

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ УЛЬТРАЗВУКА НА ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОЙ ДОВОДКИ ЮВЕЛИРНЫХ КАМНЕЙ

## Experimental estimation of the influence of ultrasound on the basic parameters of the process of diamond lapping of jewellery stones



*М.Г. Киселев*  
*M.G. Kiselev*



*В.П. Луговой*  
*V.P. Lugovoj*



*Ф. Хегжази*  
*F. Hegazi*

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Приведены результаты экспериментальных исследований по оценке влияния ультразвуковых колебаний, возбуждаемых на рабочей поверхности диска-притира, на производительность процесса алмазной доводки ювелирных камней, качество обработанных поверхностей и величину сил резания, действующих в зоне обработки. Установлено, что по сравнению с традиционной доводкой применение ультразвука позволяет повысить производительность процесса, улучшить качество доведенных поверхностей и снизить величину сил резания, действующих в зоне обработки. Причем степень проявления этих эффектов можно целенаправленно управлять путем соответствующего сочетания уровней технологических и акустических режимов доводки.

In this report you can find the result of the experimental researches of the estimation of the influence of ultrasound oscillations, which are excited on the working surface of lap-disk, on the process of the diamond lapping jewellery stones, quality of finished surfaces and size of the cutting force acting in the processing zone. It is determined, that in comparison with the traditional lapping, the use of the ultrasound helps to increase the capacity of the process to improve the quality of the lapped surfaces and to decrease the size of the cutting force acting in the processing zone. At the same time the level of developing of these effects can be controlled with the corresponding of the levels of technological conditions of lapping

Обработка ювелирных камней и других сверхтвердых материалов преимущественно осуществляется методом их алмазной доводки. Однако она характеризуется весьма низкой производительностью и большой трудоемкостью процесса по достижению малой шероховатости обработанных поверхностей, что обусловлено высокой твердостью и хрупкостью таких материалов.

Существенное расширение технологических возможностей в сочетании с возможностью эффективного управления процессом алмазной доводки плоских поверхностей можно обеспечить путем применения энергии ультразвуковых колебаний. Волновой характер их распространения позволяет сравнительно легко возбуждать на поверхности инструмента сложные акустические поля с использованием различных типов волн, направлением и величиной колебательных смещений которых можно целенаправленно управлять. Однако из-за отсутствия систематизированных данных, отражающих влияние ультразвуковых колебаний на основные показатели процесса алмазной доводки плоских поверхностей, такой способ их обработки пока не нашел широкого промышленного применения.

В связи с этим, целью настоящих исследований явилось изучение эффективности воздействия ультразвуковых колебаний, возбуждаемых в инструменте, на основные показатели процесса алмазной доводки плоских поверхностей ювелирных камней. В частности, на интенсивность съема припуска, величину сил резания, действующих в зоне обработки, и на качество доведенных поверхностей. Затем на основании анализа полученных результатов дать количественную оценку степени влияния ультразвука на эти показатели и определить условия его наиболее эффективного использования в процессе алмазной доводки ювелирных камней.

Экспериментальные исследования проводились на специально созданном ультразвуковом доводочном станке с вертикально расположенной осью шпинделя. Его отличие от традиционных станков такого типа состоит в том, что шпиндель выполнен в виде вращающейся акустической головки. Она содержит пьезокерамический преобразователь продольных ультразвуковых колебаний, конический полуволновой концентратор, на выходном торце которого жестко закреплялся диск-притир (инструмент). В качестве последнего использовался стальной диск диаметром 180 мм, конструктивное исполнение которого показано на рис. 1. На его рабочей (торцевой) поверхности с помощью металлической связки был сформирован алмазозоносный слой зернистостью 80/63. На резонансной частоте 20,1 кГц в материале диска возбуждалась осесимметричная изгибная волна. Ее узловые окружности (рис. 1) располагались на диаметрах 110 и 165 мм, а пучности — в центре диска и на диаметрах 130 и 180 мм.

Особенность распространения изгибной волны заключается в том, что она имеет общие признаки как продольной, так и

поперечной волн. Поэтому точки рабочей поверхности диска-притира совершают колебательное смещение в вертикальном направлении с амплитудой  $A_v$  и в радиальном с амплитудой  $A_p$  (рис. 1). При этом изменение амплитуды вертикально направленных колебаний по радиусу диска носит четко выраженный циклический характер, т.е. имеет место чередование пучностей и узлов в соответствии с формой ультразвуковой волны. В то же время амплитуда радиально направленных колебаний плавно возрастает от нулевого значения в центре диска до максимального на периферии инструмента. Таким образом, при обработке с ультразвуком интенсивность акустического поля по радиусу инструмента оказывается переменной, что предопределяет различную степень влияния колебаний на показатели процесса доводки с изменением места расположения заготовки относительно оси вращения диска-притира.

