

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

УДК 621.9.048.4

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА УСЛОВИЯ КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ НАКАТНОГО РОЛИКА С ОБРАБАТЫВАЕМОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

*д-р техн. наук, проф. М.Г. КИСЕЛЕВ, канд. техн. наук А.В. ДРОЗДОВ,
В.Л. ГАБЕЦ, А.А. СТОЛЯРОВ
(Белорусский национальный технический университет, Минск)*

Представлена математическая модель процесса контактного взаимодействия ролика с жестким подвижным основанием при сообщении ролику ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно поверхности их контакта, применительно к технологической схеме шаржирования. Получены аналитические зависимости для расчета времени контактного взаимодействия ролика с поверхностью неподвижного основания, силы его реакции и ее импульса за период колебаний с учетом статического нагружения системы и интенсивности ее ультразвукового возбуждения. Получено выражение, позволяющее рассчитать среднюю угловую скорость вращения ролика за период колебаний в зависимости от интенсивности возбуждения акустической колебательной системы, ее статического нагружения и скорости перемещения основания.

Введение. В основе многих технологических операций поверхностной обработки материалов лежит метод обкатки. К примеру, при обработке деталей машин и приборов поверхностным пластическим деформированием путем обкатывания их шариками или роликами под нагрузкой. Этот же принцип используется при шаржировании поверхностей инструментов, в частности распиловочных дисков зернами алмазных микропорошков путем их вдавливания в материал инструмента накатным роликом [1].

Важно подчеркнуть, что для конкретной операции с учетом условий ее выполнения и предъявляемых требований необходимо реализовывать закон движения обрабатывающих инструментов, обеспечивающий наиболее эффективные условия их контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Применительно к шаржированию поверхностей необходимо, чтобы закон движения накатного ролика (деформирующего инструмента), во-первых, создавал благоприятные условия для гарантированного попадания алмазных зерен в зону контакта в их исходном (неразрушенном) состоянии, а во-вторых, обеспечивал такой характер и уровень их силового нагружения со стороны ролика, при которых происходило бы их интенсивное вдавливание в материал подложки и надежное закрепление в нем.

Принимая во внимание результаты исследований кинематики и динамики взаимодействия трущихся поверхностей в поле ультразвуковых колебаний [2, 3], правомерно утверждать, что их использование в процессах обкатки позволит целенаправленно и в широком диапазоне влиять на закон движения тела качения, а следовательно, управлять выходными параметрами технологических процессов поверхностной обработки материалов, основанных на механике обкатки. В этой связи цель данной работы заключалась в теоретической оценке влияния ультразвукового воздействия на условия контактного взаимодействия накатного ролика с обрабатываемой поверхностью применительно к технологической схеме шаржирования.

Расчетная модель, принятая в исследованиях. На рисунке 1 приведена схема акустической колебательной системы технологического назначения для шаржирования боковых поверхностей распиловочных дисков накатным роликом при сообщении ему ультразвуковых колебаний. Она состоит из ультразвукового преобразователя продольных колебаний 1, соединенного с полуволновым коническим концентратором 2. В его узловом сечении выполнен фланец, к которому прикреплен корпус 3. Последний установлен на шариковых направляющих 4, обеспечивающих плавное и с минимальным трением перемещение всей акустической системы в вертикальном направлении.

В непосредственной близости от выходного торца концентратора жестко закреплена ось 5, которая служит опорой скольжения для накатного ролика 6. Последний под действием статической нагрузки P_{cm} прижимается к обрабатываемой поверхности распиловочного диска 7, закрепленного на вращающемся столике 8. Предварительно на боковую поверхность диска равномерным слоем наносится алмазная суспензия, состоящая из одной весовой части зерен алмазного микропорошка и трех частей касторового масла [3]. В процессе шаржирования алмазные зерна, попадая в зону фрикционного контакта, вдавливаются в материал диска поверхностью вращающегося накатного ролика.

