

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ НА ВЕЛИЧИНУ СИЛ РЕЗАНИЯ В ПРОЦЕССЕ АЛМАЗНОЙ ДОВОДКИ ЮВЕЛИРНЫХ КАМНЕЙ

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

Белорусский национальный технический университет

Эффект снижения сил трения и резания под действием колебаний и вибраций известен давно и применяется в самых различных процессах [1]. Однако расширение области его использования, особенно для механической обработки материалов, сдерживается трудностями, связанными со сложностью и громоздкостью применяемых вибраторов, их узким частотным диапазоном, а также невозможностью реализации их строго направленного воздействия.

Дальнейшее развитие данного метода снижения сил трения и резания на новом качественном и количественном уровнях связано с применением высокоэнергетических ультразвуковых колебаний. В отличие от низкочастотных вибраторов, представляющих собой колебательные системы с сосредоточенными параметрами, ультразвуковые преобразователи относятся к системам с распределенными параметрами. В таких системах возбуждение и передача высокочастотных колебаний осуществляются путем распространения в объеме материала упругих волн. Благодаря этому они поддаются фокусировке и интенсивному направленному действию, что позволяет эффективно использовать их в различных процессах механической обработки материалов [2, 3]. Особую актуальность задача снижения сил резания приобретает в процессах финишной обработки материалов, в частности их доводки. При этом для достижения точности обрабатываемых поверхностей необходимо создать такие условия, при которых обеспечивалась бы достаточно высокая интенсивность съема при-

пуска при минимальных значениях сил резания. В первую очередь это относится к хрупким материалам, к примеру ювелирным камням, при доводке которых уровень силового воздействия непосредственно и существенно влияет на качество обработанных поверхностей, в частности на наличие и величину сколов, глубоких рисок и других дефектов. Поэтому задача отыскания простых и надежных способов снижения сил резания и управления ими в процессе доводки хрупких материалов весьма актуальна и имеет важное практическое значение для повышения качества обработки их поверхностей.

В настоящее время для обработки изделий из ювелирных камней наиболее широко применяется метод их алмазной доводки на вращающемся алмазном круге. Поэтому при разработке экспериментальной установки в ее основу была положена традиционная схема доводки с той только разницей, что, помимо вращательного движения, инструменту дополнительно сообщались ультразвуковые колебания. С этой целью в экспериментальной установке был применен оригинальный шпиндельный узел, представляющий собой вращающуюся акустическую систему, состоящую из пьезоэлектрического преобразователя продольных ультразвуковых колебаний с коническим концентратором, на выходном торце которого жестко закреплялся доводочный диск. При расчете на резонансную частоту 18 кГц он имел диаметр 180 мм. Весь акустический узел в сборе устанавливался в подшипниках качения и посред-

ством клиноременной передачи получал вращение от электродвигателя с регулируемым числом оборотов.

Инструментом служил стальной диск с алмазным слоем зернистостью 80/63 на металлической связке на торцевой (рабочей) поверхности. Противоположная сторона инструмента имела в поперечном сечении параболическую форму, размеры которого изменялись от наибольшего – в центре до минимального – на периферии. Такая конструкция доводочного диска позволяла возбуждать в нем на резонансной частоте одновременно изгибные и радиальные (поперечные) осесимметричные колебания. На рис. 1 приведены эпюры распределения этих колебаний по радиусу рабочей поверхности инструмента. Из них видно, что для изгибной волны изменение величины колебательных смещений $A_{\text{и}}$ точек рабочей поверхности доводочного диска, направленных перпендикулярно к ней, носит циклический характер, т. е. имеет место чередование пучностей и узлов ультразвуковой волны. При этом в пучности имеет место максимальное значение амплитуды колебаний, а в узле оно равно нулю. Для принятой конструкции доводочного диска узловые окружности на нем располагались на диаметрах 110 и 165 мм, а окружности, соответствующие пучностям, – в центре диска и на диаметрах 130 и 180 мм. Для радиальной волны, у которой колебательные смещения $A_{\text{р}}$ происходят в горизонтальной плоскости вдоль радиуса диска, их величина плавно возрастает от нулевого значения в его центре до максимального на периферии инструмента.

В зависимости от расположения обрабатываемого изделия вдоль радиуса диска со стороны последнего будут воздействовать различные как по направлению, так и по величине вынужденные колебания вследствие переменного характера распределения колебательных смещений по рабочей поверхности. Так, в пучности изгибной волны будут действовать преимущественно вертикально направленные, а в ее узловом сечении – радиально направленные колебания.

