

УДК 621.937

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАВИСИМОСТИ СКОРОСТНОГО НАТЯГА В ВИБРОУДАРНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ КОЛЕБАТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЕ ОТ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

М. Г. КИСЕЛЕВ, А. А. НОВИКОВ

Белорусский национальный технический университет, г. Минск

Цель работы заключалась в экспериментальном определении зависимости величины скоростного натяга в акустической колебательной системе от частоты вращения ультразвуковых преобразователей применительно к процессу шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков зернами алмазных микропорошков.

Введение. Предшествующими исследованиями [1], [2] установлено, что значительно повысить качество шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков можно за счет применения энергии ультразвука путем сообщения колебаний деформирующим инструментам в направлении перпендикулярном обрабатываемым поверхностям заготовки. При этом деформирующий инструмент 1 (рис. 1) соединяется с концентратором 2 ультразвукового преобразователя посредством цилиндрического штифта 3, образующего с отверстием в инструменте сопряжение с гарантированным зазором. Такое конструктивное исполнение позволяет обеспечить продольные перемещения деформирующего инструмента вдоль оси ультразвукового преобразователя, т. е. в направлении действия ультразвуковых колебаний (УЗК), а так же его принудительное вращение вокруг нее за счет вращательного движения преобразователей ($n_{пр}$).

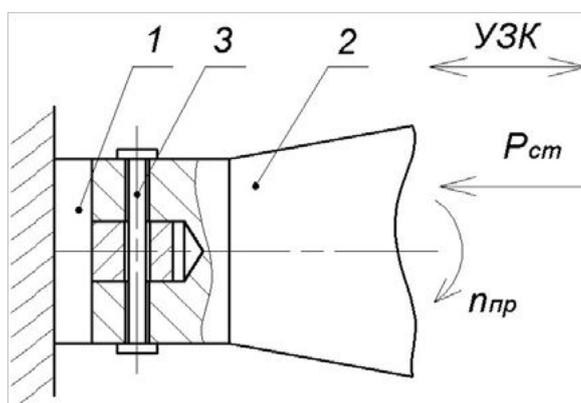


Рис. 1. Схема шаржирования поверхностей с ультразвуком

В принципе такая система относится к акустическим колебательным системам разомкнутого типа со свободно установленным инструментом, которые достаточно широко используются в процессах поверхностной обработки материалов [1]. При определенной интенсивности ультразвукового возбуждения такой системы в ней устанавливается виброударный режим взаимодействия ее звеньев, обеспечивающий

высокую эффективность воздействия инструмента на обрабатываемую поверхность. Так в отличие от традиционного способа шаржирования, когда внедрение алмазных частиц в материал диска происходит в результате их втирания плоской поверхностью вращающегося инструмента, при использовании ультразвука, благодаря периодическому дискретному характеру взаимодействия инструментов с обрабатываемой поверхностью, процесс внедрения в неё алмазных частиц протекает в режиме их виброударного втирания. Этот режим, во-первых, за счет наличия периодически возникающего зазора между поверхностью инструмента и заготовки обеспечивает гарантированное поступление в зону шаржирования алмазных частиц, а во-вторых, их последующее внедрение происходит в условиях динамического (ударного) воздействия со стороны колеблющегося деформирующего инструмента.

При прочих равных условиях основными параметрами, определяющими интенсивность виброударного режима работы акустической колебательной системы, являются: амплитуда ультразвуковых колебательных смещений A_0 выходного торца преобразователя; величина предварительного натяга $x_{ст}$, обусловленная статическим нагружением элементов колебательной системы, и значение скоростного натяга x_v , связанного со скоростью относительного перемещения (вращения) инструмента по обрабатываемой поверхности заготовки.

Согласно [2] условие реализации в акустической колебательной системе виброударного режима взаимодействие ее звеньев имеет вид:

$$A_0 > 2(x_{ст} + x_v). \quad (1)$$

При этом, чем больше неравенство (1), тем выше интенсивность виброударного режима работы акустической колебательной системы. В случае, когда $A_0 \leq 2(x_{ст} + x_v)$, то в ней устанавливается безотрывный режим взаимодействия ее звеньев, при котором условия обработки практически не отличаются от условий обработки без ультразвука.

