

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТЬ И КАЧЕСТВО АЛМАЗНОЙ ДОВОДКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

*Докт. техн. наук, проф. КИСЕЛЕВ М. Г., канд. техн. наук, доц. ЛУГОВОЙ В. П.,
асп. ХЕДЖАЗИ ФАРЗАМ*

Белорусский национальный технический университет

Алмазная доводка плоских поверхностей – одна из разновидностей финишной обработки изделий. С ее помощью достигаются минимальная величина микронеровностей обрабатываемых поверхностей, их геометрическая точность, а также обеспечивается комплекс физико-механических свойств поверхностного слоя, способствующий повышению эксплуатационных показателей деталей.

Наиболее широкое применение нашла алмазная доводка плоских поверхностей при обработке твердых и сверхтвердых материалов, включая изделия из натуральных камней и различных монокристаллов. Вместе с тем традиционная доводка изделий из таких материалов характеризуется относительно низкой производительностью по съему припуска и трудностью получения обработанных поверхностей с малой шероховатостью в силу высокой хрупкости.

Одно из направлений интенсификации процесса доводки плоских поверхностей связано с применением низкочастотных колебаний [1, 2], которые вводят в зону обработки в различных направлениях. Однако, несмотря на некоторое положительное их влияние на показатели процесса доводки, в силу низкого частотного диапазона, сложности и громоздкости используемых вибраторов такой способ доводки не получил широкого промышленного применения. Расширение технологических возможностей и повышение управляющего влияния колебаний в процессах плоской доводки материалов связано с применением ультразвуковых колебаний. Волновой характер их распространения позволяет возбуждать на поверхности притира (инструмента) сложные высокочастотные акустические поля с использованием различных типов волн [3], обеспечивая тем самым целенаправленное влияние на кинематику и динамику процесса доводки с целью повышения производительности и качества обработки.

Цель данной работы – экспериментальная оценка степени влияния ультразвуковых колебаний на производительность и качество алмазной доводки плоских поверхностей изделий из хрупких материалов, в частности натуральных камней.

Краткая характеристика, область применения и пути совершенствования абразивной притирки плоских поверхностей. Абразивная притирка плоских поверхностей представляет собой одну из разновидностей финишной обработки изделий. С ее помощью достигаются минимальная величина микронеровностей обрабатываемых поверхностей, их высшая геометрическая точность, обеспечивается комплекс физико-механических свойств поверхностного слоя, способствующий повышению эксплуатационных показателей деталей. Принцип абразивной доводки состоит во взаимодействии твердых абразивных зерен с менее твердой обрабатываемой поверхностью, в результате чего происходит снятие материала. Многие операции притирки плоских поверхностей выполняются вручную, в частности доводка лекальных линеек, шаблонов, плиток, калибров и других деталей, требующих высокой точности. Особенно велик удельный вес ручной доводки в общем объеме доводочно-притирочных работ в инструментальных цехах машиностроительных заводов.

Обобщенный анализ современных представлений о механизме съема материала при абразивной притирке свидетельствует о том, что в его основе лежат механические, химические и физико-химические явления. Механические процессы связаны с выкалыванием и отрывом частиц обрабатываемого материала, образованием стружки, пластическим и упругим деформированием. Преобладание какого-либо

вида разрушения связано с физико-механическими свойствами обрабатываемого материала, родом и зернистостью абразива, его прочностью, геометрией зерна, свойствами жидкой фазы абразивной суспензии, динамическими параметрами процесса притирки – величинами и законом изменения давления, скорости и ускорения в процессе движения детали по рабочей поверхности притира. Физико-химические процессы связаны с образованием окисных пленок.

Сложность и многообразие явлений, сопутствующих процессу притирки поверхностей, определяют несколько направлений его совершенствования и интенсификации, в частности использование новых конструкций и материалов притирочных дисков, а также применение поверхностно-активных веществ. Тем не менее ведущая роль в процессах притирки плоских поверхностей принадлежит вопросам оптимизации кинематических и динамических факторов.

Для повышения качества обработанных деталей был предложен способ притирки с пульсирующим давлением [3]. Он позволяет периодически снижать коэффициент трения, который не превышает оптимального значения, что уменьшает силы сцепления и адгезии, а соответственно число царапин, задигов и наростов.