Для определения эффективности воздействия ультразвука на основные показатели процесса алмазной доводки ювелирных камней был проведен комплекс сравнительных испытаний по их об-

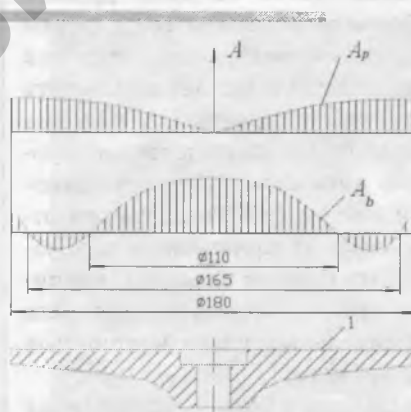


Рис. 1. Конструктивное исполнение диска-притира (1) и эпюры распределения на его рабочей поверхности вертикально направленных ( $A_v$ ) и радиально направленных ( $A_p$ ) колебательных смещений

работке в обычных условиях и с ультразвуковыми колебаниями. В ходе их выполнения оценивались производительность доводки, величина сил резания, действующих в зоне обработки, а также качество доведенных поверхностей.

В качестве образцов использовались натуральные камни из нефрита, яшмы и корунда. Путем механической обработки из них изготавливались образцы в виде прямоугольных пластин высотой 12...15 мм с квадратным поперечным сечением 7,1x7,1 мм. Испытуемый образец устанавливался в специальном приспособлении и с заданной статической нагрузкой прижимался к рабочей поверхности диска-притира на различных его радиусах. Конструкция приспособления позволяла регистрировать величину сил резания, действующих в зоне обработки, с помощью упругой тензومترической балки, усилителя постоянного тока и осциллографа.

Сравнительные исследования процесса доводки производились при следующих параметрах: статическое давление составляло  $P_{cm} = 0,1; 0,2$  и  $0,3$  МПа; частота вращения диска-притира,  $n = 800; 1400$  и  $2000$  об/мин; радиус рабочей дорожки диска-притира  $r = 55, 65; 75$  и  $87$  мм.; амплитуда вертикально направленных колебаний  $A_v$  на рабочей дорожке диска-притира изменялась от 2 до 6 мкм.

В качестве критерия производительности процесса алмазной доводки была принята величина минутного линейного износа образцов при обработке их в обычных условиях ( $\Delta_{cm}$ ) и с ультразвуком ( $\Delta_{ак}$ ). Степень влияния ультразвука на повышение производительности доводки количественно оценивалось по значению коэффициента эффективности, определяемого по выражению

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

На рис. 2 а приведены зависимости минутного линейного износа образцов из яшмы от частоты вращения диска притира при доводке в обычных условиях и с ультразвуком при различных значениях амплитуды вертикально-направленных колебаний. Их анализ показывает, что при обработке в обычных условиях с повышением частоты вращения инструмента значение минутного съема пропорционально возрастает, что объясняется увеличением пути относительного скольжения взаимодействующих поверхностей за фиксированное время доводки. Аналогичная тенденция сохраняется и при обработке с ультразвуком, хотя темп нарастания минутного съема оказывается меньшим, в результате

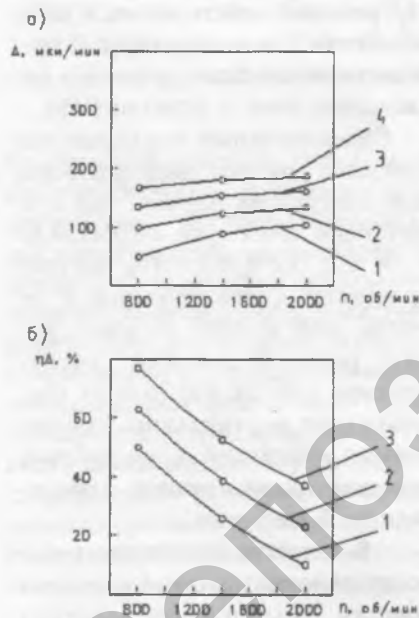


Рис. 2. Зависимость изменения показателей доводки яшмы от частоты вращения инструмента: а) минутного съема при: 1 - без УЗК; 2 - с УЗК  $A_u = 2$  мкм; 3 - с УЗК  $A_u = 4$  мкм; 4 - с УЗК  $A_u = 6$  мкм ( $r = 65$  мм;  $P_{сг} = 0,1$  МПа); б) эффективности воздействия ультразвуковых колебаний при: 1 -  $A_u = 2$  мкм; 2 -  $A_u = 4$  мкм; 3 -  $A_u = 6$  мкм