Величину предварительного натяга в колебательной системе с достаточной для инженерных расчетов точностью можно вычислить по выражению:

$$x_{ст} = \frac{P_{ст}}{C}, \quad (2)$$

где $P_{ст}$ – статическая нагрузка, с которой выходной торец концентратора прижимается к деформирующему инструменту; C – жесткость концентратора ультразвукового преобразователя.

Таким образом, по мере увеличения $P_{ст}$ величина предварительного натяга в акустической колебательной системе линейно возрастает, вызывая при постоянных значениях A_0 и x_v снижение интенсивности ее виброударного режима работы.

Что касается значения скоростного натяга, то на сегодня практически отсутствуют сведения позволяющие оценить его влияние на режим работы акустической колебательной системы. В частности, не установлен вид зависимости x_v от скорости относительного скольжения инструментов по обрабатываемой поверхности заготовки, что имеет первостепенное значение как в теоретическом плане для математического описания параметров работы колебательной системы при различных условиях ее возбуждения, так и в практическом – с целью обоснования оптимальных режимов обработки.

Методика проведения исследований

Для установления вида зависимости амплитуды ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора от частоты вращения деформирующих инструментов, т. е. изменения величины скоростного натяга в колебательной системе, была проведена серия специальных экспериментов. Учитывая, что прямое изменение амплитуды ультразвуковых колебаний на вращающемся вместе с деформирующими инструментами концентраторе представляет чрезвычайно сложную задачу, в исследованиях был применен косвенный метод оценки ее изменения. В его основу было положено то обстоятельство, что с изменением амплитуды ультразвуковых колебаний, обусловленным влиянием скоростного натяга в системе, изменяется интенсивность виброударного режима взаимодействия ее звеньев, а соответственно, и уровень интенсивности звука, возникающего при ее работе. Следовательно, измеряя его параметры на различных скоростях вращения деформирующих инструментов, можно установить соответствующий этому характер изменения амплитуды ультразвуковых колебаний. В случае, когда $A_0 \leq 2(x_{ct} + x_v)$, т. е. при наступлении безотрывного (безударного) режима взаимодействия звеньев акустической колебательной системы, уровень интенсивности звука должен быть минимальным и практически равным уровню, создаваемому установкой в обычных условиях.

Для анализа уровня интенсивности звука использовалось специализированное программное обеспечение, позволяющее раскладывать воспроизводимый или записанный звук по частотам. Особенностью этой программы является то, что амплитуда обрабатываемого сигнала выражена в относительных единицах. За нулевой принимается сигнал (уровень интенсивности звука) определяемый непосредственно самой программой. Таким образом, это позволяет при вычитании двух исследуемых сигналов определить разность уровня интенсивности звука по всему спектру частот (Δ).

Эксперименты проводились на установке для двухстороннего шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков с ультразвуком (рис.2), описание которой приведено в работе [3]. Цифровой диктофон Olympus DM-1 использовался для записи звука, создаваемого установкой, где 1 устанавливался симметрично относительно вращающихся преобразователей, 2 на расстоянии 50 мм от зоны обработки.

