широко изучено. Особого внимания заслуживают исследования [18–22]. Большинство экспериментов проводилось в диапазоне $\delta = 50–90^\circ$. В публикациях отмечалось возрастание усилий резания с увеличением δ как при разрушении углей, так и горных пород. Аналогичные исследования при резании твердых включений не проводились.

Результаты экспериментальных исследований по изучению влияния угла резания δ на силовую нагруженность резцов при разрушении карбонатных включений указали (табл. 5) на существенное влияние δ на пиковые и среднениковые усилия резания, в то время как пиковые и среднениковые значения сил подачи изменяются незначительно. Выявленный характер изменения пиковых нагрузок в функции от угла резания при резании твердых включений хорошо согласуется с результатами исследований при резании угля и горных пород [18, 19], что свидетельствует об отсутствии влияния объекта разрушения на закономерности изменения нагруженности резцов; изменяется только уровень максимальных нагрузок при переходе от резания угля к породе и твердому включению.

ТАБЛИЦА 5. Результаты экспериментальных исследований силовой нагруженности резцов с разными углами резания δ , кгс

δ , град	Параметры схемы резания		Сила резания		Сила подачи	
	Толщина стружки, см	Шаг резания, см	пиковая	среднениковая	пиковая	среднениковая
86	2	5	4700	2810	1490	1050
75			4050	2510	1680	1290
65			3600	2190	1370	1150

Влияние формы передней грани резцов. В [23, 24] по оценке влияния формы передней грани резца на нагруженность резцов при резании угля и горных пород выявлено, что резцы с передними гранями, ориентированными не перпендикулярно вектору скорости резания, разрушают угольный массив более эффективно. Это объяснялось уменьшением энергозатрат на прессование продуктов разрушения в подрезцовом пространстве благодаря увеличению расстояния между опережающими и отстающими режущими кромками и улучшению условий эвакуации продуктов за счет увеличения зазора между боковыми гранями резца и стенками борозды реза при клиновидной форме передней грани. Результаты экспериментальных исследований по разрушению твердых включений резцами с разными углами клина передней грани α_k приведены в табл. 6.

ТАБЛИЦА 6. Результаты экспериментальных исследований силовой нагруженности резцов с разными углами клина передней грани α_k , кгс

α_k , град	Параметры схемы резания		Сила резания		Сила подачи		Боковая сила	
	Толщина стружки, см	Шаг резания, см	пиковая	среднениковая	пиковая	среднениковая	пиковая	среднениковая
180	2	5	3120	1770	8100	590	370	230
150			3030	1660	820	600	380	260
130			2700	1510	750	510	440	290
100			1950	1200	570	480	580	380
180	3	5	5550	3360	1430	1070	480	380
110			3920	2550	720	650	670	550

Анализ выполнен по данным табл. 7, где сравнивались усилия, полученные при резании включений резцами с клиновидной и плоской передней гранями. Отношения пиковых нагрузок при резании резцами с клиновидной передней гранью к соответствующим нагрузкам при резании резцами с плоской передней гранью свидетельствуют о постепенном снижении сил резания и подачи при уменьшении угла клина α_k резцов с клиновидной по отношению к резцам с плоской гранью при одновременном увеличении боковых нагрузок. Объяснением полученных результатов являются различия в характерах сколов отдельных крупных элементов разрушаемого материала при резании резцами с плоской и клиновидной передней гранью.

ТАБЛИЦА 7. Отношения сил резания, подачи и боковых для резцов с клиновидной передней гранью при одинаковой ширине режущей части к соответствующим нагрузкам при резании резцом с плоской передней гранью

α_k , град	$\frac{Z_{\text{пц,кл}}}{Z_{\text{пц,пл}}}$	$\frac{\bar{Z}_{\text{пц,кл}}}{\bar{Z}_{\text{пц,пл}}}$	$\frac{Y_{\text{пц,кл}}}{Y_{\text{пц,пл}}}$	$\frac{\bar{Y}_{\text{пц,кл}}}{\bar{Y}_{\text{пц,пл}}}$	$\frac{X_{\text{пц,кл}}}{X_{\text{пц,пл}}}$	$\frac{\bar{X}_{\text{пц,кл}}}{\bar{X}_{\text{пц,пл}}}$
150	0.94	0.94	1.00	1.00	1.03	1.13
130	0.84	0.85	0.93	0.87	1.19	1.26
110	0.71	0.76	0.50	0.61	1.40	1.45
100	0.61	0.61	0.70	0.81	1.57	1.65

Примечание. $Z_{\text{пц,кл}}$, $\bar{Z}_{\text{пц,кл}}$, $Y_{\text{пц,кл}}$, $\bar{Y}_{\text{пц,кл}}$, $X_{\text{пц,кл}}$, $\bar{X}_{\text{пц,кл}}$ — пиковые и среднепиковые нагрузки на резцах с клиновидной формой передней грани; $Z_{\text{пц,пл}}$, $\bar{Z}_{\text{пц,пл}}$, $Y_{\text{пц,пл}}$, $\bar{Y}_{\text{пц,пл}}$, $X_{\text{пц,пл}}$, $\bar{X}_{\text{пц,пл}}$ — пиковые и среднепиковые нагрузки на резцах с плоской передней гранью.