В зависимости от интенсивности ультразвукового возбуждения такой колебательной системы взаимодействие ролика с обрабатываемой поверхностью может протекать в двух характерных режимах [2]: безотрывном, когда контактирующие поверхности находятся в постоянном контакте и колеблются как единое целое в пределах упругих деформаций; виброударном, при котором имеет место периодический разрыв механического контакта взаимодействующих поверхностей с последующим их соударением. Очевидно, что степень влияния ультразвукового воздействия на протекание процесса шаржирования в первую очередь будет определяться именно режимом взаимодействия накатного ролика с обрабатываемой поверхностью.

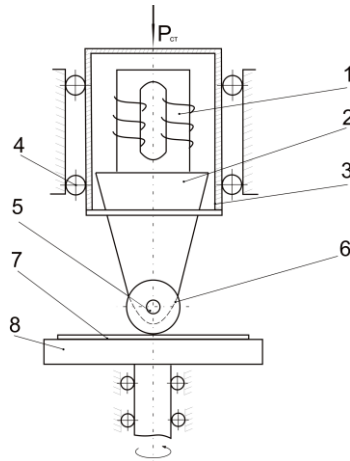


Рис. 1. Схема акустической колебательной системы технологического назначения

для шаржирования распиловочных дисков накатным роликом с ультразвуком:

- 1 – ультразвуковой преобразователь; 2 – полуволновой конический концентратор; 3 – корпус;
4 – шариковые направляющие; 5 – ось; 6 – накатный ролик; 7 – распиловочный диск; 8 – столик

Для теоретического описания условий контактного взаимодействия накатного ролика с обрабатываемой поверхностью при сообщении ему ультразвуковых колебаний воспользуемся моделью, представленной на рисунке 2. Полуволновой концентратор заменен жестким стержнем 1 такой же массы. Последний с помощью фланца 2 установлен в шариковых (идеальных) направляющих, допускающих его перемещение вдоль оси X . К выходному торцу стержня прикреплен упругий невесомый элемент 3 , с которым жестко связана ось 4 . На ней по скользящей (с нулевым зазором) посадке установлен накатной ролик 5 радиусом R , который посредством статической нагрузки P_{cm} прижат к поверхности подвижного жесткого основания 6 , имеющего линейную скорость V_0 . Центр масс ролика совпадает с осью его вращения OY , а его масса значительно меньше массы стержня.

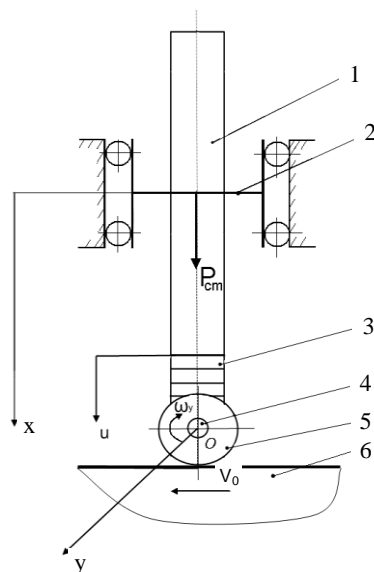


Рис. 2. Модель взаимодействия ролика с жестким основанием при ультразвуковом воздействии

Представленная модель аналогична той, которую использовали авторы работы [4] при теоретических исследованиях особенностей контактного взаимодействия вибрирующего с ультразвуковой частотой торца концентратора с жестким основанием. Отличие состоит в том, что в данном случае условия контактного взаимодействия ролика с основанием будут определяться, с одной стороны, вынужденным колебательным движением его центра масс (точка 0), обусловленного ультразвуковым воздействием, а с другой – его вращательным движением вокруг центра масс, т.е. оси OY .

Вначале рассмотрим случай взаимодействия ролика с неподвижным основанием ($V_0 = 0$), т.е. при отсутствии его качения. Для вычисления временных и силовых параметров взаимодействия ролика с основанием воспользуемся допущениями, сделанными в работе [5]. Упругий невесомый элемент с учетом четности ультразвукового преобразователя имеет характеристику:

$$U = \frac{R}{c} + A_0(1 - \cos \omega_{ak}t), \tag{1}$$

где U – текущее значение смещения; R – усилие, сжимающее элемент; c – жесткость упругого элемента; A_0 – амплитуда ультразвуковых колебаний; ω_{ak} – их круговая частота.

