

УДК 622.5:539.3

Влияние параметров динамического воздействия на разрушение горных пород

Ю.А. Костандов

Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского,
Симферополь 95007. *E-mail: ipgd@yandex.ru*

Аннотация. Проведены экспериментальные и численные исследования процесса разрушения и его удельной энергоемкости при резании известнякового и силикатного материалов в зависимости от схемы и параметров резания. Выполнен сравнительный анализ усилия резания, его спектральной плотности, удельной энергоемкости разрушения и распределения разрушенных элементов среды при резании как группой резцов, так и одиночными резцами. Установлены основные закономерности влияния взаимного расположения резцов и последовательности их воздействия на энергоемкость разрушения материалов при их резании.

Введение

Использование высокопроизводительных и эффективных технологий разработки горных пород невозможно без создания энергосберегающих способов и приемов разрушения породного массива. Среди известных способов такого разрушения наиболее широкое распространение получил способ, основанный на принципе резания. Он обладает рядом существенных достоинств по простоте и стоимости машин, малой энергоемкости и экономичности добычи полезного ископаемого.

Во многих работах по исследованию процессов разрушения горных пород решаемые модельные задачи рассматривались в большинстве случаев в плоской постановке и, как правило, без учета динамических эффектов. Причина этого состоит в трудности аналитического и экспериментального решения данной проблемы ввиду сложности учета реальных процессов, которые происходят на фронте разрушения и характеризуются многими факторами, изменяющимися во времени и пространстве.

Необходимость постоянного совершенствования технологий, способов и приемов инструментального разрушения породного массива послужило причиной проведения настоящей работы с целью определения технологических параметров резания горных пород, обеспечивающих его наименьшую удельную энергоемкость.

Методика экспериментального исследования энергоемкости разрушения материалов при их резании

Будем считать, что при резании материала его разрушение происходит за счет работы, совершаемой резцом, движущимся с заданной скоростью. Тогда энергоемкость A разрушения материала при выполнении в нем реза длиной $l = l_2 - l_1$ за время $t = t_2 - t_1$ с постоянной скоростью v определяется следующим образом:

$$A = \int_{l_1}^{l_2} F(l)dl = v \int_{t_1}^{t_2} F(t)dt,$$

где F - усилие резания.

Таким образом, суть экспериментального исследования энергоемкости разрушения материалов состоит в определении изменяющегося во времени усилия резания $F(t)$ при создании в образце серии резов длиной l с заданными значениями ширины a и глубины h [1].

Методика реализована с помощью фрезерного станка за счет подачи образца на резец, закрепленный на шпинделе станка. Глубина резания задавалась скоростью вертикальной подачи стола станка. В качестве датчика усилия резания использовалась пластина из оптически чувствительного материала ЭД20-МТГФА. Определение усилия резания проводилось с помощью поляризационно-оптического метода. Регистрация изменяющегося во времени порядка интерференционной полосы, соответствующего усилию резания, осуществлялась фотоэлектронным методом с использованием аналогово-цифрового преобразователя (АЦП), сигнал от которого подавался в устройство памяти компьютера. В качестве АЦП использовалась плата ввода/вывода ADA-1292 с программируемым входным диапазоном сигнала. Это обеспечивало регистрацию как постоянной, так и переменной составляющих усилия резания в диапазоне частот $0 - 200$ кГц с шагом дискретизации до 10^{-6} с и чувствительностью измерений по деформациям до 10^{-5} [2].

Тарировка описанного выше устройства производилась при одновременной регистрации деформации D_i датчика усилия резания и соответствующего ему порядка N_i интерференционной полосы. На основе полученных данных строилась тарировочная зависимость $D_i(N_i)$, с помощью которой по данным, зарегистрированным при проведении экспериментов по резанию образцов материалов, рассчитывалось с точностью до коэффициента усилие резания $F(t)$.

Регистрация изменяющегося во времени усилия резания $F(t)$ проводилась при создании в образце в течение одного эксперимента серии из 5-6 последовательных резов с заданными значениями скорости v , ширины a и глубины h резания. Результат регистрации представлял собой временной ряд, состоящий из 32000 значений N_i и записанный в устройство памяти компьютера в виде текстового файла. Шаг дискретизации составлял $(15 - 60) \cdot 10^{-6}$ с.