С целью интенсификации процесса притирки плоских поверхностей широко применяют низкочастотные колебания, которые вводят в рабочую зону в различных направлениях. Доказано, что под действием тангенциально направленных колебаний производительность притирки по съему припуска возрастает пропорционально их амплитуде. При этом шероховатость поверхности также уменьшается, что объясняется более интенсивным изнашиванием абразивных зерен и выравниванием их гранулометрического состава. Таким образом, применение низкочастотных колебаний позволяет за счет изменения направления, амплитуды и частоты активно влиять на выходные параметры процесса абразивной притирки плоских поверхностей.

Расширение возможностей и повышение эффективности управляющего влияния колебаний в этих процессах финишной обработки материалов связаны с применением ультразвуковых колебаний. Волновой характер их распро-

странения позволяет возбуждать на поверхности притира сложные акустические поля с использованием различных типов волн, обеспечивая тем самым целенаправленное влияние на кинематику и динамику процесса притирки.

Установлено, что в сравнении с традиционным съем материала при ультразвуковой притирке возрастает на 50...150 %, шероховатость обработанных поверхностей несколько повышается. Исходя из этого предлагается применять ультразвук на предварительных стадиях притирки.

Для определения степени влияния на показатели доводки направления ультразвуковых колебаний была выполнена серия экспериментов без относительного перемещения детали по притиру. В основу экспериментов было положено то обстоятельство, что положения пучностей, соответствующих вертикальным и горизонтальным стоячим волнам, неодинаковы. Амплитуда вертикальных и горизонтальных колебаний в пучностях смещений составляла 2 мкм. Установлено, что ведущая роль в повышении съема припуска принадлежит вертикально направленным к обрабатываемой поверхности колебаниям.

С целью поддержания плоскостности рабочей поверхности диска-притира предложен способ ультразвуковой притирки с варьированием частоты возбуждаемых в нем колебаний [3]. Его сущность заключается в периодическом изменении характера распределения амплитуд колебательных смещений на рабочей поверхности диска-притира с изменением частоты возбуждения. Это сопровождается соответствующим перемещением зон преимущественного износа по поверхности диска-притира, за счет чего достигается его равномерное изнашивание.

Таким образом, применение ультразвука – эффективное средство управляющего и интенсифицирующего воздействия на выходные параметры притирки плоских поверхностей. Вместе с тем для расширения области промышленного использования ультразвуковой притирки плоских поверхностей необходимо определить ее технологические характеристики и установить их взаимосвязь с режимами обработки.

Основные положения методики проведения экспериментальных исследований. На рис. 1 показана схема акустической колебательной системы, примененной в исследованиях. Диск-

притир диаметром 185 мм и толщиной 8,5 мм с помощью резьбового соединения соосно закреплялся на выходном торце конического концентратора 2 в пучности продольной ультразвуковой волны (эпюра 4), возбуждаемой от пьезокерамического преобразователя 3. На резонансной частоте 21,6 кГц в диске-притире возбуждалась осесимметричная изгибная волна с распределением амплитуд вертикальных смещений по его радиусу в соответствии с эпюрой 5. Видно, что амплитуда колебательных смещений точек рабочей поверхности диска-притира по его радиусу переменная. Так, на радиусах, соответствующих пучностям изгибной волны, она достигает максимальных значений, а в областях, прилегающих к узловым окружностям изгибной волны, ее значение равно нулю. Очевидно, такая ситуация будет определять различную степень влияния ультразвука на показатели процесса доводки для различных зон вдоль радиуса диска-притира. Вместе с тем оптимальным вариантом для операции доводки плоских поверхностей является возбуждение в диске-притире именно изгибной волны.

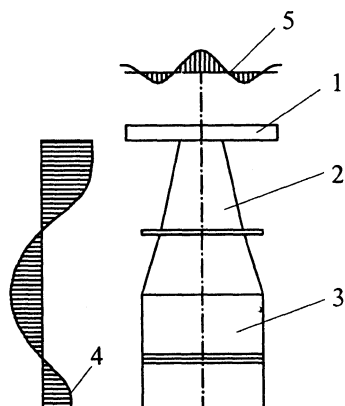


Рис. 1

На базе разработанной акустической колебательной системы был изготовлен опытный образец ультразвукового настольного доводочного станка, принципиальная схема которого приведена на рис. 2.