Обозначив $r = -R/c$, получим:

$$U + r = A_0(1 - \cos \omega_{ak}t), \tag{2}$$

где $0 \leq U \leq 2A_0$; $0 \leq r \leq 2A_0$.

Пусть в статическом режиме взаимодействия $U_{cm} = P_{cm}/c$, $r_{cm} = -P_{cm}/c$, тогда $U_{cm} + r_{cm} = 0$.

Положим, что при взаимодействии с колебаниями в присутствии динамических составляющих U_δ и r_δ выполняется условие:

$$U = U_{cm} + U_\delta; \quad r = r_{cm} + r_\delta.$$

Тогда из формулы (2) получаем:

$$U_\delta + r_\delta = A_0(1 - \cos \omega_{ak}t).$$

С учетом отмеченных обстоятельств рассмотрим режим контактного взаимодействия вибрирующего ролика с жестким основанием. Поведение системы в этом случае показано на рисунке 3.

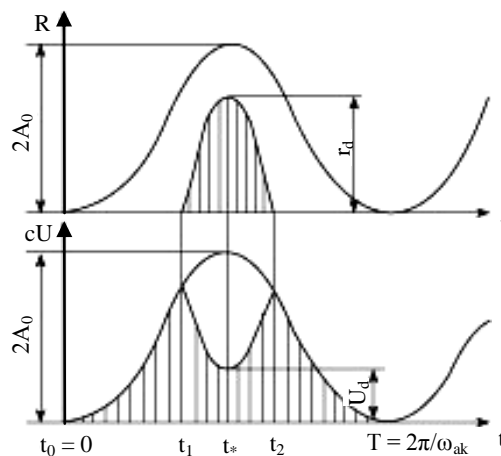


Рис. 3. Характер изменения R и cU за период гармонических колебаний

С целью упрощения математического описания заменим гармонический закон изменения cU и R на закон треугольника (рис. 4).

Тогда на этапе торможения, когда $t_1 \leq t \leq t_*$, где t_* – момент остановки, имеем:

$$R = -cr; \quad r = f(t) - U; \quad f(t) = 2A_0 \frac{\omega_{ak}t}{\pi}; \quad dx = -dU.$$

Допустим, что сила реакции за время контакта также меняется по закону треугольника и

$$r = r_* \frac{t - t_1}{t_* - t_1}, \quad (t_1 \leq t \leq t_*).$$

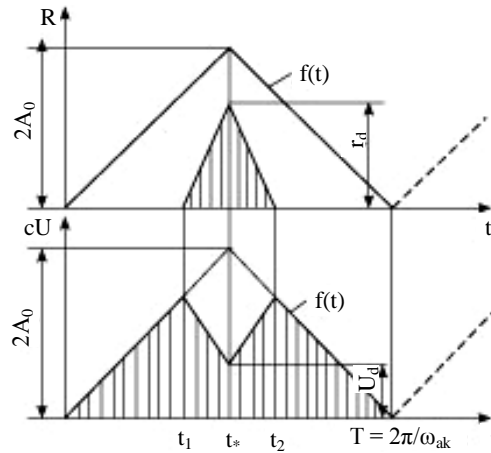


Рис. 4. Характер изменения R и cU при замене гармонического закона на закон треугольника

Используя теорему о кинетической энергии и закон изменения количества движения, получена система двух уравнений с двумя неизвестными r_* и $(t_* - t_1)$ [4]. В результате ее решения выведены формулы для вычисления этих параметров:

$$r_* = \frac{2P_{cm}}{c} D; \quad (3)$$

$$t_k = \frac{4P_{cm}\pi}{A_0\omega_{ak}c} C, \quad (4)$$

где

$$D = 1 + \frac{\beta}{C}; \quad C = \frac{1 + \sqrt{1 + 4(\alpha + \beta)}}{2\left(1 + \frac{\alpha}{\beta}\right)}.$$