Для автоматизации обработки значительных по объему массивов экспериментальных данных с целью расчета энергоемкости разрушения материалов при их

резании использовалась компьютерная программа, реализованная в среде электронных таблиц EXCEL [3]. Эта программа позволяет определить с точностью до коэффициента значение удельной энергоемкости разрушения $W = \frac{A}{ahl}$ при выполнении резов с заданными значениями v , a и h , а также ее среднего значения в серии резов с одинаковыми значениями параметров резания.

С целью фильтрации шумов и собственных колебаний измерительной системы, а также установления характерных частот (гармоник) изменения во времени усилия резания проводился спектральный анализ регистрируемых данных методом прямого и обратного преобразования Фурье [4].

В данной работе проведено экспериментальное исследование зависимостей удельной энергоемкости разрушения W от параметров (v, a, h) и схемы резания (взаимного расположения резцов и последовательности их воздействия) при резании образцов, изготовленных из силикатного кирпича (значение временной прочности на сжатие $\sigma_B = 350$ МПа). Образцы в виде прямоугольных параллелепипедов размеров $60 \times 90 \times 120$ мм изготавливались методом фрезерования с последующим высушиванием их при температуре 90°C в течение двух часов. Энергоемкость разрушения определялась при резании с выровненной свободной поверхности и срезании имеющихся на ней целиков.

Исследование влияния взаимного расположения резцов и последовательности их воздействия на энергоемкость разрушения выполнялось при резании образцов материалов группой резцов. При этом резцы закреплялись в насадке на шпинделе станка, которая обеспечивала возможность регулирования величины продольного шага резания s (опережения передними резцами заднего резца) за счет использования стальных прокладок одинаковой толщины, равной s . Резание образцов материалов осуществлялось путем одновременного прорезания в них опережающими резцами пары параллельных пазов шириной a с последующим срезанием образовавшегося целика шириной d задним резцом шириной b .

При проведении экспериментов использовались резцы с напайками из материала ВК8 с шириной режущей кромки $b = 6$ мм и $b = 12$ мм и углами резания $\alpha = 90^\circ$. Режущая кромка имела форму прямоугольника. Скорость резания v изменялась в диапазоне $0.5 - 2.7$ м/с. Глубина резания h изменялась в диапазоне $0.2 - 1.2$ мм.

Экспериментальное исследование удельной энергоемкости разрушения

Некоторые из результатов определения усилия резания $F(t)$, его среднего значения $F(t)_{cp}$ и спектральной плотности $p(f)$ в зависимости от скорости v и глубины h резания приведены на рис.1. Значения граничных частот f_c низкочастотной части спектра усилия резания, указанные на этом рисунке, определялись как частоты, выше которых происходил значительный спад величины $p(f)$ от значения $p_c(f_c) \sim 30 - 50$ единиц. Это значение было выбрано, как превосходящее более чем на порядок значение спектральной плотности шумов измерительной системы.