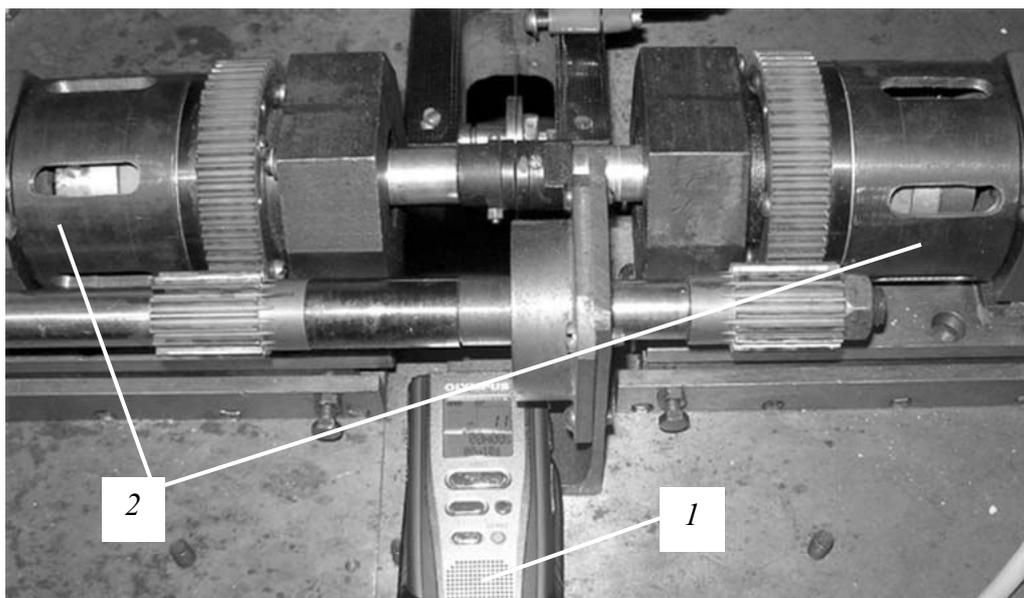


Рис. 2. Фотография рабочей зоны экспериментальной установки для шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков

В ходе выполнения первой серии экспериментов записывался звук, создаваемый установкой при различных частотах вращения преобразователей без их ультразвукового возбуждения. Частота вращения изменялась в диапазоне от 0 до 330 об/мин и контролировалась цифровым тахометром ЦАТ-3М. Это позволило установить уровень интенсивности звука, создаваемого установкой при отсутствии ультразвуковых колебаний, т. е. уровень соответствующий, согласно принятой гипотезе, безударному режиму работы колебательной акустической системы.

После этого проводилось запись звука при ультразвуковом возбуждении преобразователей на различных скоростях их синхронного вращения, но при отсутствии обрабатываемой заготовки, т. е. когда рабочие поверхности деформирующих инструментов не имели относительного скольжения, а только были прижаты друг к другу статической нагрузкой.

В заключительной серии экспериментов записывался звук, создаваемый установкой в процессе шаржирования заготовок распиловочных дисков с ультразвуком на различных частотах вращения преобразователей, а соответственно, деформирующих инструментов. При этом интенсивность их возбуждения, а также величина их статического нагружения, т. е. значения A_0 и $x_{ст}$ были постоянными.

Результаты и их обсуждение. На рис. 3 приведены графики амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) звука, создаваемого установкой на трех частотах вращения преобразователей ($n_{пр} = 0, 170, 300$ м/мин), при ее работе без ультразвука (рис. 3, а, б, в) и с ультразвуком при отсутствии заготовки диска (рис. 3, г, д, е) и при ее шаржировании (рис. 3, и, к, л).