Значения безразмерных коэффициентов α и β определяются следующим образом:

$$\alpha = \frac{mv_1^2 c}{4P_{cm}^2}; \quad \beta = \frac{A_0 m \omega_{ak} v_1 c}{\pi P_{cm}^2},$$

где m – масса стержня; v_1 – скорость стержня в момент соударения ролика с основанием, которая вычисляется из выражения:

$$v_1 = 2\sqrt{g(A_0 - 2x_{cm})},$$

где g – ускорение свободного падения.

С учетом (3) и (4) значение импульса силы r_* за время контакта t_k определится по формуле:

$$I = cr_* t_k = \frac{8P_{cm}^2 \pi}{A_0 \omega_{ak} c} CD. \quad (5)$$

В полученные выражения для определения r_x , t_k и I входят безразмерные коэффициенты C и D , которые могут принимать значения от единицы и выше. Они будут равны единице, если $V_1 = 0$, т.е. в безотрывном режиме взаимодействия, когда $A_0 = 2x_{cm}$, где $x_{cm} = \frac{P_{cm}}{c}$ – величина предварительного натяга, обусловленная нагружением упругого элемента статической нагрузкой.

Тогда выражения (3) – (5) примут вид:

$$r_x = \frac{2P_{cm}}{c} = 2x_{cm}; \quad t_k = T; \quad I = \frac{2P_{cm}\pi}{\omega_{ak}} = P_{cm}T,$$

где T – период ультразвуковых колебаний.

Отсюда видно, что в безотрывном режиме взаимодействия акустическая колебательная система является линейной, при этом величина импульса силы за период колебаний соответствует статическому нагружению и, следовательно, эффекты от ультразвукового воздействия проявляться не будут.

Если $A_0 > 2x_{cm}$, то взаимодействие поверхностей протекает в виброударном режиме, а система переходит в разряд нелинейных, что обусловлено нелинейным изменением коэффициентов C и D . При этом с повышением отношения $A_0 / 2x_{cm}$ значение r_* нелинейно возрастает, вместе с тем t_k снижается, а I увеличивается. Это свидетельствует о том, что при таких условиях ультразвук оказывает существенное влияние на процесс контактного взаимодействия ролика с поверхностью основания, вызывая тем самым соответствующие изменения в условиях его качения.

Для изучения этого вопроса примем, что жесткое основание (см. рис. 2) движется поступательно со скоростью v_0 , и определим угловую скорость вращения ролика ω_y при его качении в обычных условиях (без ультразвукового воздействия).

Пренебрегая потерями на трение в сопряжении ролик – ось, запишем уравнение, описывающее его вращательное движение вокруг оси OY .

$$I_y \varepsilon_y = M_{ep}, \text{ или } I_y \frac{d\omega_y}{dt} = M_{ep}, \quad (6)$$

где ε_y – угловое ускорение; ω_y – угловая скорость вращения ролика вокруг оси OY ; I_y – момент инерции ролика относительно оси OY ; M_{ep} – вращающий момент.

В рассматриваемом случае вращающий момент обусловлен действием сил трения сцепления $F_{mp.cu}$ (активных сил трения), возникающих в зоне контакта ролика с движущейся поверхностью основания. Тогда, при отсутствии проскальзывания, величина этого момента относительно оси вращения ролика определяется:

$$M_{ep} = F_{mp.cu} R, \text{ или } M_{ep} = \mu P_{cm} R,$$

где μ – коэффициент трения.

Подставляя выражение для M_{ep} в формулу (6), получим:

$$I_y \frac{d\omega_y}{dt} = \mu P_{cm} R,$$

откуда

$$d\omega_y = \frac{\mu P_{cm} R}{I_y} dt.$$

Учитывая, что μ , P_{cm} , R и I_y являются величинами постоянными, при интегрировании последнего выражения, получаем:

$$\omega_y = \frac{\mu P_{cm} R}{I_y} t + C_u,$$

где C_u – постоянная интегрирования, которую находим из начального условия. Если при $t = 0$, $\omega_y = \omega_{y0}$, то $C_u = \omega_{y0}$.