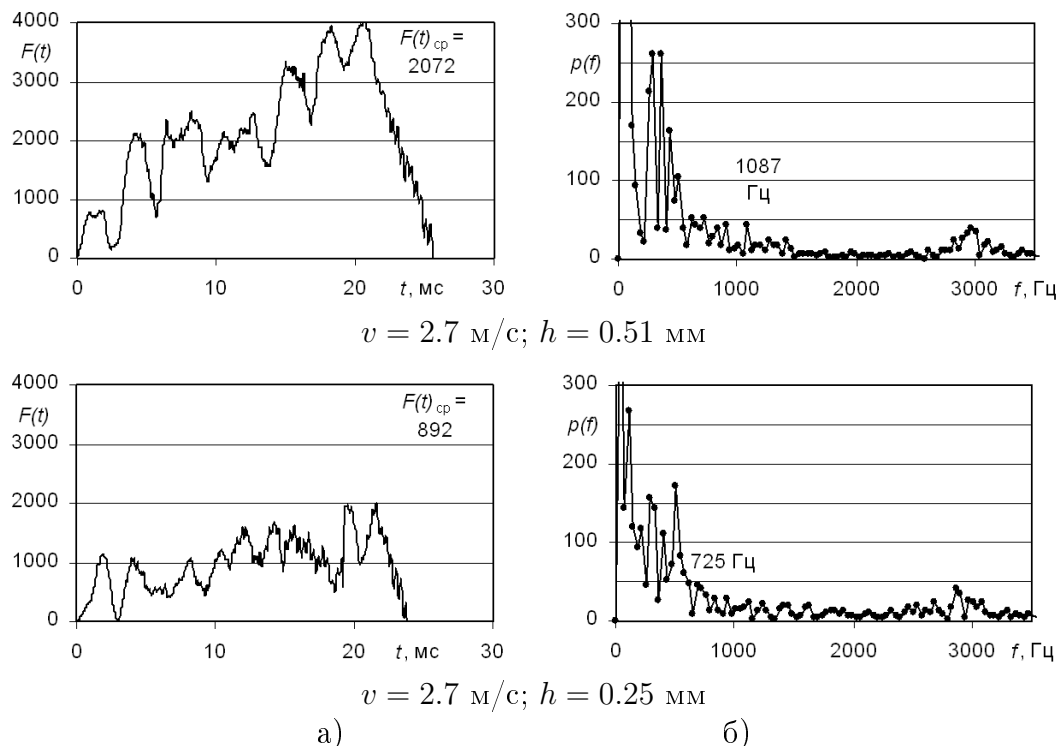


Рис. 1. Резание образцов из силикатного материала группой резцов: а) — усилие резания $F(t)$; б) — его спектральная плотность $p(f)$.

Оказалось, что в случае резания силикатного материала группой резцов происходит, как и следовало ожидать, значительный рост усилия резания по сравнению с резанием одиночными резцами. Однако, величина усилия резания для группы резцов не является простой суммой значений усилий резания одиночных резцов, составляющих группу и работающих в таких же условиях. Из данных, приведенных в таблице, следует, что среднее значение усилия резания группы резцов $F(t)_{Gcp}$ меньше суммы F_S средних значений усилий резания одиночных резцов $F(t)_{cp6cв}$ и $F(t)_{cp12cв}$ на 10 – 15%. Здесь $F(s) = 2F(t)_{cp6cв} + F(t)_{cp12cв}$, а $F(t)_{cp6cв}$ и $F(t)_{cp12cв}$ - средние значения усилия резания резцов в случаях резания со свободной поверхности при $b = 6$ мм и срезания целиков при $b = 12$ мм соответственно.

Таблица - зависимость средних значений усилий F резания одиночными резцами и их группой от скорости v и глубины h резания.

v , м/с	h , мм	$F(t)_6$	$F(t)_{12}$	F_S	$F(t)_G$	Δ , %
2.7	0.51	741	811	2293	2072	10.7
1.7	0.63	493	950	1936	1681	15.2
1.1	0.64	633	784	2050	1792	14.4

Из полученных данных следует, что для резания группой резцов, как и для резания одиночными резцами, увеличение h при неизменной величине v , или увеличение v при неизменной величине h приводит к росту $F(t)_{Gcp}$.

Зависимость спектральных характеристик усилия резания для группы резцов от глубины резания h определяется скоростью резания v . Значение f_c с увеличением h возрастает при $v = 2.7$ м/с и $v = 1.1$ м/с, и сначала снижается, а затем повышается при $v = 1.7$ м/с. Последнее является проявлением динамического характера разрушения в рассматриваемых случаях резания.

Результаты определения величины W_G при резании силикатного материала группой резцов в зависимости от глубины резания h при $s = 0.5$ мм представлены на рис. 2. Здесь же приведены и результаты определения удельной энергоёмкости разрушения W образцов из силикатного материала при резании свободной поверхности и срезании целиков одним резцом с $b = 6$ мм и $b = 12$ мм. Резание проводилось при значениях скорости резания 1.7 м/с и 2.7 м/с.

