

УДК 621.251

*Д. Ю. САЗОНОВ*

*Тульский государственный университет, Россия*

## **ВЫБОР РАЦИОНАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РЕЗАНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

Проведенные исследования позволяют в заданных пределах определить рациональные диапазоны изменения конструктивных параметров инструмента, возможностей оборудования и режимов гидроабразивного резания материалов, обеспечивающие высокую производительность процесса.

Наиболее часто показателями эффективности процесса гидроабразивного (ГА) резания материалов считают глубину нарезаемой щели  $h$  и удельную энергоемкость процесса резания (щелеобразования)  $E_0$  [1, 2]. Для оценки влияния параметров процесса резания на показатели его эффективности на основе разработанных математических моделей [3–5] были проведены теоретические исследования данных процессов. Результаты численного моделирования представлялись в форме графических зависимостей глубины нарезаемой щели  $h$  и удельной энергоемкости  $E_0$  от исследуемых параметров процесса, в качестве исследуемых материалов использовались сталь конструкционная (Ст. 10) ( $\sigma_r = 210$  МПа), алюминиевый сплав Д16 ( $\sigma_{вр} = 400$  МПа) и титановый сплав ВТ6 ( $\sigma_r = 920$  МПа). При описании графических зависимостей использованы обозначения:  $P_0$  – магистральное давление;  $d_0$  – диаметр струеформирующего насадка;  $d_k$  – диаметр коллиматора;  $v_n$  – скорость подачи инструмента;  $E_0$  – удельная энергоемкость процесса резания;  $h$  – глубина нарезаемой щели;  $Q_a$  и  $Q_n$  – массовые расходы абразива и воды.

Результаты исследования влияния давления воды  $P_0$  на удельную энергоемкость процесса ГА резания сплава ВТ6 представлены на рисунке 1. Анализ результатов показал, что при всех использованных значениях массового расхода абразива  $Q_a$  с повышением давления воды  $P_0$  глубина нарезаемой щели  $h$  для всех значений расхода линейно увеличивается. Такой характер полностью согласуется с экспериментальными данными.

На начальном этапе при низких давлениях и соответственно малых массовых расходах воды  $Q_n$  и больших массовых отношениях  $Q_a / Q_n$ , энергоемкость процесса велика. Это объясняется тем, что при избыточном массовом расходе абразива  $Q_a$  по отношению к массовому расходу воды  $Q_n$  количество движения, передаваемое от потока воды абразивным частицам мало, и, соответственно, мала их работа по разрушению породы.

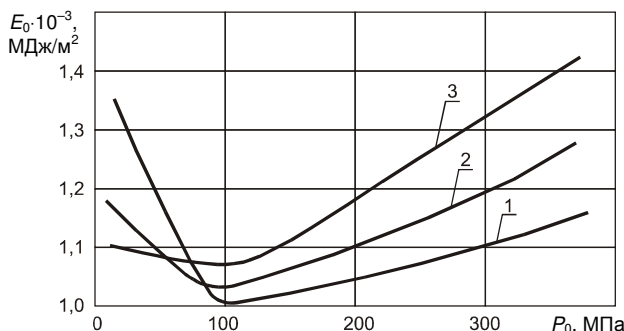


Рисунок 1 – Влияние давления воды  $P_0$  на удельную энергоёмкость процесса  $E_0$  для  $v_n = 3,75 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $d_k = 1,5$  мм,  $d_0 = 0,5$  мм:  
 1 –  $Q_a = 13 \cdot 10^{-3}$  кг/с; 2 –  $Q_a = 9,8 \cdot 10^{-3}$  кг/с; 3 –  $Q_a = 8 \cdot 10^{-3}$  кг/с

Далее, с ростом давления  $P_0$  скорость истечения струи  $v_0$  и массовый расход воды  $Q_n$  возрастают, и при фиксированном массовом расходе абразива  $Q_a$  увеличивается скорость абразивных частиц и их кинетическая энергия, реализуемая в процессе резания. В результате глубина нарезаемой щели  $h$  и скорость приращения боковой поверхности щели  $F_0$  увеличиваются, а удельная энергоёмкость  $E_0$  снижается. При увеличении давления воды  $P_0$  до определенного уровня, различного для каждой величины массового расхода абразива  $Q_a$ , устанавливается оптимальное отношение  $Q_a / Q_n$ , соответствующее максимальной глубине нарезаемой щели  $h$  и минимальной удельной энергоёмкости процесса  $E_0$ .