Отсюда получаем закон равномерного вращения ролика вокруг оси OY :

$$\omega_y = \frac{\mu P_{cm} R}{I_y} t + \omega_{y0}.$$

Считая, что в начальный момент при $t = 0$, $\omega_{y0} = 0$, получим выражение для определения средней угловой скорости вращения ролика вокруг оси OY за время, равное периоду ультразвуковых колебаний T :

$$\omega_y = \frac{\mu P_{cm} R}{I_y} T.$$

Подставляя в последнюю формулу значение момента инерции ролика относительно оси OY , $I_y = \frac{1}{2} m_p R^2$ (кг·м·с²), где m_p – масса ролика, получаем:

$$\omega_y = \frac{2\mu P_{cm}}{m_p R} T. \quad (7)$$

Таким образом, при обычных условиях взаимодействия ролика с движущимся с постоянной скоростью основанием он совершает равномерное вращательное движение вокруг своей оси со скоростью, определяемой выражением (7). Откуда следует, что при постоянной скорости перемещения основания средняя угловая скорость вращения ролика вокруг оси OY за время, равное периоду колебаний, будет возрастать с увеличением коэффициента трения и статической нагрузки, а также с уменьшением массы ролика и его радиуса.

Теперь обратимся к случаю, когда ролику сообщаются ультразвуковые колебания вдоль оси OX , которые обеспечивают виброударный режим его взаимодействия с движущейся поверхностью основания. При таком режиме закон вращательного движения ролика вокруг оси OY будет определяться моментом ударного импульса относительно этой оси, передаваемого ему за время контакта с движущейся поверхностью основания.

Исходя из этого для описания закона вращательного движения ролика на стадии его ударного взаимодействия с поверхностью движущегося основания воспользуемся теоремой о моменте количества движения тела вокруг неподвижной оси, согласно которой имеем уравнение:

$$I_y (\omega_y - \omega_{y0}) = \sum_{i=1}^n M_{t_i}, \quad (8)$$

где ω_y и ω_{y0} – угловые скорости вращения ролика в моменты времени t и t_0 ; $\sum_{i=1}^n M_{t_i}$ – сумма моментов импульсов внешних мгновенных сил относительно оси OY .

Момент импульса сил трения сцепления, вызывающий поворот ролика вокруг оси OY ($M_{вр.ак}$) за время его контакта с подвижной поверхностью основания, будет равен:

$$M_{вр.ак} = I \mu R,$$

где I – импульс силы реакции основания за время его контакта с роликом, значение которого вычисляется по формуле (5).

Примем, что проскальзывание поверхностей за время их контактного взаимодействия отсутствует, при этом в момент времени наступления контакта (t_0) $\omega_{y0} = 0$.

С учетом этого уравнение (8) примет вид:

$$\omega_{ук.ак} = \frac{16\mu P_{cm}^2 \pi R}{A_0 \omega_{ак} C I_y} C D.$$

Подставляя в него значение момента инерции ролика относительно оси OY , получим

$$\omega_{ук.ак} = \frac{16\mu P_{cm}^2 \pi}{A_0 \omega_{ак} c m_p R} C D. \quad (9)$$

Последнее выражение позволяет рассчитать среднюю угловую скорость вращения ролика вокруг оси OY , которую он приобретает за время его контактного взаимодействия с поверхностью подвижного основания. Примем, что в момент отрыва поверхностей угловая скорость вращения ролика равна нулю ($\omega_{ук} = 0$) и она не изменяется на протяжении времени их отрыва ($T - t_k$). Поэтому среднее значение угловой скорости вращения ролика вокруг оси OY за время, равное периоду ультразвуковых колебаний, будет определяться, с одной стороны, ее значением за время контактного взаимодействия поверхностей, а с другой – соотношением времени их контакта к периоду ультразвуковых колебаний (t_k/T). Поэтому выражение для вычисления средней угловой скорости вращения ролика вокруг оси OY за время, соответствующее периоду ультразвуковых колебаний, примет вид:

$$\omega_{ук} = \frac{16\mu P_{cm}^2 \pi}{A_0 \omega_{ак} c m_p R T} t_k C D. \quad (10)$$