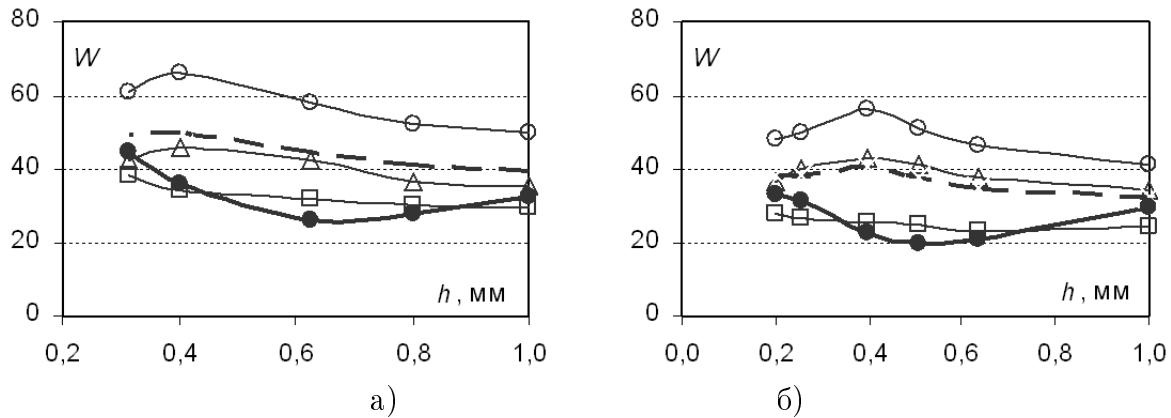


Рис. 2. Зависимости удельной энергоёмкости разрушения W от глубины резания h при а) $v = 1.7$ м/с и б) $v = 2.7$ м/с:

- — резание со свободной поверхности резцом с $b = 6$ мм, $W_{6св}$;
- △ — резание со свободной поверхности резцом с $b = 12$ мм, $W_{12св}$
- — срезание целиков резцом с $b = 12$ мм, $W_{12ц}$;
- — резание группой резцов, W_G ;
- — результат суперпозиции, W_S .

На рис. 2 пунктирной линией показана зависимость от глубины резания величины удельной энергоёмкости разрушения W_S , определенной как суперпозиция величин удельной энергоёмкости разрушения $W_{6св}$ и $W_{12ц}$: $W_S = (W_{6св} + W_{12ц})/2$. При этом величина $W_{6св}$ соответствует резанию со свободной поверхности с образованием двух пазов с одинаковыми ширинами $a = 6$ мм, а величина $W_{12ц}$ - последующему срезанию образовавшегося между ними целика шириной $2a = 12$ мм. Таким образом, величина W_S является средним величин $W_{6св}$ и $W_{12ц}$.

Из анализа данных, приведенных на рис. 2, следует ряд заслуживающих внимания выводов. Величина W_G в случае резания группой резцов всегда оказывается меньше величины W_S . Для глубин резания $h < 0.3 - 0.4$ мм и $h < 0.7 - 0.8$ мм величина W_G превышает удельную энергоемкость разрушения W при срезании целиков. Для глубин резания $0.4 \text{ мм} < h < 0.8 \text{ мм}$ величина W_G оказывается наименьшей из рассматриваемых величин удельной энергоемкости разрушения. При $h = 0.5 - 0.6$ мм величина W_G достигает своего минимума W_{Gmin} , значение которого зависит от скорости резания. Из сказанного выше следует вывод о зависимости эффективности работы группы резцов при заданном значении опережения s от глубины резания h . Таким образом, целесообразно ввести параметр $\gamma = s/h$, значение которого определяет эффективность работы группы резцов.

Анализ представленных данных позволяет заключить, что при малом значении параметра γ группа резцов работает как один резец шириной, равной сумме ширин резцов, входящих в группу. В этом случае величина W_G приближается к величине $W_{12св}$, соответствующей резанию со свободной поверхности резцом с шириной режущей кромки $b = 12$ мм. При большом значении параметра γ группа резцов работает как совокупность отдельно работающих резцов. Величина W_G в этом случае приближается к величине W_S .