При дальнейшем увеличении давления воды скорость истечения  $v_0$  и массовый расход воды  $Q_n$  возрастают, и как следствие, продолжают расти скорость абразивных частиц и глубина нарезаемой щели  $h$ . Однако по мере роста давления воды доля нереализованной энергии высокоскоростного потока воды, определяющая эффективность передачи количества движения жидкости абразиву возрастает, что приводит к увеличению удельной энергоёмкости процесса  $E_0$ .

Исследование влияния массового расхода абразива  $Q_a$  на глубину нарезаемой щели  $h$  и удельную энергоёмкость процесса  $E_0$  ГА резания сплава ВТ6 представлены на рисунках 2–4.

Анализ полученных расчетных данных показывает, что глубина нарезаемой щели  $h$  при всех исследованных значениях давления воды  $P_0$  с увеличением массового расхода абразива  $Q_a$  возрастает, достигая некоторого максимального значения, и при дальнейшем увеличении расхода абразива начинает уменьшаться. Удельная энергоёмкость процесса  $E_0$ , наоборот, вначале снижается, достигает некоторого минимального уровня и при дальнейшем увеличении расхода абразива начинает увеличиваться.

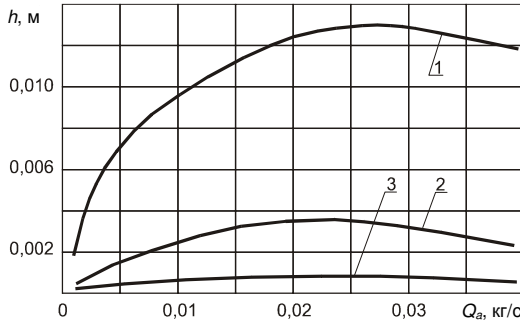


Рисунок 2 – Влияние массового расхода абразива  $Q_a$  на глубину резания  $h$  для  $v_n = 3,75 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $d_k = 1,5$  мм,  $d_0 = 0,5$  мм:  
 1 –  $P_0 = 379$  МПа; 2 –  $P_0 = 200$  МПа; 3 –  $P_0 = 100$  МПа

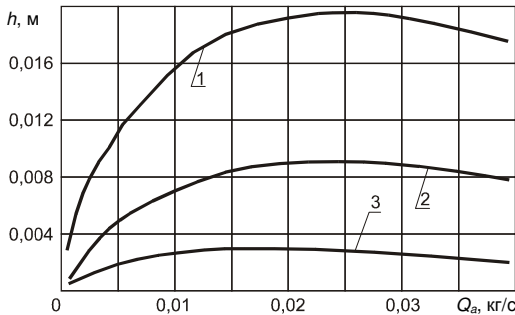


Рисунок 3 – Влияние массового расхода абразива  $Q_a$  на глубину резания  $h$  для  $P_0 = 200$  МПа,  $d_k = 1,5$  мм,  $d_0 = 0,5$  мм:  
 1 –  $v_n = 0,43 \cdot 10^{-3}$  м/с; 2 –  $v_n = 1,17 \cdot 10^{-3}$  м/с; 3 –  $v_n = 3,75 \cdot 10^{-3}$  м/с

Такая зависимость объясняется следующим. Вначале, при малом расходе абразива, плотность распределения абразивных частиц, определяющая энергию ГА струи, на единицу длины нарезаемой щели невелика. В результате глубина нарезаемой щели  $h$  (см. рисунок 2) и скорость приращения боковой поверхности щели  $F_0$  оказываются небольшими, а удельная энергоёмкость  $E_0$  процесса – высокой (см. рисунок 3). С ростом массового расхода абразива  $Q_a$  при неизменной скорости подачи  $v_n$  плотность распределения абразивных частиц и энергии струи на единицу длины щели возрастают, соответственно увеличивается общая работа по разрушению массива, выполняемая боковой поверхностью щели  $F_0$  начинают увеличиваться, а удельная энергоёмкость процесса снижаться.