В полученное выражение линейная скорость перемещения основания V_0 в явном виде не входит, но она оказывает влияние на режим работы акустической колебательной системы путем изменения суммарного натяга в ней. Так, при $V_0 \neq 0$ условие работы системы в виброударном режиме принимает следующий вид:

$$A_0 > 2x_{\Sigma}, \text{ или } A_0 > 2[x_{cm} + x_v(v_0)], \quad (11)$$

где x_{cm} – величина суммарного натяга в системе; $x_v(v_0)$ – величина скоростного натяга, обусловленного подъемом ролика за счет действия на него реакции основания, значение которой с повышением скорости v_0 возрастает по зависимости $x_v(v_0) = x_{cm}(e^{\alpha v_0} - 1)$, где e – основание натуральных логарифмов; α – коэффициент, определяемый экспериментально.

Тогда неравенство (11) примет вид:

$$A_0 > 2x_{cm}e^{\alpha v_0}. \quad (12)$$

Неравенство (12) устанавливает границу работы акустической колебательной системы в виброударном режиме с учетом статической нагрузки на ролик и линейной скорости движения контактирующей с ним поверхности основания. Как видно, с увеличением V_0 значение суммарного натяга в колебательной системе возрастает, что смещает границу ее виброударного режима работы в область меньших значений P_{cm} , а по мере увеличения статической нагрузки безударный режим ее работы наступает при меньших значениях V_0 . Заменяя в формуле (10) $2P_{cm}/c$ на $2x_{cm}e^{\alpha v_0}$, окончательно получаем выражение для расчета средней угловой скорости вращения ролика вокруг оси OY при сообщении ему ультразвуковых колебаний:

$$\omega_{\text{уак}} = \frac{16\mu P_{cm} x_{cm} e^{\alpha v_0} \pi t_k}{A_0 \omega_{\text{ак}} m_p R T} C D. \quad (13)$$

Если удвоенная величина суммарного натяга в системе равна амплитуде колебаний, т.е. $A_0 = 2P_{cm}/c e^{\alpha v_0} = 2x_{cm}e^{\alpha v_0}$, то взаимодействие ролика с основанием будет протекать в безотрывном режиме, при котором $t_k = T$, а коэффициенты C и D равны единице. Тогда для такого режима взаимодействия контактирующих элементов выражение (13) запишется в виде:

$$\omega_{\text{уак}} = \frac{2\mu P_{cm} T}{m_p R},$$

Видим, что оно полностью совпадает с выражением (7) для определения угловой скорости вращения ролика вокруг оси OY при обычных условиях его взаимодействия с подвижной поверхностью основания. Следовательно, при сообщении ролику ультразвуковых колебаний с амплитудой, соответствующей безотрывному режиму его взаимодействия с поверхностью движущегося основания, они не оказывают влияния на изменение угловой скорости вращения ролика, по сравнению с ее значением при обычных условиях его качения, т.е. эффект от ультразвукового воздействия отсутствует.