На рис. 3 приведены результаты исследования зависимости удельной энергоемкости разрушения W_G от параметра γ . Из них следует, что минимальная удельная энергоемкость разрушения W_{Gmin} достигается при $\gamma \approx 1$. При этом значение параметра γ_m зависит от скорости резания v . Объяснением этому эффекту можно считать реализацию при $\gamma = \gamma_m$ взаимодействия НДС заднего резца с НДС передних резцов за счет динамического характера разрушения при резании материалов.

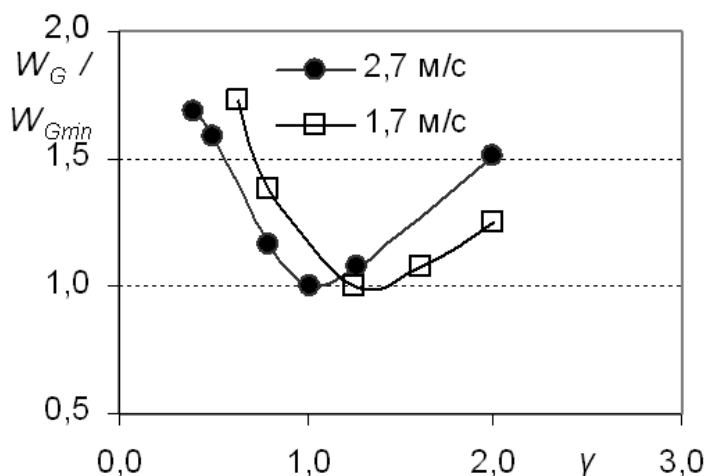


Рис. 3. Зависимость относительной удельной энергоемкости разрушения W_G/W_{Gmin} от скорости резания v и параметра $\gamma = s/h$.

Численное моделирование процесса разрушения при резании

Численный расчет НДС материала при резании проводился модифицированным методом конечных элементов [5]. Для описания процесса разрушения использовались феноменологическая модель динамического разрушения твердого тела и двухуровневый критерий разрушения, учитывающий рост поврежденности материала при его нагружении [6].

Рассматривалась задача о резании на глубину h образца в виде прямоугольного параллелепипеда размерами $6 \times 8 \times 20$ см. Нижняя грань образца была жестко закреплена. Резец шириной $b = 2$ см имел постоянный вектор скорости v , направленный вдоль длинной грани образца.

При проведении численных расчетов варьировались угол резания α (60° и 90°), скорость резания v (3–12 м/с), глубина резания h (0,5–3 см). Ввиду того, что длительность исследуемого процесса и требуемое временное разрешение различаются на несколько порядков, рассматривалась начальная стадия процесса разрушения продолжительностью до 10^{-3} с.

Изучение процесса разрушения горной породы состояло в исследовании влияния параметров резания на НДС образца, усилие резания, развитие в объеме и времени разрушения материала образца вблизи кромки режущего инструмента. Для этого определялись действующее усилие на передней грани резца $P(t)$, количество разрушенных элементов среды в текущий момент времени $n(t)$ и за время взаимодействия с резцом $N_s(t)$, а также распределение разрушенных элементов среды в сечениях образца, параллельных и ортогональных направлению резания.

Оказалось, что усилие резания, определяемое как действующее усилие на передней грани резца $P(t)$, первоначально возрастает, а затем сохраняет определенный уровень значений, испытывая при этом значительные осцилляции. Из сопоставления зависимостей $P(t)$ и $n(t)$ следует, что уменьшения величины $P(t)$ происходят при разрушении элементов материала и могут быть объяснены сбросом накопленной им энергии упругой деформации.

Установлено увеличение величины $P(t)$ с уменьшением v при неизменном значении h , либо с ростом величины h при неизменном значении v , что полностью соответствует данным, полученным экспериментально и приведенных в предыдущем разделе настоящей работы.

Из полученных результатов, в частности, следует, что при резании материала со скоростью $v = 10$ м/с амплитудное значение усилия резания $P(t)$ увеличивается от 220 до 280 единиц с ростом глубины резания h от 1,5 см до 3 см. Увеличивается при этом и скорость нарастания величины $P(t)$. Величина удельной энергоемкости разрушения при этом уменьшается в 1,5 раза.