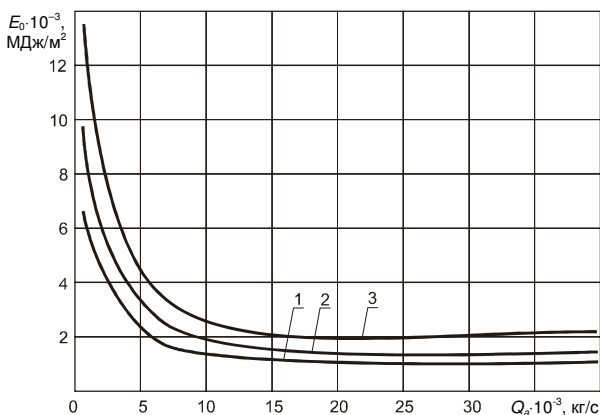


Рисунок 4 – Влияние массового расхода абразива  $Q_a$  на удельную энергоёмкость  $E_0$  для  $v_n = 3,75 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $d_k = 1,5$  мм,  $d_0 = 0,5$  мм:  
 1 –  $P_0 = 379$  МПа; 2 –  $P_0 = 200$  МПа; 3 –  $P_0 = 100$  МПа

При дальнейшем увеличении расхода абразива  $Q_a$  темп снижения прироста глубины щели  $h$  и удельной энергоёмкости  $E_0$  процесса постепенно замедляется, и при превышении некоторого предельного уровня расхода абразива, определяемого давлением  $P_0$ , глубина нарезаемой щели  $h$  уменьшается, а удельная энергоёмкость  $E_0$  увеличивается (см. рисунки 2, 3).

Исследование влияния диаметра струеформирующего насадка  $d_0$  на глубину нарезаемой щели  $h$  представлено на рисунке 5. При этом для исключения непосредственного влияния на исследуемые показатели эффективности процесса массового расхода абразива  $Q_a$  и диаметра коллиматора  $d_k$  во всех случаях принималось оптимальное массовое соотношение «абразив – вода», равное 0,206 [6], и рациональное отношение диаметра коллиматора  $d_k$  к диаметру струеформирующего насадка  $d_0$ , которое для исследуемого инструмента равно  $d_k / d_0 = 9$  [2].

Из рисунка видно, что при исследованных уровнях давления воды  $P_0$  с увеличением диаметра насадка  $d_0$  глубина щели  $h$  линейно возрастает для всех исследуемых материалов. Характер зависимостей хорошо согласуется с экспериментом и объясняется следующим: с одной стороны, при принятых фиксированных значениях  $Q_a / Q_n$  и  $d_k / d_0$ , а также величине давления воды  $P_0$  при изменении диаметра насадка  $d_0$  скорость ГА струи  $v_0$  и плотность распределения абразивных частиц по площади контакта струи с обрабатываемой породой остаются постоянными и не влияют на изменение глубины нарезаемой щели; с другой стороны, при увеличении диаметра насадка и, соответственно, диаметра коллиматора  $d_k$  при неизменной скорости подачи  $v_n$  увеличивается время воздействия струи на материал, в результате чего возрастает глубина нарезаемой щели  $h$ .