В случае когда $A_0 > 2x_{cm}e^{\alpha v_0}$, качение ролика протекает в виброударном режиме взаимодействия с движущейся поверхностью основания. При этом вращение ролика вокруг оси OY происходит только за время его контакта с поверхностью основания, а в течение времени отрыва поверхностей вращение ролика отсутствует. Как следует из выражения (13), с увеличением амплитуды колебаний, т.е. с увеличением неравенства $A_0 > 2x_{cm}e^{\alpha v_0}$, средняя угловая скорость вращения ролика за время периода ультразвуковых колебаний будет снижаться. При этом ее значение, соответствующее времени контакта поверхностей, будет возрастать благодаря увеличению вращающего момента за счет возрастания силы реакции, что в формуле (13) отражается нелинейным увеличением безразмерного коэффициента D . Но одновременно с этим происходит сокращение времени контактного взаимодействия поверхностей за период ультразвуковых колебаний, что в указанной формуле учитывается уменьшением отношения t_k/T при некотором возрастании коэффициента C . Таким образом, по мере увеличения неравенства $A_0 > 2x_{cm}e^{\alpha v_0}$ либо за счет увеличения амплитуды колебаний, либо уменьшения скорости движения основания, либо статической нагрузки средняя угловая скорость вращения ролика будет уменьшаться и, наоборот, она будет возрастать по мере уменьшения этого неравенства, а при $A_0 = 2x_{cm}e^{\alpha v_0}$ ее значение будет соответствовать средней угловой скорости вращения ролика при его качении в обычных условиях.

Исходя из допущения об изменении силы реакции за время контакта поверхностей по закону треугольника на рисунке 5 показан характер изменения угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний при виброударном режиме его взаимодействия с поверхностью основания для различных значений амплитуды колебаний при постоянной величине $2x_{cm} e^{\alpha v_0}$.

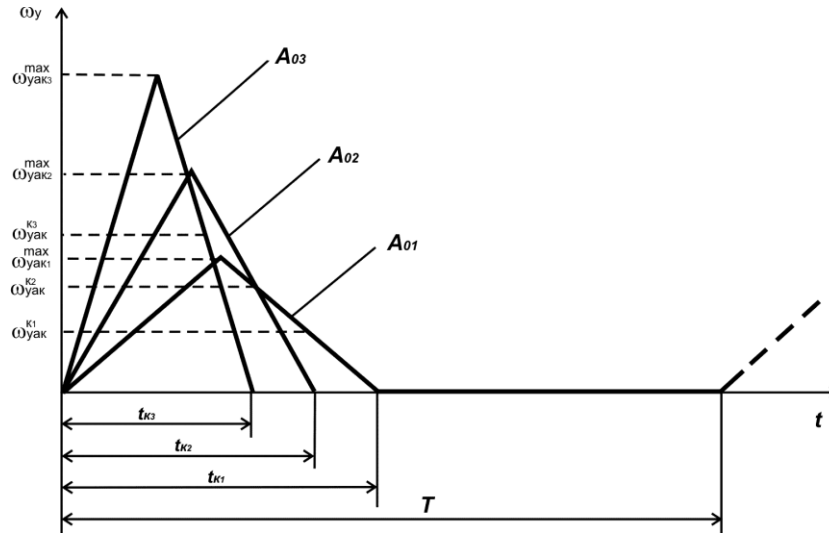


Рис. 5. Характер изменения угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний при различных значениях их амплитуды ($A_{03} > A_{02} > A_{01}$)

Как видно, угловая скорость вращения ролика за время его контакта с поверхностью подвижного основания изменяется по закону треугольника, достигая своего максимального значения при $t_k/2$. По мере увеличения амплитуды колебаний ($A_1 < A_2 < A_3$), максимальная угловая скорость (ω_{yak}^{max}), которую приобретает ролик за время контакта с поверхностью основания, возрастает, а соответственно, увеличивается ее среднее значение за это время (ω_{yak}^k). Но одновременно с этим время контактного взаимодействия поверхностей сокращается ($t_{\kappa 1} > t_{\kappa 2} > t_{\kappa 3}$), в результате чего среднее за период колебаний T значение угловой скорости вращения ролика (ω_{yak}) по мере увеличения амплитуды колебаний, а в общем случае по мере увеличения неравенства $A_0 > 2x_{cm} e^{\alpha v_0}$ снижается.

С целью количественной оценки степени влияния ультразвуковых колебаний на снижение угловой скорости вращения ролика воспользуемся коэффициентом η_{ω} , определяемым из соотношения:

$$\eta_{\omega} = \left(1 - \frac{\omega_y}{\omega_{yak}} \right), \quad (14)$$

где ω_y и ω_{yak} — соответственно средняя угловая скорость вращения ролика за время, равное периоду ультразвуковых колебаний при его качении в обычных условиях и при ультразвуковом воздействии.