Таким образом, при доводке с ультразвуком интенсивность акустического поля по радиусу инструмента оказывается переменной, а поэтому можно утверждать, что степень влияния

ультразвука на основные показатели процесса алмазной доводки в различных зонах диска будет различной, что следует учитывать при разработке конкретных технологических операций.

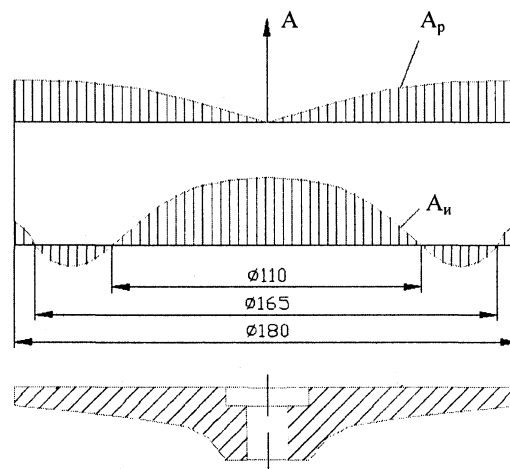


Рис. 1. Конструктивное исполнение диска-притира и эпюры распределения на его рабочей поверхности изгибных $A_{\text{и}}$ и радиальных $A_{\text{р}}$ колебательных смещений

Одним из важных показателей изучаемого процесса являются величина силы резания, действующей в зоне обработки, а также характер ее изменения в зависимости от технологических и акустических параметров доводки. Она определяет силовые показатели процесса, уровень динамической нагруженности системы СПИД и температурный режим в зоне обработки. В свою очередь эти показатели оказывают существенное влияние на производительность процесса, точность и качество обработанных поверхностей. Особенно это проявляется при доводке хрупких материалов, в частности ювелирных камней. Их обрабатываемые поверхности весьма чувствительны к уровню силового нагружения, результатом чего может быть образование различных дефектов в виде сколов и глубоких трещин. Поэтому установление закономерностей влияния ультразвуковых колебаний на величину силы резания при алмазной доводке ювелирных камней имеет важное как научное значение для более глубокого раскрытия механизма хрупкого разрушения в условиях ультразвукового воздействия, так и практическое – для определения оптимальных технологических и акустических режимов, обеспечивающих высокоэффективную обработку таких материалов.

На рис. 2 приведена схема приспособления для измерения силы резания, использованного в ходе выполнения экспериментальных исследований. Испытуемый образец 1, закрепленный в специальной оправке 2, устанавливался в направляющей втулке приспособления 3 и с помощью аттестованных грузов 4 прижимался с заданным усилием к рабочей поверхности вращающегося доводочного диска 5. Корпус приспособления был связан с упругой балкой 6 равного сопротивления.

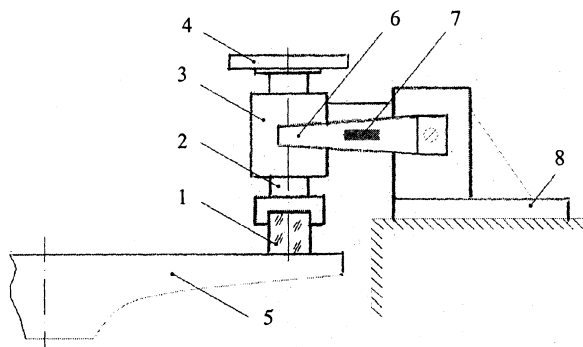


Рис. 2. Схема приспособления для измерения силы резания, действующей в зоне обработки

Таким образом, сила резания, возникающая в зоне обработки, вызывала ее деформацию, величина которой была пропорциональна значению измеряемой силы резания. Она фиксировалась с помощью фольговых тензометрических преобразователей 7, наклеенных на боковые стороны балки и соединенных между собой в полумостовую схему. Сигнал от них подавался на усилитель и далее регистрировался на экране осциллографа. Корпус приспособления был установлен на горизонтальных направляющих 8, допускающих его перемещение вместе с образцом вдоль радиуса доводочного диска, что позволяло производить обработку в различных зонах инструмента. В качестве обрабатываемых материалов в исследованиях использовались призматические образцы из корунда, яшмы и нефрита с квадратным поперечным сечением 7,1×7,1 мм. Статическое давление на образцы было постоянным и равным 0,1 МПа. Частота вращения доводочного диска изменялась ступенчато и составляла 260, 740 и 1430 об/мин. Во всех экспериментах время обработки было неизменным и равным 1 мин. Измерение силы резания проводилось при об-