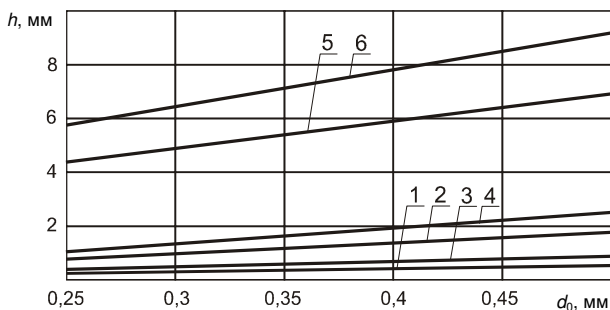


Рисунок 5 – Влияние диаметра струеформирующего насадка  $d_0$  на глубину резания  $h$  для  $v_n = 3,75 \cdot 10^{-3}$  м/с,  $d_k / d_0 = 6$ ,  $Q_d / Q_e = 0,206$ :  
 1 –  $P_0 = 100$  МПа, Ст.10; 2 –  $P_0 = 200$  МПа, Ст.10; 3 –  $P_0 = 100$  МПа, ВТ6;  
 4 –  $P_0 = 200$  МПа, ВТ6; 5 –  $P_0 = 100$  МПа, Д16; 6 –  $P_0 = 200$  МПа, Д16

Результаты исследования влияния давления воды  $P_0$  на глубину резания  $h$  представлены на рисунке 6. Анализ результатов показал, что при всех использованных значениях расхода абразива  $Q_a$  с повышением давления воды  $P_0$  глубина нарезаемой щели  $h$  для всех исследуемых материалов линейно увеличивается. Это происходит потому, что с возрастанием давления воды увеличивается скорость истечения ГА струи.

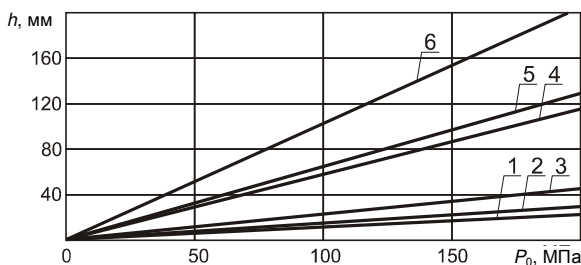


Рисунок 6 – Влияние давления воды  $P_0$  на глубину резания  $h$  для  $d_k = 1,5$  мм,  $d_0 = 0,5$  мм,  $Q_a = 8 \cdot 10^{-3}$  кг/с:  
 1 –  $v_n = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м/с, Ст.10; 2 –  $v_n = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м/с, ВТ6; 3 –  $v_n = 0,35 \cdot 10^{-3}$  м/с, Д16;  
 4 –  $v_n = 1,65 \cdot 10^{-3}$  м/с, Ст.10; 5 –  $v_n = 1,65 \cdot 10^{-3}$  м/с, ВТ6; 6 –  $v_n = 1,65 \cdot 10^{-3}$  м/с, Д16

Анализ полученных результатов позволил определить рациональные значения технологических режимов обработки. Диапазоны изменения конструктивных параметров инструмента, технологических режимов и возможностей используемого оборудования, обеспечивающих наилучшую производительность при ГА резке различных конструкционных материалов, представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Полученные результаты

Материал	h, мм	P <sub>0</sub> , МПа	Q <sub>a</sub> , кг/мин	v <sub>n</sub> , мм/мин	Время резания 1 м, мин		*Стоимость 1 м резания, руб.	
					Тип абразива			
					гранат	силикат	гранат	силикат
Сталь кон- струкцион- ная Ст.10	8	170	0,8	200	5	6	45	13
	20	175	0,8	100	10	13	90	35
	100	175	1,6	20	50	65	720	160
Сплав алюминие- вый Д16	40	175	0,8	100	10	12	90	35
	160	175	1,6	40	25	36	460	80
	200	175	1,6	20	50	63	720	160
Сплав ти- тановый BT-6	60	170	0,8	33	30	42	270	90
	150	180	1,7	10	100	140	1500	500

\* При проведении расчетов принималось: диаметр насадки 0,6 мм, абразив – концентрат зернистостью 0,2–0,8 мм; стоимость абразива: гранатовый песок – 10 руб./кг, силикатный песок – 2 руб./кг; стоимость воды 1,5 руб./т; стоимость электроэнергии 1 руб./кВт·ч; суммарная потребляемая мощность комплекса – 40 кВт; [Q]=0,133 л/с; расход изнашиваемых деталей насосной установки, отнесенный на 1 ч работы – 200 руб.; ориентировочная стоимость 1 дня работы бригады гидрорезчиков из 2 человек – 1000 руб.; ориентировочная стоимость установки высокого давления – 30000 долларов США.