чего зависимость  $\Delta_{\text{лн}}$  ( $n$ ) носит более пологий характер. По мере увеличения амплитуды колебаний интенсивность съема припуска пропорционально возрастает, оставаясь выше, по сравнению с традиционной доводкой во всем диапазоне изменений  $n$ .

Характер изменения эффективности воздействия ультразвука на повышение производительности доводки образцов из яшмы от частоты вращения диска-притира и амплитуды колебаний отражают зависимости, приведенные на рис. 2б. Из них видно, что максимальное повышение производительности процесса доводки достигается при низких частотах вращения диска-притира, а по мере увеличения  $n$  значение коэффициента  $\eta_d$  существенно снижается. С повышением амплитуды ультразвуковых колебаний оно возрастает, достигая в условиях проводимых экспериментов значения порядка 75...80 %.

Важно подчеркнуть, что при доводке с ультразвуком даже на малых частотах вращения диска-притира ( $n = 800$  об/мин) производительность существенно превышает её значение при обычной доводке на больших частотах (2000 об/мин). Данное обстоятельство имеет важное практическое значение так как позволяет существенно снизить уровень скоростного режима обработки и соответственно, уровень динамической нагруженности системы СПИД, а также отказаться от применения в доводочных станках сложных, прецизионных высокоскоростных шпиндельных узлов и приводов их вращения.

На основании сопоставления данных, полученных при доводке образцов из различных материалов, установлено, что с увеличением их твердости степень влияния ультразвуковых колебаний на повышение производи-

тельности доводки возрастает (рис. 3). Это позволяет обосновано утверждать о высокой эффективности применения ультразвука для интенсификации процесса доводки изделий из твердых и сверхтвердых материалов, включая монокристаллы алмаза.

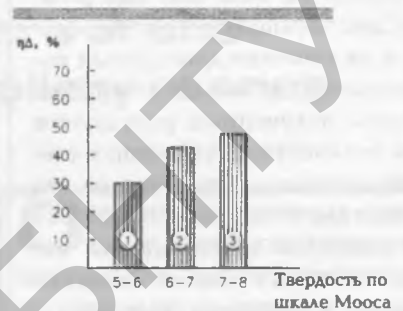


Рис. 3. Зависимость эффективности воздействия ультразвука на повышение минутного съема от твердости обрабатываемых образцов. 1 - нефрит; 2 - яшма; 3 - корунд ( $n = 1400$  об/мин;  $r = 65$  мм;  $A_u = 4$  мкм;  $P_{сг} = 0,1$  МПа)

В тех случаях, когда алмазная доводка образцов осуществлялась на дорожках диска-притира, радиус которых соответствовал узловым окружностям изгибной волны ( $r = 55$  и  $78$  мм), т.е. когда действие вертикально направленных колебаний практически отсутствовало ( $A_u = 0$ ), ощутимого влияния на повышение съема припуска ультразвук не оказывал. Отсюда вытекает принципиально важный вывод о том, что доминирующую роль в интенсифицирующем воздействии ультразвука на процесс доводки хрупких материалов играют вертикальные колебания.

Влияние ультразвуковых колебаний на качество обработанных поверхностей образцов из нефрита отражают данные, приведенные в табл. 1, полученные при доводке в обычных условиях и с ультразвуком (УЗК) ( $r = 65$  мм,  $P_{сг} = 0,1$  МПа).

Частота вращения инструмента, об/мин	$n = 800$ ,				$n = 1400$ ,				$n = 2000$ ,			
	Без УЗК	Амплитуда колебаний, мкм			Без УЗК	Амплитуда колебаний, мкм			Без УЗК	Амплитуда колебаний, мкм		
		2	4	6		2	4	6		2	4	6
Шероховатость $R_a$ , 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

Их анализ показывает, что при доводке в обычных условиях по мере увеличения частоты вращения диска-притира значение параметра  $R_a$  шероховатости обработанной поверхности снижается. В случае доводки образцов с ультразвуком происходит следующее. На низких частотах инструмента ( $n = 800$  об/мин) значение параметра  $R_a$  оказывается большим, чем при доводке в обычных условиях. Причем с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний, оно возрастает. По мере повышения частоты вращения инструмента значение параметра  $R_a$  вначале становится равным его величине при доводке в обычных условиях, а при больших значениях  $n$  — меньше. По мере увеличения амплитуды колебаний частота вращения диска-притира, соответствующая равенству параметра  $R_a$ , смещается в сторону больших значений  $n$ .