Он состоит из сварного корпуса 1, облицованного листовым материалом; верхней плиты 2, прикрепленной к корпусу, и шпинделя 3, роль которого выполняет установленная в подшипниках качения акустическая система. На

плите станины крепится верхний столик для установки на нем ограничного приспособления. Шпиндель установлен в опорах качения и имеет на конце посадочный пояс для установки и крепления алмазного инструмента 4. Для охлаждения и смазки в зону шлифования подается проточная вода через отдельный питатель. Питание акустической системы шпиндельного узла осуществлялось от генератора ультразвуковых колебаний через токосъемник в шпинделе. Пуск, переключение скоростей и останов электродвигателя привода вращения производились по электрической схеме через трансформатор и выпрямительный блок.

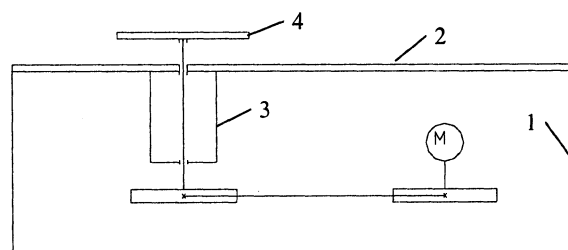


Рис. 2

Для проведения сравнительных испытаний были выбраны следующие материалы: нефрит, яшма и корунд: все они относятся к группе хрупких материалов, имеющих различную структуру и твердость. Образцы изготовлялись механической обработкой из заготовок и представляли в поперечном сечении квадрат со стороной 7,1 мм, а в продольном – прямоугольник высотой 12...15 мм.

Испытуемый образец устанавливался в пазу специальной оправки и закреплялся стопорным винтом. Оправка закреплялась на нижнем торце штока, вертикально установленного в отверстии кронштейна по скользящей посадке. На верхнем торце штока закреплялась площадка для размещения сменных грузов, обеспечивающих прижим образца к рабочей поверхности диска-притира с требуемым давлением. Кронштейн устанавливался на стойке, жестко смонтированной на станине станка, и фиксировался с помощью стопорного винта. Такая конструкция позволила регулировать положение кронштейна по высоте вместе с испытуемым образцом относительно

рабочей поверхности диска-притира, а также изменять положение образца по радиусу инструмента поворотом на стойке.

Для проведения сравнительных испытаний был изготовлен диск-притир из стали 45, на рабочей поверхности которого сформирован алмазонаосный слой толщиной 3 мм зернистостью 80/63 методом спекания. В качестве критерия производительности процесса алмазной доводки была принята величина их линейного износа за фиксированное время обработки в обычных условиях и с ультразвуком. Определение величины линейного износа образцов сводилось к измерению их высоты до и после испытания с помощью специального приспособления и индикатора часового типа с ценой деления 0,01 мм. При этом, учитывая сравнительно большую площадь изнашивания образцов (0,5 см²), а также возможность их установки с перекосом из-за наличия зазоров, измерение высоты образцов производилось в пяти точках обработанной поверхности с последующим вычислением ее среднего арифметического значения.

С целью количественной оценки степени влияния ультразвука на производительность процесса доводки использовалось значение коэффициента эффективности η_{Δ} , определяемого по выражению

$$\eta_{\Delta} = \left(1 - \frac{\Delta_{ст}}{\Delta_{ак}} \right) \cdot 100 \%,$$

где $\Delta_{ст}$ и $\Delta_{ак}$ – соответственно значения линейного износа образцов при доводке в обычных условиях и с ультразвуком при неизменных технологических режимах обработки.

Качество обработанной поверхности образцов оценивалось путем измерения их шероховатости с помощью профилометра-профилографа модели 252. Измерение параметров микрогеометрии производилось в направлении, перпендикулярном следам обработки на поверхности образцов. В ходе сравнительных испытаний варьировались следующие параметры: статическое давление $p_{ст} = 0,1; 0,2$ и $0,3$ МПа; частота вращения диска-притира $n = 800, 1400$ и 2000 об/мин, радиус дорожки на диске-

притире $r = 65$ и 75 мм, амплитуда ультразвуковых колебаний на рабочей дорожке диска-притира $A_0 = 2...6$ мкм. Продолжительность обработки образцов была постоянной и составляла 1 мин.

Результаты экспериментальных исследований. Доминирующее влияние на интенсивность съема припуска (т. е. производительность) при ультразвуковой доводке оказывают: амплитуда колебательных смещений точек рабочей поверхности диска-притира, а следовательно, и радиус дорожки, на которой происходит обработка; частота вращения диска-притира, т. е. скорость резания; величина статического давления.