Таким образом, проведенные исследования позволяют оценить влияние различных факторов на процесс ГА резания конструкционных материалов и производить оптимизацию данного процесса с учетом его производительности и себестоимости.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Тихомиров, Р. А. Гидрорезание неметаллических материалов / Р. А. Тихомиров, В. С. Гущенко. – М.: Техника, 1984. – 143 с.
- 2 Гидроабразивное резание горных пород // В. А. Бреннер [и др.] – М.: Изд-во Московского гос. горного ун-та, 2003. – 279 с.
- 3 Сазонов, Д. Ю. Определение параметров движения гидроабразивной смеси в насадке / Д. Ю. Сазонов // Известия ТулГУ. – 2006. – Вып. 2. – Т. 1. – С. 256–263. – (Сер. Актуальные вопросы механики.)
- 4 Сазонов, Д. Ю. Вариант математической модели движения частицы абразива в жидкости / Д. Ю. Сазонов // Известия ТулГУ. – 2006. – Вып. 2. – Т. 1. – С. 286–293. – (Сер. Механика деформируемого твердого тела и обработка металлов давлением.)
- 5 Сазонов, Д. Ю. Исследование влияния параметров процесса гидроабразивного резания на его эффективность / Д. Ю. Сазонов // Вестник ТулГУ. – Тула: Изд-во ТулГУ. – 2008. – Вып. 4. – Том 2. – С. 122–128. – (Сер. Актуальные вопросы механики.)
- 6 Никифоровский, В. С. Динамическое разрушение твердых тел / В. С. Никифоровский, Е. И. Шемякин. – Новосибирск: Наука, 1979. – 271 с.

*D. Y. SAZONOV*

## **SELECTION OF EFFICIENT HYDRO ABRASIVE MATERIAL CUTTING MODES**

The carried out research allows to determine the efficient ranges for tool design parametric variations, the performances of the equipment and hydro abrasive material cutting modes providing high process production within the set limits.

Получено 25.04.2010

**ISBN 978-985-468-924-1. Механика. Научные исследования  
и учебно-методические разработки. Вып. 5. Гомель, 2011**

---

УДК 531.133

*В. К. ТАРАСОВ, Ю. П. СМЕРНОВ*

*Тульский государственный университет, Россия*

### **ШАРНИР РАВНЫХ УГЛОВЫХ СКОРОСТЕЙ**

Рассмотрена кинематика шарикового шарнира равных угловых скоростей. Определены зависимости между перемещениями шариков и углом поворота валов при различных углах между осями валов.

Шарнир равных угловых скоростей (ШРУС) применяется в различных машинах и механизмах, но только сравнительно недавно стал широко применяться в автомобильной промышленности. Это связано с расширением производства переднеприводных и полноприводных автомобилей.

Переднее колесо автомобиля является управляемым. Оно поворачивается вокруг вертикальной оси и одновременно к колесу прикладывается вращающий момент. Проблема состоит в том, чтобы передаточное отношение не зависело от угла между осями валов и угловой скорости их относительно поворота. Эту проблему решает шарнир равных угловых скоростей. На рисунке 1 приведена конструкция привода переднего колеса автомобиля.

Привод колеса состоит из двух ШРУСов, соединенных между собой валом. Соединение вала с шарнирами – шлицевое. От продольного перемещения вал зафиксирован в шарнирах стопорными кольцами. Шлицевой хвостовик наружного шарнира соединен со ступицей колеса и закреплен гайкой подшипника. Шлицевой хвостовик внутреннего шарнира соединен с шестерней привода в коробке передач.

Шарнир состоит из корпуса 2, 13, обоймы 4 и шести шариков 5, которые размещены в канавках корпуса и обоймы. В наружном шарнире эти канавки выполнены по радиусу, что обеспечивает угол его поворота до 42°. В корпусе внутреннего шарнира канавки прямые, что позволяет деталям перемещаться в