Анализ данных, полученных при доводке образцов из различных материалов, свидетельствует о том, что с повышением их твердости степень влияния ультразвука на снижение шероховатости обработанной поверхности возрастает. Так при доводке корунда ( $n = 2000$  об/мин;  $P_{ст} = 0,1$  МПа;  $A_в = 2$  мкм) снижение параметра  $R_a$  произошло на 50%, меньше при обработке яшмы на 42% и еще меньше при обработке нефрита — на 38%.

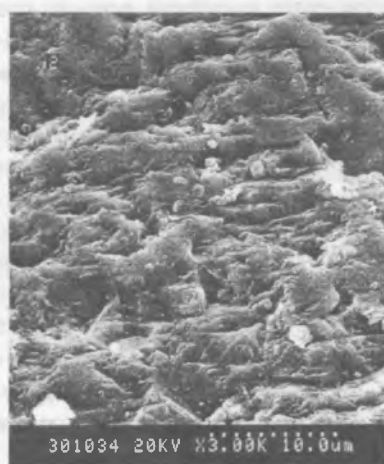
На рис. 4 приведены фотографии поверхностей образцов из

корунда, доведенных на выше указанных режимах при обработке в обычных условиях и с ультразвуком. Из них четко видны различия в топографиях доведенных поверхностей. Так при доводке в обычных условиях она представляет собой совокупность перекрывающихся друг друга микрократеров, возникающих в результате хрупкого микроскалывания частиц корунда.

При обработке с ультразвуком на поверхности отсутствуют микрократеры, а ее микрорельеф приобретает более сглаженный, равномерный характер. Очевидно, ультразвуковые колебания создают благоприятные условия для осуществления сдвиговых деформаций при хрупком разрушении поверхностных сло-

ев корунда, обуславливая тем самым снижение шероховатости доведенной поверхности.

Одним из важных показателей изучаемого процесса является величина силы резания, действующей в зоне обработки, а также характер ее изменения в зависимости от технологических и акустических параметров доводки. Особенно ее влияние проявляется при доводке хрупких материалов, в частности, ювелирных камней. Их обрабатываемые поверхности весьма чувствительны к уровню силового нагружения, результатом чего может быть образование на них различных дефектов в виде сколов, глубоких рисок и трещин. Поэтому для достижения высокого качества доведенных поверхностей за



а



б

Рис. 4. Фотографии поверхности образцов из корунда ( $\times 300$ ), обработанных при  $P_{ст} = 0,1$  МПа,  $n = 2000$  об/мин,  $r = 65$  мкм а — в обычных условиях; б — с ультразвуком при  $A_в = 4$  мкм

минимальное время их обработки, ее необходимо осуществлять при таких условиях, когда, наряду с высокой производительностью по съему припуска, процесс протекает при малых значениях сил резания.

Согласно [1] эти условия могут быть обеспечены за счет введения в зону обработки ультразвуковых колебаний.

В ходе проведения сравнительных экспериментов определялась величина силы резания при доводке образцов в обычных условиях ( $F_{cm}$ ) и с ультразвуком ( $F_{ак}$ ). Количественная оценка степени влияния ультразвуковых колебаний на снижение сил резания в процессе алмазной доводки производилась по значению коэффициента эффективности  $\eta_F$ , определяемого по выражению

$$\eta_F = \left(1 - \frac{F_{ак}}{F_{cm}}\right) \cdot 100\% \quad (2)$$

На рис. 5 а приведены зависимости изменения силы резания по радиусу дорожки инструмента при доводке образцов из корунда при частоте вращения доводочного диска равной 740 об/мин. Из них следует, что при доводке в обычных условиях по мере увеличения радиуса дорожки на инструменте значительные силы резания монотонно снижаются. Отсюда следует вы-

вод, что увеличение скорости резания, пропорциональное радиусу дорожки при неизменной частоте вращения диска и нагрузке, приводит к уменьшению силы резания.