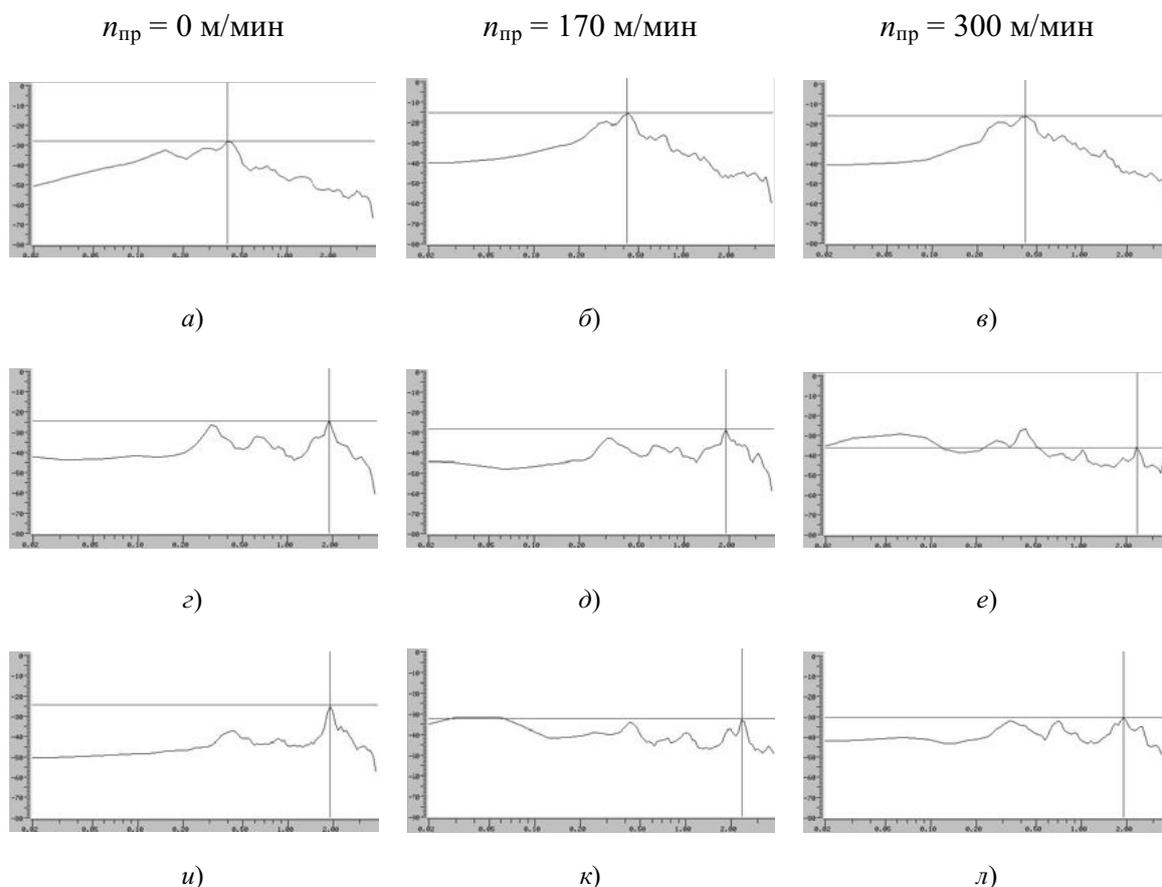


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика звука установки при различных условиях ее работы

Из анализа графиков, приведенных на рис. 3, *а, б, в* видно, что АЧХ звука создаваемого установкой при ее работе без ультразвука имеет характерную пиковую частоту порядка 410 Гц, которую можно рассматривать как основную (рабочую). По мере увеличения скорости вращения преобразователей амплитудное значение интенсивности звука возрастает, но при этом рабочая звуковая частота остается неизменной во всем измеряемом диапазоне.

При работе установки с ультразвуком и в отсутствии обрабатываемой заготовки (рис. 3, *з, д, е*) на АЧХ звука возникает второй пик, соответствующий частоте порядка 1950 Гц. Его появление обусловлено установлением в акустической колебательной системе виброударного режима ее работы. Важно отметить то обстоятельство, что в этом случае изменение скорости вращения преобразователей практически не сказывается на значении амплитуды уровня интенсивности звука. Отсюда вытекает вывод о том, что если отсутствует скольжение рабочих поверхностей деформирующих инструментов относительно обрабатываемой поверхности заготовки, то скорость их синхронного вращения не влияет на интенсивность виброударного режима работы акустической колебательной системы. В свою очередь, это свидетельствует о том, что значение амплитуды ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора остается постоянным, а величина натяга в акустической колебательной системе определяется только значением статической нагрузки, с которой деформирующие инструменты прижаты друг к другу, т. е. влияние скоростного натяга отсутствует.