работке образцов на различных радиусах доводочного диска, которые соответствовали как пучностям изгибной волны ($R = 45,65$ и 87 мм), так и ее узловым сечениям ($R = 55$ и 75 мм). Эксперименты проводились в обычных условиях обработки и при ультразвуковом воздействии. Количественная оценка степени влияния ультразвуковых колебаний на снижение сил резания в процессе алмазной доводки производилась по значению коэффициента эффективности η_F , определяемого по выражению

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

где $F_{ст}$ и $F_{ак}$ – соответственно значения силы резания, действующих при алмазной доводке в обычных условиях и ультразвуковом воздействии.

На рис. 3а приведены зависимости изменения силы резания от радиуса дорожки инструмента при доводке образцов при следующих режимах: статическое давление на образец $p_{ст} = 0,1$ МПа; частота вращения доводочного диска n_d была постоянной и равной 740 об/мин; материал обрабатываемого образца – корунд.

Из анализа этих зависимостей видно, что значение силы резания монотонно снижается при доводке в обычных условиях по мере увеличения радиуса дорожки на инструменте. Учитывая неизменность величины давления, можно сделать вывод о том, что увеличение скорости резания, пропорциональное радиусу дорожки при неизменной частоте вращения диска, приводит к уменьшению силы резания. Такой же характер зависимости $F(R)$ сохраняется при доводке в обычных условиях образцов из яшмы и нефрита.

При обработке с ультразвуком характер зависимости силы резания от радиуса дорожки на доводочном диске коренным образом изменяется. Во-первых, она приобретает циклический характер, во-вторых, величина силы резания при доводке с ультразвуком во всех случаях остается меньше ее значения, соответствующего обработке в обычных условиях. Что касается циклического характера зависимости $F(R)$, то он обусловлен переменной по радиусу диска интенсивностью изгибной волны. Так, на радиусах диска, соответствующих пучностям ее

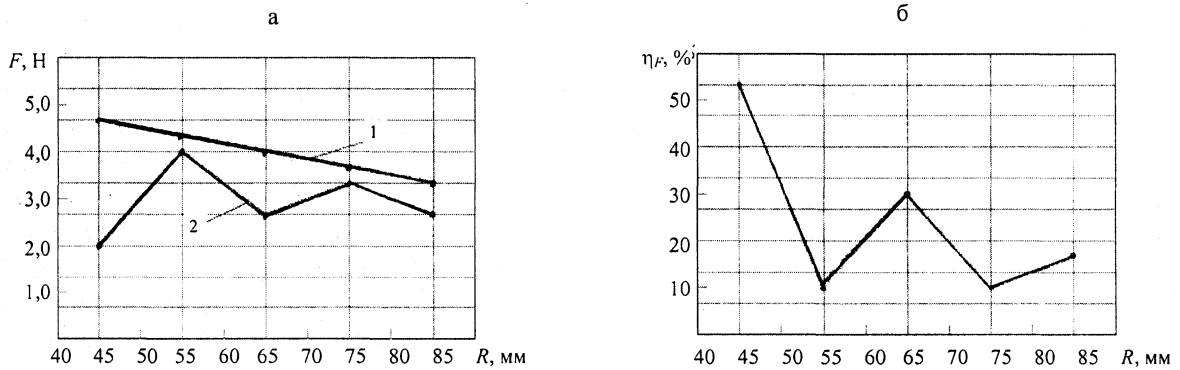


Рис. 3. 1 – обработка в обычных условиях; 2 – при ультразвуковом воздействии

колебаний ($R = 45, 65$ и 87 мм), сила резания имеет наименьшее значение, а при перемещении образца в зону узловых сечений изгибной волны ($R = 55$ и 75 мм) ее величина возрастает, приближаясь к значению силы резания при доводке в обычных условиях. Обращает на себя внимание еще одна закономерность изменения силы резания при обработке с ультразвуком. Так, ее значения, соответствующие пучностям изгибной волны, с увеличением радиуса дорожки, скорости резания пропорционально возрастают, а соответствующие узловым сечениям, – монотонно снижаются аналогично доводке в обычных условиях.