При обработке с ультразвуком зависимость силы резания от радиуса дорожки на доводочном диске коренным образом изменяется. Она приобретает циклический характер, изменяясь в соответствии с формой изгибаемой волны, возбуждаемой в материале диска-притира. Так на радиусах, соответствующих ее пучностям ( $r = 45, 65$  и  $75$  мм), величина силы резания оказывается существенно ниже, чем при доводке в обычных условиях. При установке образца на дорожки, радиус которых соответствует узловым окружностям изгибаемой волны, значение силы резания возрастает, приближаясь к ее величине при доводке в обычных условиях.

В результате зависимость коэффициента эффективности воздействия ультразвука на снижение сил резания от радиуса дорожки на диске-притире также имеет ярко выраженный циклический характер (рис. 5 б). Причем по мере увеличения радиуса дорожки, соответствующего пучностям изгибаемой волны, что при прочих равных условиях сопровождается пропорциональным

возрастанием скорости резания, значение коэффициента  $\eta_F$  существенно снижается. На основании полученных результатов можно констатировать, что ведущая роль в снижении сил резания при алмазной доводке ювелирных камней принадлежит вертикально направленным колебаниям, возбуждаемым на рабочей поверхности диска-притира.

Проанализируем влияние этих колебаний на основные показатели процесса алмазной доводки заготовок из ювелирных камней на основе рассмотрения особенностей их контактного взаимодействия с рабочей поверхностью диска-притира. Как известно [1], в этом случае взаимодействие трущихся поверхностей может протекать в двух режимах: в режиме скользящего акустического контакта и в виброударном режиме. Первый характеризуется наличием постоянного механического контакта между поверхностями, которые колеблются как единое целое в пределах упругих деформаций. Однако этот режим является малоэффективным и не оказывает ощутимого влияния на изменение условий взаимодействия трущихся поверхностей. При виброударном режиме происходит периодический разрыв механического контакта трущихся поверхностей с их последующим соударением, что существенным образом изменяет кинематические и динамические условия их взаимодействия. В частности, сила резания действует только во время контакта поверхностей  $t_x$ , а в оставшуюся часть периода колебаний ее значение равно нулю. В результате среднее значение силы резания за период колебаний оказывается меньше ее величины при доводке в обычных условиях. При этом, чем меньше время контакта  $t_x$ , тем больше степень снижения сил резания за счет ультразвукового воздействия.

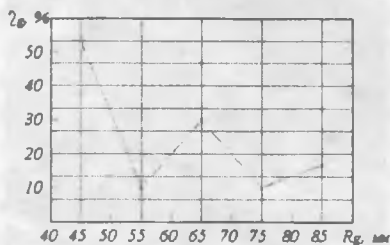


Рис. 5. Зависимость силы резания от радиуса дорожки на диске-притире (а): 1 — при обработке в обычных условиях; 2 — при ультразвуковом воздействии. Зависимость эффективности воздействия ультразвука на снижение силы резания от радиуса дорожки на диске-притире (б)

В момент соударения значе-ние импульса силы, действующей на обрабатываемую заготовку со стороны диска-притира за период ультразвуковых колебаний оказывается значительно выше его значения при традиционных условиях доводки. Благодаря такому режиму взаимодействия существенно интенсифицируется процесс хрупкого разрушения поверхности заготовки, обуславливая тем самым повышение производительности при ультразвуковой алмазной доводке ювелирных камней.

Условие реализации виброударного режима и его интенсивность определяются соотношением акустических и технологических параметров, т.е.

$$A_B \geq 2(x_{cm} + x_v), \quad (3)$$

где  $A_B$  — амплитуда вертикально направленных колебательных смещений точек рабочей поверхности диска-притира;  $X_{cm}$  — величина предварительного натяга в колебательной системе, обусловленная ее статическим нагружением;  $X_v$  — величина скоростного натяга, обусловленная относительным скольжением поверхностей. Величины  $X_{cm}$  и  $X_v$  соответственно определяются значениями статической нагрузки и скорости резания, с повышением которых они возрастают. Это приводит к увеличению суммарного натяга в акустической колебательной системе, вызывая снижение интенсивности виброударного режима ее работы. В случае, когда  $A_{он} < 2(x_{cm} + x_v)$ , в ней устанавливается режим скользящего акустического контакта, при котором ультразвук не оказывает ощутимого влияния на показатели процесса доводки.

Таким образом, степень влияния ультразвука на основные показатели процесса алмазной доводки ювелирных камней определяется интенсивностью виброударного режима взаимодей-

ствия заготовки с поверхностью инструмента, с повышением которой она возрастает. Исходя из этого, можно дать соответствующее объяснение полученным экспериментальным зависимостям и обосновать рациональные режимы ультразвуковой доводки, обеспечивающие заданный уровень ее выходных показателей.