На рис. 3, *и, к, л* представлены зависимости уровня интенсивности звука, создаваемого установкой в процессе шаржирования боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков с ультразвуком на различных скоростях вращения акустических преобразователей. Из их анализа следует, что по мере увеличения скорости вращения преобразователей уровень интенсивности звука на частоте 410 Гц, соответствующей звуку, создаваемому непосредственно только установкой, возрастает, в то время как уровень интенсивности звука на частоте 1950 Гц, соответствующий виброударному режиму работы акустической колебательной системы снижается. Это позволяет сделать выводы о том, что при наличии относительного скольжения рабочих поверхностей деформирующих инструментов по обрабатываемой поверхности заготовки с увеличением скорости проскальзывания (частоты вращения преобразователей) интенсивность виброударного режима работы акустической колебательной системы снижается. Следовательно, происходит уменьшение амплитуды ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора, которое обусловлено возрастанием значения скоростного натяга в колебательной системе, т. е. неравенство (1) уменьшается за счет повышения x_v .

Механизм проявления скоростного натяга заключается в следующем: при отсутствии относительного скольжения деформирующих инструментов по поверхности заготовки элементы колебательной системы нагружены только статической нагрузкой, которая определяет величину предварительного натяга в ней ($x_{ст}$). В процессе относительного скольжения поверхностей инструментов и обрабатываемой заготовки в моменты их контакта в результате механического взаимодействия возникает составляющая сил трения и резанья, действующая в направлении противоположном действию статической нагрузки. Это приводит к появлению в колебательной системе дополнительного скоростного натяга (x_v). По мере увеличения скорости относительного скольжения (частоты вращения преобразователей) действие указанной составляющей сил контактного взаимодействия возрастает, что приводит к повышению величины скоростного натяга. В результате амплитуда ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора снижается, т. е. неравенство (1) уменьшается, что сопровождается падением интенсивности виброударного режима работы акустиче-

ской колебательной системы. Как следствие, это изменяет положение границы, соответствующей переходу акустической колебательной системы от виброударного режима к безотрывному, когда влияние ультразвука на процесс поверхностной обработки практически не проявляется.

Из вышеотмеченного следует, что вид зависимости скоростного натяга от скорости скольжения, в первую очередь, будет определяться контактными условиями взаимодействия деформирующих инструментов с обрабатываемой поверхностью заготовки. В частности, применительно к шаржированию, это свойства, размеры и форма абразивных (алмазных) частиц, их концентрация в абразивной пасте, характер распределения в зоне обработки, свойства и количество жидкой фазы в абразивной пасте и т. д.