Дальнейшие исследования показали, что изменение заднего и бокового углов резцов мало влияет на уровень максимальных нагрузок как при резании угля и горных пород, так и твердых включений.

ВЫВОДЫ

При центральном прорезании твердых включений максимальные нагрузки на резце зависят как от толщины, так и ширины среза, при краевом — только от толщины среза. Влияние схемы резания проявляется только при центральном прорезании твердых включений.

Экспериментальными исследованиями подтверждено отсутствие влияния скорости резания на максимальные нагрузки при прорезании твердых включений. Полученные расчетные зависимости позволяют определять время действия максимальных нагрузок на резцах исполнительных органов угледобывающих комбайнов при разрушении пластов сложного строения.

Увеличение ширины режущей части резца приводит к росту пиковых и среднепиковых сил резания и подачи, тогда как боковые нагрузки при резании твердых включений резцами с плоской передней гранью зависят лишь от толщины стружки.

Форма режущей кромки резца существенно влияет на пиковые и среднепиковые усилия подачи. При резании включений резцами с треугольной режущей кромкой уровень пиковых и среднепиковых сил резания меньше по сравнению с усилиями при резании резцами с овальной и прямоугольной режущей кромками. Увеличение угла резания приводит к росту пиковых и среднепиковых сил резания, а усилия подачи практически не изменяются.

Изменение формы передней грани резцов приводит к изменению нагрузок, действующих на все грани режущей части резцов. Уменьшение угла клина передней грани резца снижает пиковые и среднепиковые усилия резания и подачи, тогда как боковые силы закономерно возрастают.

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, 2015. — 51 с.
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, No. 12. — P. 36–96.
6. Линник Ю. Н., Линник В. Ю. Исследование процесса разрушения твердых включений резцовым инструментом // ФТПРПИ. — 2024. — № 3. — С. 58–68.
7. 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.
8. Бабокин Г. И., Шпрехер Д. М., Колесников Е. Б. Контроль технического состояния исполнительного органа выемочных машин // Горн. журн. — 2018. — № 1. — С. 107–113.
9. 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.
10. Шишляников 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.
11. 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.
12. ОСТ 24.070.17-70. Машины очистные. Комбайны. Расчет максимальных нагрузок. Методика. — М.: ФГБУ “Российский институт стандартизации”, 1970. — 44 с.
13. Павлова Н. Н., Шрейнер Л. А. Разрушение горных пород при динамическом нагружении. — М.: Недра, 1964. — 160 с.
14. Васильев Л. М., Младецкий В. Р. Влияние скорости деформации на процесс разрушения горных пород при резании // Механика разрушения горных пород. — 1975. — Вып. 3. — С. 36–43.
15. Cancan L., Zheng X., Wang G., Xu M., and Li Z. Research on drilling response characteristics of two-wing PDC bit, Cancan, Xuzhou, China University of Mining & Technology, 2020, Vol. 406. — P. 706.
16. Li H. S., Liu S. Y., and Xu P. P. Numerical simulation on interaction stress analysis of rock with conical picks, *Tunnel. Underground Space Technol.*, 2019, Vol. 85. — P. 231–242.
17. Wang X. and Su O. Specific energy analysis of rock cutting based on fracture mechanics: a case study using a conical pick on sandstone, *Eng. Fracture Mechan.*, 2019, Vol. 213. — P. 197–205.

- 18. Берон А. И., Казанский А. С., Лейбов Б. М., Позин Е. З.** Резание угля. — М.: Госгортехиздат, 1962. — 469 с.
- 19. Барон Л. И., Глатман Л. Б., Губенков Е. К.** Разрушение горных пород проходческими комбайнами. — М.: Недра, 1968. — 216 с.
- 20. Турдиев С. А.** Динамическое воздействие резцов инструментами режуще-скалывающего действия // Национальная ассоциация ученых. Проблемы технических наук. — 2020. — Вып. 59 (4). — С. 24–27.
- 21. Борисов К. И.** Современные способы оценки эффективности разрушения горных пород резанием-скалыванием долотами типа PDC // Изв. ТПУ. Инжиниринг георесурсов. — 2022. — Т. 333. — № 6. — С. 103–121.
- 22. Аверин Е. А., Жабин А. Б., Поляков А. В., Линник Ю. Н., Линник В. Ю.** Переход между заблокированным и полублокированным режимами при резании горных пород тангенциальными резцами // Зап. Горн. ин-та. — 2021. — Т. 249. — С. 329–333.
- 23. Позин Е. З., Тон В. В., Головашкин Ю. В.** Сравнительная оценка резцов с режущей частью различной формы // Создание новой техники и средств автоматизации для угольной промышленности. Науч. сообщ. ИГД им. А. А. Скочинского. — 1973. — Вып. 114. — С. 23–34.
- 24. Албул И. Н.** Исследование максимальных нагрузок на инструментах исполнительных органов // Горючие сланцы. — 1976. — № 8. — С. 11–13.

Поступила в редакцию 13/II 2024

После доработки 20/IV 2024

Принята к публикации 27/VI 2024