Остановимся на влиянии частоты вращения (т. е. скорости резания) диска-притира на интенсивность съема припуска. На рис. 3а приведены зависимости интенсивности минутного съема Δ с поверхности образца из яшмы от частоты вращения диска-притира n при доводке в обычных условиях и с ультразвуком ($r = 65$ мм; $p_{ст} = 0,1$ МПа) для различных значений амплитуды колебаний. Отсюда видно, что при обработке в обычных условиях с повышением частоты вращения диска-притира интенсивность минутного съема пропорционально возрастает. При доводке с ультразвуком аналогичная тенденция сохраняется, но темп возрастания минутного съема оказывается меньшим по сравнению с обработкой в обычных условиях, в результате чего зависимость $\Delta_{ак}(n)$ носит более пологий характер. Кроме того, было отмечено, что при малых значениях амплитуды колебаний порядка 1,0...1,5 мкм на частотах вращения диска-притира, превышающих 1800 об/мин, интенсивность съема припуска может становиться меньше ее значения при традиционной обработке. По мере увеличения амплитуды колебаний интенсивность съема припуска пропорционально возрастает, оставаясь в условиях проводимых экспериментов выше, чем при обработке в обычных условиях при всех значениях частоты вращения инструмента.

Как видно (рис. 3а), за счет ультразвукового воздействия можно даже на малых частотах вращения диска-притира ($n = 800$ об/мин) обеспе-

чить интенсивность съема припуска (производительность), превышающую ее значение при обычной доводке на больших частотах вращения инструмента ($n = 2000$ об/мин). Это имеет важное практическое значение, так как позволяет отказаться от использования высокоскоростных приводов вращения, которые вызывают повышенный уровень вибраций в системе «станок – приспособление – инструмент – деталь».

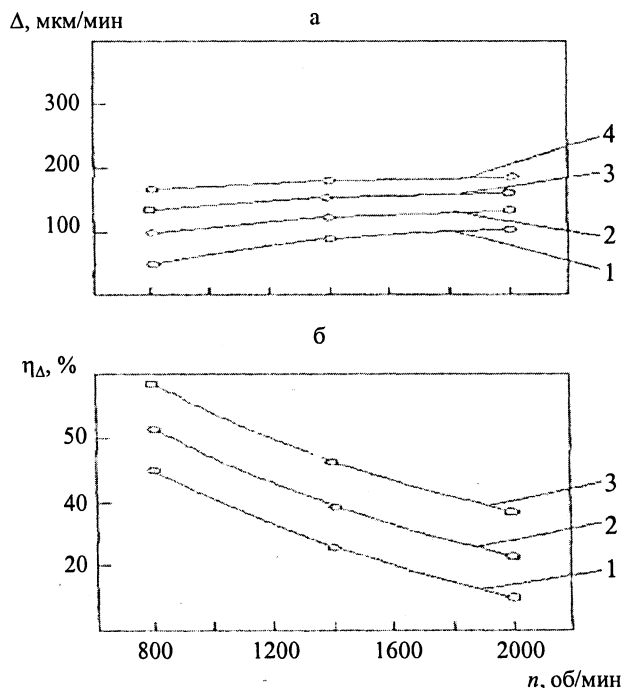


Рис. 3. а – зависимость минутного съема при доводке образцов из яшмы от частоты вращения диска-притира: 1 – без УЗК; 2 – с УЗК $A_0 = 2$ мкм; 3 – с УЗК $A_0 = 4$ мкм; 4 – с УЗК $A_0 = 6$ мкм ($p_{ст} = 0,1$ МПа); б – зависимость эффективности воздействия ультразвука на повышение минутного съема при доводке образцов из яшмы от частоты вращения диска-притира при различных значениях амплитуды колебаний: 1 – $A_0 = 2$ мкм; 2 – 4; 3 – 6 мкм

Количественно степень влияния ультразвука на интенсивность съема припуска отражает зависимость $\eta_{\Delta}(n)$ при различных значениях амплитуды колебаний (рис. 3б). Из них следует, что максимальное интенсифицирующее воздействие на съем припуска, т. е. на производительность процесса доводки, ультразвук оказывает при невысоких частотах вращения диска-притира. По мере увеличения n значение η_{Δ} снижается, а с повышением амплитуды ультразвуковых коле-

баний – возрастает, достигая в условиях экспериментов значений порядка 78...80 %.