На рис. 3б приведена зависимость коэффициента эффективности воздействия ультразвука на снижение сил резания от радиуса дорожки на диске-притире. Она имеет ярко выраженный циклический характер, обусловленный тем, что на радиусах дорожки, соответствующих пучностям изгибной волны, коэффициент η_F имеет наибольшие значения, которые резко снижаются при переходе на радиусы дорожек, совпадающих с узловыми окружностями ультразвуковой волны. Кроме того, по мере увеличения радиуса дорожки на постоянной частоте вращения степень влияния ультразвука на снижение сил резания падает и особенно интенсивно – на радиусах, соответствующих пучностям изгибной волны. Так, на дорожке радиусом 45 мм значение коэффициента η_F составляло 56 %, на радиусе 65 мм – $\eta_F = 31$ %, а на радиусе 87 мм оно снизилось до 17 %. Аналогичный характер зависимости $\eta_F(R)$ имеет место при доводке с ультразвуком образцов из яшмы и нефрита.

Для объяснения полученных экспериментальных зависимостей проанализируем особенности контактного взаимодействия обрабатываемого образца с рабочей поверхностью диска-притира при возбуждении на ней изгибных ультразвуковых волн. Обратимся к случаю, когда доводка осуществляется на дорожке, соответствующей пучности колебаний изгибной волны. В этих условиях наряду с вращательным движением точки рабочей поверхности диска-притира совершают высокочастотные колебательные смещения с амплитудой $A_{и}$, направленные перпендикулярно поверхности контакта образца с инструментом.

Для объяснения полученных экспериментальных зависимостей проанализируем особенности контактного взаимодействия обрабатываемого образца с рабочей поверхностью диска-притира при возбуждении на ней изгибных ультразвуковых волн. Обратимся к случаю, когда доводка осуществляется на дорожке, соответствующей пучности колебаний изгибной волны. В этих условиях наряду с вращательным движением точки рабочей поверхности диска-притира совершают высокочастотные колебательные смещения с амплитудой $A_{и}$, направленные перпендикулярно поверхности контакта образца с инструментом.

Как известно [2, 3], взаимодействие трущихся поверхностей при воздействии ультразвуковых колебаний рассматриваемого направления может протекать в двух режимах. В режиме скользящего акустического контакта, когда взаимодействующие поверхности колеблются как единое целое в пределах упругих деформаций, и в виброударном режиме, при ко-

тором происходит периодический разрыв механического контакта трущихся поверхностей с последующим их соударением. Первый режим, с точки зрения степени влияния ультразвуковых колебаний на показатели процессов поверхностной обработки материалов, включая доводку, является неэффективным и, в частности, не вызывает ощутимого снижения сил резания, действующих в зоне обработки.

Только при реализации виброударного режима взаимодействия трущихся поверхностей ультразвуковые колебания оказывают существенное влияние на условия протекания процесса алмазной доводки, включая эффект снижения сил резания. Механизм этого снижения заключается в том, что при таком режиме сила резания действует только во время контакта поверхностей t_k , а в оставшуюся часть периода колебаний T , т. е. $T - t_k$, когда имеет место разрыв механического контакта поверхностей, ее значение равно нулю. В результате среднее значение силы резания за период колебаний оказывается меньше ее величины при доводке в обычных условиях. Отсюда следует: чем меньше время контакта t_k , тем больше степень снижения сил резания за счет ультразвукового воздействия.

В свою очередь, установление в системе виброударного режима и его интенсивность определяются соотношением акустических и технологических параметров. При фиксированной частоте ультразвуковых колебаний условие реализации виброударного режима имеет вид

$$A_{\text{он}} \geq 2(x_{\text{ст}} + x_v), \quad (2)$$

где $A_{\text{он}}$ – амплитуда вертикально направленных колебательных смещений точек рабочей поверхности диска-притира; $x_{\text{ст}}$ – величина предварительного натяга в колебательной системе, обусловленная ее статическим нагружением; x_v – величина скоростного натяга, обусловленная относительным скольжением поверхностей.