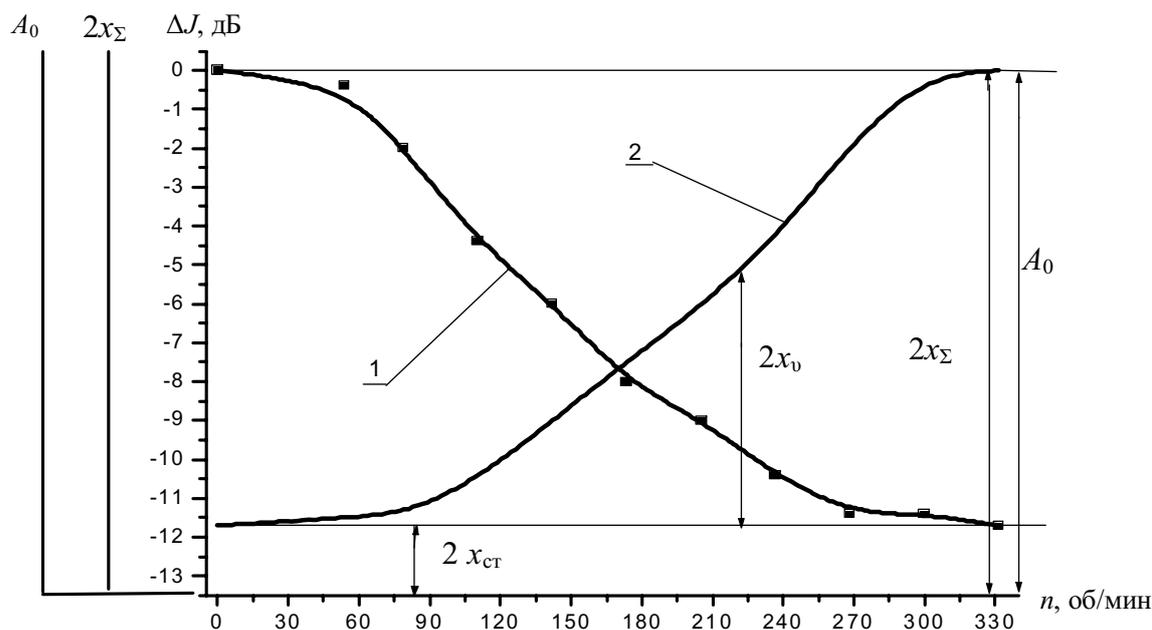


Рис. 4. Изменение уровня интенсивности звука (кривая 1) и величины натяга (кривая 2) в акустической колебательной системе от частоты вращения преобразователей ($n_{пр}$)

На рис. 4 (кривая 1) представлена зависимость изменения уровня интенсивности звука, соответствующая виброударному режиму работы акустической колебательной системы в процессе шаржирования боковых поверхностей распиловочного диска с ультразвуком от частоты вращения преобразователей. Она имеет три характерных участка. На первом, при изменении частоты вращения преобразователей от 0 до 60 об/мин уровень интенсивности монотонно снижается. На втором в диапазоне изменения $n_{пр}$ от 60 до 270 об/мин снижение уровня интенсивности звука происходит по закону близкому к экспоненциальному. На третьем участке, который наступает с превышением частоты вращения преобразователей более 270 об/мин значение уровня интенсивности звука становится постоянным и практически соответствует значению, создаваемому непосредственно установкой, т. е. без ультразвукового возбуждения. Это свидетельствует о смене виброударного режима работы акустической колебательной системы на безударный (безотрывный) режим взаимодействия ее звеньев, т. е. когда неравенство (1) становится равенством.

Используя полученную зависимость $\Delta J(n_{пр})$, можно качественно представить характер влияния частоты вращения преобразователей на изменение величины как скоростного x_v , так и суммарного x_{Σ} натягов в акустической колебательной системе. Так, кривая 2 на рис. 4 представляет собой зависимость удвоенного значения сум-

марного натяга $2x_{\Sigma}$ от частоты вращения преобразователей. При $n_{пр} = 0$ его величина будет определяться только значением предварительного натяга $2x_{ст}$, обусловленного нагружением элементов акустической колебательной системы статической нагрузкой $P_{ст}$. При этом, предварительный натяг $2x_{ст}$ для данного значения $P_{ст}$ остается величиной постоянной и если выполняется условие $A_0 > 2x_{ст}$, то акустическая колебательная система работает в виброударном режиме.

При сообщении преобразователям (деформирующим элементам) вращательного движения относительно обрабатываемой поверхности заготовки в колебательной системе дополнительно возникает скоростной натяг $2x_v$. По мере увеличения частоты вращения преобразователей его величина в начале медленно в такт изменению зависимости $\Delta J(n_{пр})$, а затем интенсивно возрастает. Соответственно, с увеличением значения $n_{пр}$ возрастает значение суммарного натяга $2x = 2(x_{ст} + x_v)$ в акустической колебательной системе, что сопровождается снижением интенсивности виброударного режима ее работы. При достижении определенной скорости вращения инструментов (в нашем случае $n_{пр} = 270$ об/мин) величина удвоенного суммарного натяга за счет увеличения $2x_v$ становится равной амплитуде ультразвуковых колебаний A_0 выходного торца концентратора. Эта ситуация соответствует границе перехода от виброударного режима работы акустической колебательной системы к безударному (безотрывному), при котором эффективность воздействия ультразвука на процесс обработки практически не проявляется.