Как следует из полученных экспериментальных данных, максимальное повышение производительности процесса доводки и снижение сил резания имеет место при обработке на дорожке диска-притира, радиус которой ( $r = 45$  мм) соответствует наибольшему значению колебаний  $A_B$  и наименьшей величине скорости резания  $V$ . Однако при таких условиях параметр шероховатости  $R_a$  обработанной поверхности образцов имеет максимальное значение. По мере увеличения радиуса дорожки, соответствующего пучности изгибной волны на диске-притире, при постоянной частоте его вращения или повышения скорости резания при неизменном радиусе происходит падение степени воздействия ультразвука на повышение интенсивности съема припуска и на снижение сил резания. Это сопровождается уменьшением значения параметра  $R_a$  шероховатости доведенных поверхностей. Такая ситуация, в первую очередь, объясняется интенсивностью виброударного режима взаимодействия образца с рабочей поверхностью инструмента. При постоянном значении  $A_B$  с повышением  $V$  и  $r$ , возрастает величина скоростного натяга  $X_v$  в акустической колебательной системе, что согласно (3), приводит к снижению интенсивности виброударного режима ее работы. В результате возрастает продолжительность контакта поверхностей  $t_k$ , а следовательно уменьшается степень влияния ультразвука на сниже-

ние сил резания. Одновременно, из-за уменьшения импульса силы, действующую в момент их соударения, снижается степень влияния ультразвука на повышение съема припуска. Непосредственно с величиной этого импульса связан средний размер частиц материала образца, скальваемых с обрабатываемой поверхности, ответственных за формирование её шероховатости. Поэтому, чем выше интенсивность виброударного режима, тем больше размер этих частиц, а соответственно, больше значения параметра  $R_a$  шероховатости доведенных поверхностей образцов. С этих позиций объясняется наличие падающей зависимости значения параметра  $R_a$  от скорости резания, с повышением которой интенсивность виброударного режима снижется, обуславливая уменьшение среднего значения частиц, скальваемых с обрабатываемой поверхности образцов.

Обобщая результаты выполненных исследований, можно сформулировать следующие выводы.

1. Установлено, что применение энергии ультразвука в процессе алмазной доводки ювелирных камней позволяет повысить интенсивность съема припуска, уменьшить величину сил резания, действующих в зоне обработки, и снизить шероховатость доведенных поверхностей.

2. Показано, что при возбуждении в материале диска-притира осесимметричной изгибной волны интенсивность акустического поля по его радиусу оказывается переменной, что определяет различную степень влияния колебаний на показатели процесса доводки в зависимости от места расположения заготовки относительно оси вращения инструмента.

3. Установлено, что ведущая роль в механизме ультразвукового воздействия на основные показатели процесса алмазной до-

водки ювелирных камней принадлежит вертикально направленным колебательным смещениям, возбуждаемым на рабочей поверхности диска-притира. При этом их влияние проявляется в условиях виброударного режима взаимодействия обрабатываемой заготовки с поверхностью инструмента, который характеризуется периодическим разрывом контакта между ними и их последующим соударением.

4. Показано, что реализация в процессе доводки виброударного режима и его интенсивность определяются условием, при котором амплитуда вертикально направленных колебательных смещений превышает удвоенное значение суммарного натяга,

обусловленного ее силовым и скоростным нагружением. По мере увеличения этого неравенства интенсивность виброударного режима возрастает, что сопровождается повышением степени влияния ультразвука на основные показатели процесса доводки.

5. Исходя из отмеченных особенностей контактного взаимодействия поверхностей в условиях виброударного режима доводки ювелирных камней, даны объяснения полученным экспериментальным зависимостям, отражающие механизм влияния ультразвука на производительность процесса, величину сил резания и качество доведенных поверхностей образцов.

6. Показано, что применение ультразвука в процессе алмазной доводки ювелирных камней, а также других хрупких твердых и сверхтвердых материалов, позволяет весьма эффективно и в широком диапазоне управлять выходными показателями этой технологической операции за счет соответствующего сочетания акустических и технологических режимов обработки.

#### Литература

1. Киселев М.Г., Минченя В.Т., Ибрагимов В.А. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. Мн., Тесей, 2002 — 344с.
2. Марков А.И. Ультразвуковая обработка материалов. М.: Машиностроение, 1980. 237с.