Чем больше неравенство (2), тем выше интенсивность виброударного режима, что сопровождается уменьшением продолжительности контакта поверхностей t_k и, как следствие, повышением степени влияния ультразвука на снижение сил резания. В случае, когда $A_{\text{он}} < 2(x_{\text{ст}} + x_v)$, в колебательной системе уста-

навливается режим скользящего акустического контакта, и снижение сил резания не происходит. Величины $x_{\text{ст}}$ и x_v соответственно определяются значениями статической нагрузки $p_{\text{ст}}$ и скорости резания v , с повышением которых они возрастают, обуславливая увеличение суммарного натяга в колебательной системе. Это приводит к падению эффективности воздействия ультразвука на снижение сил резания при неизменной величине $A_{\text{он}}$. Таким образом, в процессе алмазной доводки снижение сил резания под действием ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно поверхности контакта образца с инструментом, происходит в том случае, если их взаимодействие протекает в виброударном режиме, с повышением интенсивности которого степень снижения сил резания возрастает.

Механизм влияния радиально направленных колебаний A_p на снижение силы резания заключается в том, что они вызывают изменение направления ее действия за период колебаний [2, 3]. В результате сила резания $F_{\text{ак}}$, измеряемая при доводке с ультразвуком, представляет собой только проекцию ее значения $F_{\text{ст}}$ на направление действия в обычных условиях обработки и поэтому оказывается меньше. При этом степень снижения определяется максимальным углом, на который происходит отклонение вектора силы резания, с увеличением которого она возрастает. В свою очередь, значение этого угла зависит от соотношения акустических и технологических параметров обработки и характеризуется так называемым скоростным коэффициентом k_v , определяемым по формуле

$$k_v = \frac{v_{\text{ок}}}{v} = \frac{2\pi f A_p}{\omega R}, \quad (3)$$

где $v_{\text{ок}}$ – колебательная скорость; f – частота ультразвуковых колебаний; A_p – амплитуда радиально направленных колебаний; v – скорость резания; ω – круговая частота вращения диска-притира; R – радиус дорожки на диске-притире.

По мере увеличения отношения колебательной скорости $v_{\text{ок}}$ к скорости резания v , т. е. повышения k_v , степень влияния ультразвуковых колебаний рассматриваемого направления на снижение сил резания возрастает и наоборот,

а при $k_v \rightarrow 0$ эффект от ультразвукового воздействия пропадает.

Основываясь на отмеченных выше положениях, можно дать соответствующие объяснения полученным экспериментальным зависимостям. Так, снижение коэффициента эффективности воздействия ультразвука η_F с увеличением радиуса дорожки, соответствующего пучностям изгибной волны, обусловлено следующими обстоятельствами. По мере увеличения радиуса дорожки в силу затухания ультразвуковой волны в материале диска-притира значение амплитуды колебаний $A_{он}$ уменьшается. Одновременно с этим возрастает скорость резания в зоне обработки, что сопровождается увеличением величины скоростного натяга x_v в колебательной системе. В результате такого уменьшения $A_{он}$ и x_v с увеличением радиуса дорожки на диске-притире неравенство (2) уменьшается, т. е. снижается интенсивность виброударного режима обработки. Это влечет за собой увеличение времени контакта t_k взаимодействия поверхностей, а соответственно падение степени влияния ультразвука на снижение сил резания.

При обработке на фиксированном радиусе дорожки, соответствующем пучности колебаний изгибной волны, с неизменной амплитудой $A_{он}$, увеличение частоты вращения инструмента и статической нагрузки прижима образца к его рабочей поверхности приводит к снижению степени влияния ультразвука на силы резания, что связано с увеличением натяга в колебательной системе, т. е. уменьшением неравенства (2). При обработке на тех радиусах дорожки диска-притира, где условие (2) не выполняется, взаимодействие образца с поверхностью инструмента протекает в режиме скользящего акустического контакта и влияние перпендикулярно направленных колебательных смещений на снижение сил резания не проявляется.

В этом случае эффективность ультразвукового воздействия на снижение сил резания определяется степенью влияния радиально направленных колебаний, действующих в зоне обработки, и зависит от значения скоростного коэффициента k_v . При этом следует подчеркнуть, что если распределение амплитуды вертикально направленных колебаний по радиусу диска-притира имеет циклический характер, то амплитуда радиально направленных колебаний

монотонно возрастает от нулевого значения в центре инструмента до максимального – на его периферии. Благодаря этому увеличение радиуса дорожки на диске-притире сопровождается одновременным повышением как скорости резания $v = \omega R$, так и колебательной скорости $v_{ок} = 2\pi f A_p$ точек рабочей поверхности инструмента. В результате степень снижения сил резания на данном радиусе дорожки инструмента определяется соответствующим для него значением скоростного коэффициента k_v , с увеличением которого она возрастает.