Исследование распределения разрушенных элементов среды в сечениях (слоях), параллельных и ортогональных направлению резания, позволило изучить развитие разрушения среды вблизи кромки резца не только во времени, но и в объеме. Некоторые из результатов, полученных при проведении численных расче-

тов разрушения элементов среды в известняковом материале, приведены на рис. 4. На нем черными кружками показаны разрушенные элементы среды.

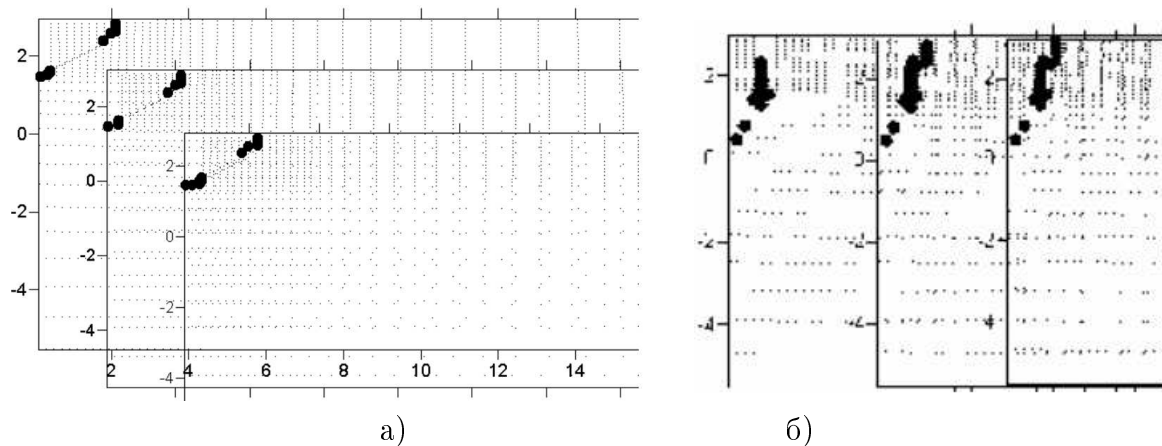


Рис. 4. Разрушение элементов среды при срезании целиков в известняковом материале ($v = 10$ м/с, $b = 2$ см, $\alpha = 90^\circ$) в моменты времени 200, 400, 600 мкс: а) $h = 1.5$ см; б) $h = 3.0$ см.

Из рис. 4а следует, что при срезании целиков в известняковом материале со скоростью $v = 10$ м/с, глубиной $h = 1,5$ см и углом резания $\alpha = 90^\circ$ разрушение элементов материала на начальном этапе происходит и вблизи режущей кромки резца, и вблизи свободной поверхности. Причем линия, вдоль которой происходит разрушение элементов среды, составляет угол $\beta \approx 55^\circ$ с передней гранью образца.

С увеличением h до 3 см (рис.4б) разрушение элементов материала на начальном этапе происходит вблизи режущей кромки резца по линии, составляющей угол $\beta \approx 35^\circ$ с передней гранью образца до глубины (расстояния до свободной поверхности) $H \approx 2.0$ см. Затем линия, вдоль которой происходит разрушение элементов среды, резко изменяет угол β практически до нуля.

Из этого следует важный вывод относительно резания материалов группой резцов. Положим, что рассматриваемые случаи соответствуют срезанию целиков, образованных двумя резцами, опережающими задний на величину s . Максимальная эффективность резания соответствует условию взаимодействия (наложения) НДС, создаваемого задним резцом, и (на) НДС, создаваемого передними резцами. В свою очередь, это условие будет реализовано тогда, когда передние резцы опережают задний резец на величину, равную расстоянию от передней грани образца до места излома линии, вдоль которой происходит разрушение элементов среды. При условии равенства глубин резания передних и заднего резцов это означает приблизительное равенство величин опережения s и глубины резания h . Последнее определяется динамическим характером процесса разрушения и полностью соответствует выводу, сделанному в предыдущем разделе настоящей работы, о соотношении величин s и h , при котором обеспечивается наименьшее значение удельной энергоёмкости разрушения.