Такой характер зависимостей $\Delta_{ak}(n)$ и $\eta_{\Delta}(n)$ обусловлен изменением так называемого скоростного коэффициента k_v , представляющего отношение амплитуды колебательной скорости $v_{0ak} = 2\pi f A_0$, где f – частота ультразвуковых колебаний, к скорости относительного скольжения поверхностей, т. е. к скорости резания $v_0 = \pi D n / 1000$ (м/мин), где D – диаметр рабочей дорожки на диске-притире ($k_v = v_{0ak} / v_0$).

При этом [3, 4] увеличение k_v , равносильное увеличению v_{0ak} при повышении амплитуды колебаний или уменьшении v_0 снижением частоты вращения диска-притира, позволяет повысить степень влияния ультразвука на съем припуска. И наоборот, со снижением k_v значение η_{Δ} также уменьшается. В случае доводки образцов на узловой окружности ($r = 87$ мм), т. е. где действие ультразвуковых колебаний отсутствует ($k_0 = 0$), заметного влияния на изменение интенсивности съема припуска ультразвук не оказывает. Следовательно, для достижения максимального интенсифицирующего воздействия ультразвука на производительность обработки необходимо назначать такие акустические параметры и скорости резания, при которых значение k_v было бы наименьшим.

С увеличением статического давления интенсивность съема припуска образцов во всех случаях возрастает. При этом в условиях обработки ультразвуком ее значение остается большим по сравнению с доводкой в обычных условиях. Вместе с тем с повышением $p_{ст}$ значение η_{Δ} несколько снижается. Это обусловлено тем, что по мере увеличения статической нагрузки происходит увеличение так называемого предварительного натяга в акустической колебательной системе, что вызывает снижение амплитуды колебаний, действующих в зоне контакта [3]. Поэтому для достижения более высокой эффективности ультразвука, необходимо повышение статической нагрузки сопровождать соответствующим увеличением ам-

плитуды колебаний, т. е. управлять интенсивностью ультразвука.

Отмеченные выше закономерности влияния ультразвука на интенсивность съема припуска идентичны при обработке всех остальных исследуемых материалов образцов. Вместе с тем установлено, что с увеличением твердости обрабатываемого материала степень воздействия ультразвука возрастает (рис. 4). В процессе доводки весьма важно также достижение требуемого качества обработанных поверхностей. В табл. 1 приведены данные, отражающие изменение параметра шероховатости R_a поверхности образцов из нефрита в зависимости от частоты вращения диска при доводке как в обычных условиях, так и при ультразвуковом воздействии с различной амплитудой колебаний в зоне обработки ($r = 65$ мм; $p_{ст} = 0,1$ МПа).

Из анализа данных видно, что в обычных условиях доводки по мере увеличения частоты вращения диска-притира (скорости резания) значение параметра R_a снижается, причем темп снижения относительно невелик. Иная картина наблюдается при доводке образцов с ультразвуком. Так, на малых частотах вращения инструмента ($n = 800$ об/мин) значение параметра R_a может быть больше, чем при доводке в обычных условиях. При этом оно возрастает с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний. По мере повышения частоты вращения инструмента величина шероховатости R_a уменьшается так же, как и при обычной доводке. В результате при неизменном значении амплитуды колебаний увеличение частоты вращения инструмента приводит к изменению шероховатости. На малых скоростях она принимает одинаковые значения в обоих слу-

чаях доводки, и уменьшается – при дальнейшем увеличении n . Причем с увеличением амплитуды колебаний частота вращения диска-притира, соответствующая равенству параметра R_a , смещается в сторону больших значений n .

Таким образом, с целью обеспечения минимальной шероховатости окончательную доводку поверхности в условиях ультразвукового воздействия необходимо выполнять на режимах, при которых значение k_v минимально.