Оценивая влияние вертикально и радиально направленных колебательных смещений точек рабочей поверхности инструмента на снижение сил резания, необходимо отметить, что возбуждаемая в диске-притире осесимметричная изгибная волна имеет общие признаки поперечной и продольной волн. При этом ее поперечная составляющая вызывает колебательные смещения в вертикальном направлении, а продольная – в радиальном. Для тонкого диска, что имеет место в данном случае, превалирующей является поперечная составляющая, а поэтому амплитуда радиально направленных колебательных смещений, обусловленных действием продольной составляющей изгибной волны, оказывается весьма малой по сравнению с амплитудой вертикально направленных. Следовательно, в процессе доводки с ультразвуком доминирующую роль в снижении сил резания играют именно вертикально направленные колебания точек рабочей поверхности изгибно-колеблющегося диска-притира. А степень этого снижения пропорциональна интенсивности виброударного режима взаимодействия обрабатываемого образца с поверхностью инструмента. Она, в свою очередь, определяется соотношением амплитуды колебательных смещений, действующих на данном радиусе диска-притира, и величиной суммарного натяга в акустической колебательной системе, обусловленной ее силовым и скоростным нагружениями. Именно поэтому зависимость снижения сил резания от радиуса дорожки на диске-притире носит циклический характер, изменяясь в такт изменению на его рабочей поверхности амплитуды вертикально направленных колебаний. При неизменной их интенсивности с увеличе-

нием как статической нагрузки прижима образца к инструменту, так и скорости резания степень ультразвукового воздействия на снижение сил резания уменьшается, что объясняется повышением величины натяга в акустической колебательной системе.

ВЫВОДЫ

1. Экспериментально установлено, что за счет возбуждения в материале диска-притира изгибных ультразвуковых волн можно снизить величину сил резания, действующих в процессе алмазной доводки ювелирных камней.

2. Показано, что доминирующее влияние на снижение сил резания оказывают вертикально направленные колебания точек рабочей поверхности диска-притира, обусловленные действием поперечной составляющей изгибной волны. При этом эффект снижения сил резания проявляется только в том случае, когда взаимодействие обрабатываемой заготовки с поверхностью инструмента протекает в виброударном режиме, с повышением интенсивности которого степень ультразвукового воздействия на снижение сил резания возрастает.

3. Установлено, что для реализации виброударного режима доводки необходимо, чтобы величина амплитуды вертикально направленных колебаний точек рабочей поверхности диска-притира превосходила значение суммар-

ного натяга в акустической колебательной системе, обусловленного как ее силовым, так и скоростным нагружением. По мере увеличения этого неравенства степень снижения сил резания при доводке с ультразвуком возрастает. Если указанное условие не обеспечивается, то взаимодействие обрабатываемой заготовки с инструментом протекает в режиме скользящего акустического контакта и ощутимого влияния на величину сил резания ультразвук не оказывает.

4. Выявленные закономерности позволяют обоснованно и целенаправленно назначать значения акустических и технологических режимов обработки, при которых обеспечивается соответствующий уровень снижения сил резания при алмазной доводке ювелирных камней с ультразвуком, что, в свою очередь, дает возможность в широких пределах управлять одним из важнейших параметров рассматриваемого процесса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гаришин К. В., Диркс Г. Г., Драшлин М. Г. Закономерности движения деталей по колеблющейся плите при инерционной круговой доводке // Алмазно-абразивная обработка. – 1969. – № 64. – С. 132–144.

2. Киселев М. Г., Минченя В. Т., Ибрагимов В. А. Ультразвук в поверхностной обработке материалов. – Мн.: Тесей, 2002. – 344 с.

3. Марков А. И. Ультразвуковая обработка материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.

УДК 621.317+539.143.44

ПЕРВИЧНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЯМР-СПЕКТРОМЕТРА

Канд. техн. наук, доц. ОРОБЕЙ И. О., асп. САРОКА В. В.

Белорусский государственный технологический университет

Спектрометры ядерного магнитного резонанса (ЯМР) широко применяются для определения состава и свойств веществ. Наиболее критичным узлом радиоспектрометра является первичный преобразователь. Для использования в жестких условиях технологического про-

цесса преобразователь должен обладать высокой помехоустойчивостью к электромагнитным и механическим воздействиям и малым энергопотреблением. Этим требованиям удовлетворяет первичный преобразователь на основе постоянных магнитов с ярмом броневого