Из приведенных выше рассуждений следует, что возникающая в процессе обработки величина суммарного натяга, в принципе, оказывает демпфирующее влияние на работу преобразователя, вызывая снижение амплитуды ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора, соответствующей его ненагруженному состоянию. Поэтому, обозначив через A_{ϕ} фактическое значение амплитуды ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора, и, принимая условие $A_0 \geq 2x_{ст}$, можно записать:

$$A_{\phi} = A_0 - 2x_{\Sigma}. \quad (3)$$

Если $A_0 = 2x_{\Sigma}$, то $A_{\phi} = 0$ и колебательная система работает в безударном режиме.

Как следует из зависимостей, приведенных на рис. 4 величину скоростного натяга с достаточной для инженерных расчетов точностью можно определить по выражению:

$$2x_v = 2x_{ст} (e^{\alpha v} - 1), \quad (4)$$

где e – основание натуральных логарифмов; α – коэффициент, зависящий от контактных условий в зоне обработки и определяемый экспериментально; v – скорость относительного скольжения деформирующего инструмент по обрабатываемой поверхности.

С учетом (4) выражения (1) и (3) примут вид:

$$A_0 \geq 2x_{ст} \cdot e^{\alpha v} = \frac{2P_{ст}}{C} \cdot e^{\alpha v}, \quad (5)$$

$$A_{\phi} = A_0 - 2x_{ст} \cdot e^{\alpha v} = A_0 - \frac{2P_{ст}}{C} \cdot e^{\alpha v}. \quad (6)$$

Эти зависимости позволяют рассчитать величину суммарного натяга в акустической колебательной системе с учетом ее силового и скоростного нагружения, а так-

же определить границу, соответствующую переходу системы от виброударного режима работы к безударному при соответствующем уровне ее звукового возбуждения.

Обобщая результаты проведенных исследований, можно сформулировать следующие **выводы**:

1. Предложена оригинальная методика оценки характера изменения амплитуды ультразвуковых колебаний выходного торца концентратора ультразвукового преобразователя в зависимости от уровня его статического нагружения и частоты вращения. Она основана на измерении уровня интенсивности звука, создаваемого акустической колебательной системой с промежуточным деформирующим инструментом при ударном режиме ее работы.

2. С использованием разработанной методики получена экспериментальная зависимость изменения уровня интенсивности звука, создаваемого акустической колебательной системой от частоты вращения деформирующих инструментов в процессе шаржирования боковых поверхностей заготовок распиловочных дисков.

3. Установлено, что с повышением частоты вращения деформирующих инструментов в процессе шаржирования заготовок распиловочных дисков интенсивность звука, соответствующая виброударному режиму работы акустической системы, снижается, что обусловлено возрастанием в ней величины скоростного натяга.

4. Показано, что механизм появления скоростного натяга связан с действием возникающих в процессе относительного скольжения поверхностей инструмента и заготовки составляющих сил трения и резанья, действующих в направлении противоположном приложенной статической нагрузке, вызывая дополнительное нагружение акустической колебательной системы.

5. Установлено, что с повышением скорости относительного скольжения поверхности инструмента и заготовки величина скоростного натяга в акустической колебательной системе возрастает по закону близкому к экспоненциальному.

6. Получены математические зависимости, позволяющие рассчитать величину суммарного натяга в акустической колебательной системе с учетом ее силового и скоростного нагружения, а также определить границу, соответствующую переходу системы от виброударного режима работы к безударному при заданном уровне ее ультразвукового возбуждения.

Литература

1. Артемьев, В. В. Ультразвуковые виброударные процессы / В. В. Артемьев, В. В. Клубович, В. Н. Санкевич. – Минск : БНТУ, 2004. – 258 с.
2. Киселев, М. Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов. – Минск : Тесей, 2001. – 344 с.
3. Исследование механизма взаимодействия деформирующего инструмента с распиловочным диском при двустороннем ультразвуковом шаржировании с фрикционной передачей вращающего момента / М. Г. Киселев [др.] : материалы VI междунар. науч.-техн. конф. «Новые материалы и технологии: порошковая металлургия, композиционные материалы, защитные покрытия». – Минск : Тонпик, 2004. – С. 264–266.

Получено 23.03.2006 г.