Пример результатов проведения численных расчетов разрушения элементов

среды в образце из силикатного материала приведен на рис. 5. Из этого рисунка следует, что при срезании целиков в силикатном материале со скоростью $v = 10$ м/с, глубиной $h = 1,5$ см и углом резания $\alpha = 90^\circ$ разрушенные элементы среды уже через 300 мкс полностью отделяют от образца его часть, прилегающую к резац. При этом линия, вдоль которой происходит разрушение элементов среды, составляет угол $\beta \approx 70^\circ$ с передней гранью образца на протяжении своей длины от места контакта с вершиной резаца до глубины $H \approx 0,5$ см. Здесь она отклоняется в сторону свободной поверхности и изменяет угол β до нуля.

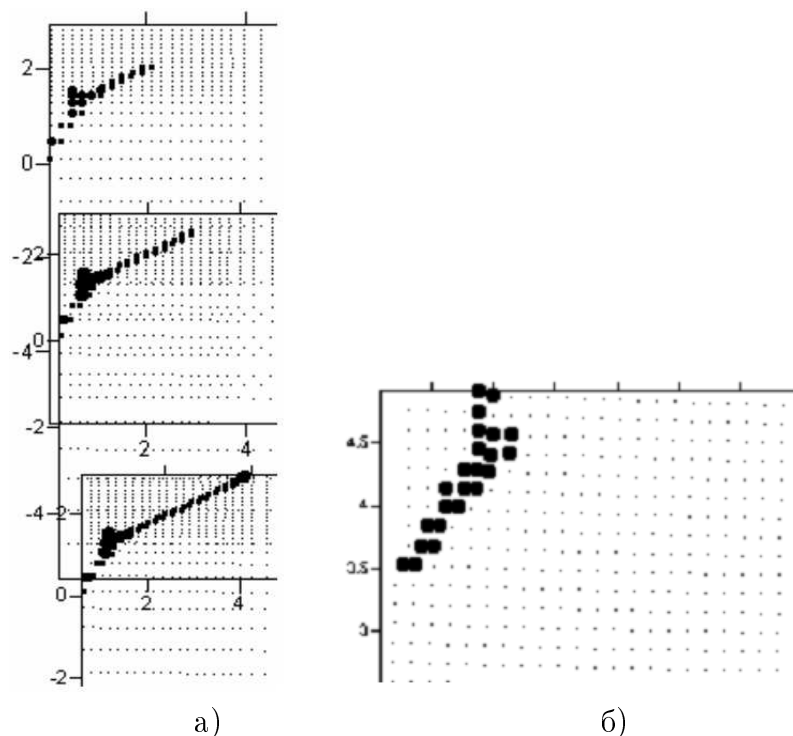


Рис. 5. Разрушение элементов среды при срезании целиков в силикатном материале ($v = 10$ м/с, $b = 2$ см, $\alpha = 90^\circ$) в моменты времени t : а) $h = 3,0$ см, $t = 200, 400, 600$ мкс; б) $h = 1,5$ см, $t = 300$ мкс.

Такое отличие развития разрушения при резании с глубиной 1.5 см в силикатном и известняковом материалах объясняется в первую очередь тем, что известняковый материал обладает пластичностью, а разрушение силикатного материала носит хрупкий характер. Поэтому при резании силикатного материала сколы материала имеют большие размеры, чем при резании известнякового материала.

С увеличением глубины резания до 3 см разрушение элементов материала на начальном этапе происходит, как это видно из рис.5а, вблизи режущей кромки резаца. Линия, вдоль которой происходит разрушение элементов среды, составляет угол $\beta \approx 22^\circ$ с передней гранью образца на протяжении своей длины от места контакта с вершиной резаца до глубины $H \approx 1,5$ см и расстояния до передней грани образца $L \approx 0,5$ см. Локальная область материала с этими координатами

характеризуется концентрацией разрушенных элементов среды, повышающейся с продолжением нагружения. В этой локальной области линия, вдоль которой происходит разрушение элементов среды, отклоняется от своего первоначального направления до угла $\beta \approx 65^\circ$. Этот угол наклона она сохраняет неизменным вплоть до выхода на свободную поверхность на расстоянии $S \approx 4$ см от передней грани образца.