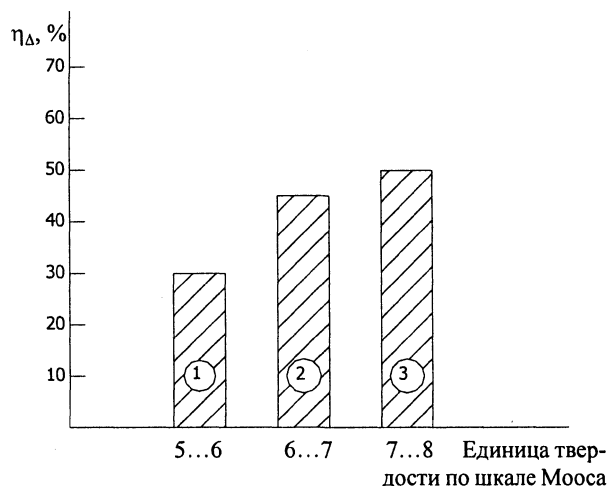


Рис. 4. Зависимость эффективности воздействия ультразвука на повышение минутного съема от твердости обрабатываемых образцов: 1 – нефрит; 2 – яшма; 3 – корунд ($n = 1400$ об/мин; $r = 65$ мм; $A_0 = 4$ мкм; $p_{ст} = 0,1$ МПа)

Аналогичные зависимости получены при обработке яшмы и корунда. При этом с повышением твердости обрабатываемого материала степень влияния ультразвука на снижение шероховатости поверхности возрастает. Так, при обработке корунда ($n = 2000$ об/мин; $p_{ст} = 0,1$ МПа; $A_0 = 2$ мкм) снижение параметра R_a под действием ультразвука про-

Таблица 1

Частота вращения инструмента, об/мин	$n = 800$				$n = 1400$				$n = 2000$			
	Без УЗК	С УЗК			Без УЗК	С УЗК			Без УЗК	С УЗК		
		$A_0 = 2$ мкм	$A_0 = 4$ мкм	$A_0 = 6$ мкм		$A_0 = 2$ мкм	$A_0 = 4$ мкм	$A_0 = 6$ мкм		$A_0 = 2$ мкм	$A_0 = 4$ мкм	$A_0 = 6$ мкм
Значение параметра R_a , мкм	4,8	5,6	6,3	6,8	4,2	3,6	4,1	4,7	3,9	2,3	2,7	3,5

изошло на 50 %; при обработке яшмы – на 42; при обработке нефрита – на 38 %. Это дает основание предположить, что применение ультразвука значительно улучшает качество поверхностей изделий из твердых и сверхтвердых материалов.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что применение ультразвука позволяет существенно повысить скорость съема припуска (производительность) в процессе обработки хрупких неметаллических материалов по сравнению с доводкой в обычных условиях.

2. Установлено, что основными технологическими параметрами, влияющими на эффективность ультразвукового воздействия в отношении производительности процесса доводки, являются амплитуда колебаний рабочей поверхности диска в зоне обработки; частота вращения, определяющая скорость резания; величина статического давления и твердость обрабатываемого материала. При этом степень влияния ультразвука на повышение производительности доводки определяется, главным образом, соотношением амплитуды колебательной и линейной скоростей резания. С увеличением этого отношения производительность обработки возрастает.

3. Степень воздействия ультразвука на повышение производительности процесса доводки при прочих равных условиях зависит от твердости (хрупкости) обрабатываемого материала, с повышением которой она возрастает.

4. Показано, что при определенном соотношении акустических и технологических параметров можно значительно снизить шероховатость обработанных поверхностей в сравнении с доводкой без воздействия ультразвуковых колебаний.

5. Установлено, что эффект снижения шероховатости определяется, главным образом, кинематическим фактором, т. е. соотношением амплитуды колебательной скорости, действующей в зоне обработки, и скорости резания. По мере уменьшения этого соотношения эффективность воздействия ультразвука на снижение шероховатости обработанной поверхности возрастает.

6. Степень снижения шероховатости доведенной поверхности при ультразвуковом воздействии при прочих равных условиях зависит от твердости (хрупкости) обрабатываемого материала, с увеличением которой она повышается.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаришин К. В., Диркс Г. Г., Драхлин М. Е. Закономерности движения деталей по колеблющейся плите при инерционной круговой доводке // Алмазно-абразивная обработка. – 1969. – № 64. – С. 132–144.
2. Серебренник Ю. Б., Зальцберг В. К., Караулов К. С. Вибрационная доводка камней-самоцветов // Алмазно-абразивная обработка. – Пермь, 1967. – С. 122–128.
3. Киселев М. Г., Минченя В. Т., Ибрагимов В. А. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. – Мн.: Тесей, 2002. – 344 с.
4. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.