Рассмотрим изложенные данные с точки зрения возможности повышения эффективности резания материалов группой резцов, как это было сделано ранее для случая резания известнякового материала.

Взаимодействие НДС, создаваемого задним резцом, с НДС, создаваемым передними резцами, возможно, как видно из рис.5, при условии опережения передними резцами заднего резца на величину $s < S$. В рассматриваемом случае $h \approx 3.0$ см, $S \approx 4.0$ см. Поэтому $\gamma = s/h \approx 1.33$. Это значение γ не намного отличается от единицы и тем самым, как и в случае резания известнякового материала, соответствует выводу, сделанному в предыдущем разделе настоящей работы, о величине γ , при которой обеспечивается наименьшее значение удельной энергоемкости разрушения.

Заметим, что выполнение в рассматриваемом случае условия $\gamma_m = s/h \approx 1,33$ обеспечивает наименьшее значение удельной энергоемкости разрушения, но при этом передние резцы находятся на таком расстоянии от заднего резца, при котором линия, вдоль которой происходит разрушение элементов среды, уже выходит на свободную поверхность образца. Следовательно, в разрушенном материале будет значительна доля мелких фракций, что является нежелательным фактором. Поэтому для обеспечения максимальной эффективности резания материалов группой резцов следует и для этого случая принять $\gamma_m \approx 1$.

Выводы

Проведены экспериментальные и численные исследования усилия резания и удельной энергоемкости разрушения при резании образцов горной породы одиночными резцами и группой резцов в зависимости от скорости, глубины и ширины резания.

Установлены основные закономерности влияния взаимного расположения резцов и последовательности их воздействия на энергоемкость разрушения горной породы при ее резании.

Установлено, что эффективность работы группы резцов зависит от величины отношения значений опережения передними резцами заднего резца к глубине резания, что определяется динамическим характером взаимодействия заднего и передних резцов, а минимальная удельная энергоемкость разрушения достигается при приблизительном равенстве этой величины единице.

Несмотря на то, что была рассмотрена совершенно конкретная схема резания, в которой использовались резцы с определенными значениями ширины режущей кромки b и угла резания α , проведенные исследования позволили выявить основ-

ные закономерности влияния взаимного расположения резцов и последовательности их воздействия на энергоемкость разрушения горной породы. В свою очередь, это предоставляет возможность разработки рекомендаций по определению технологических параметров процесса инструментального резания горных пород, обеспечивающих его наименьшую удельную энергоемкость.

Список цитируемых источников

1. *Костандов Ю.А.* Особенности поведения материалов при инструментальном резании. // *Динамические системы*. Вып. 21 — 2006. — с. 107–114.
2. *Костандов Ю.А.* Свидетельство №31800 о регистр. автор. права на полезную модель "Устройство для регистрации усилия резания". // *Промыш. собственность*. — Бюл. №8 от 25.04.08. — Украина.
3. *Медведев В.С.* Свидетельство №23023 от 05.12.07 о регистр. автор. права на "Компьютерную программу расчета энергоемкости разрушения материалов при их резании". — Украина.
4. *Шиповский И.Е., Медведев В.С.* Свидетельство № 22075 от 19.09.07 о регистр. автор. права на "Компьютерную программу спектрального анализа временного ряда экспериментальных данных, полученных с помощью аналого-цифрового преобразователя". — Украина.
5. *Шиповский И.Е.* Свидетельство №17852 от 07.09.2006 о регистр. автор. права на "Программу расчета напряженно-деформированного состояния и разрушения материалов". — Украина.
6. *Костандов Ю.А., Шиповский И.Е.* Двухуровневый критерий разрушения материалов. // *Надежность и долговечность машин и сооружений*. Межд. сборник. Вып. 29 — 2007. — с. 169–175.

Получена 2.06.08