Подставляя в (14) выражения (7) и (13) для вычисления ω_y и ω_{yak} и преобразуя, получим формулу для расчета η_{ω} :

$$\eta_{\omega} = \left(1 - \frac{A_0}{2x_{cm} e^{\alpha v_0} CД} \frac{t_k}{T} \right). \quad (15)$$

Из формулы (14) следует, что при $A_0 = 2x_{cm} e^{\alpha v_0}$, т.е. при безотрывном режиме взаимодействия подвижного основания с роликом, когда $t_k = T$, влияние ультразвука на снижение угловой скорости его вращения отсутствует и $\omega_y = \omega_{yak}$, а $\eta_{\omega} = 0$. В виброударном режиме взаимодействия этих элементов угловая скорость вращения ролика всегда будет ниже ее значения, соответствующего обычным условиям его качения. При этом по мере увеличения неравенства $A_0 > 2x_{cm} e^{\alpha v_0}$, что равносильно повышению интенсивности виброударного взаимодействия ролика с движущимся основанием, влияние ультразвуковых колебаний на степень снижения скорости его вращения возрастает.

Обобщая результаты выполненных исследований, можно сформулировать **основные выводы**:

1. Предложена математическая модель процесса контактного взаимодействия ролика с жестким подвижным основанием при сообщении ролику ультразвуковых колебаний, направленных перпендикулярно поверхности их контакта, позволяющая исследовать влияние интенсивности ультразвукового воздействия на силовые, временные и скоростные параметры этого процесса.

2. Получены аналитические зависимости для расчета времени контактного взаимодействия ролика с поверхностью неподвижного основания, силы его реакции и ее импульса за период колебаний с учетом статического нагружения системы и интенсивности ее ультразвукового возбуждения. Установлено, что в зависимости от соотношения амплитуды колебания (A_0) и удвоенной величины статического натяга в системе ($2x_{cm}$), обусловленного ее статическим нагружением, взаимодействие ролика с поверхностью неподвижного основания может протекать в безотрывном режиме, когда $A_0 = 2x_{cm}$, и в виброударном режиме, когда $A_0 > 2x_{cm}$.

3. На основании установленных закономерностей контактного взаимодействия ролика с жестким основанием при ультразвуковом воздействии получено выражение, позволяющее рассчитать среднюю угловую скорость его вращения за период колебаний в зависимости от интенсивности возбуждения акустической колебательной системы, ее статического нагружения и скорости перемещения основания V_0 . Показано, что в этом случае режим взаимодействия ролика с подвижным основанием определяется соотношением амплитуды колебаний и удвоенной величины суммарного натяга ($2x_{\Sigma} = 2x_{cm} e^{aV_0}$) в акустической колебательной системе, которая определяется как ее статическим нагружением, так и скоростью движения основания. При этом если $A_0 = 2x_{\Sigma}$, то взаимодействие указанных элементов протекает в безотрывном режиме, а при $A_0 > 2x_{\Sigma}$ устанавливается виброударный режим их взаимодействия.

4. Установлено, что при виброударном режиме взаимодействия ролика с подвижным основанием угловая скорость его вращения во всех случаях будет меньше ее значения, соответствующего качению в обычных условиях. При этом степень этого снижения возрастает с увеличением амплитуды ультразвуковых колебаний, с уменьшением статической нагрузки и скорости движения основания. При безотрывном режиме взаимодействия ролика с подвижным основанием ультразвук не оказывает влияния на изменение угловой скорости вращения ролика, по сравнению с его качением в обычных условиях.

ЛИТЕРАТУРА

1. Епифанов, В.И. Технология обработки алмазов в бриллианты / В.И. Епифанов, А.Я. Лесина, Л.В. Зыков; под ред. В.И. Епифанова. – М.: Высш. шк., 1987. – 335 с.
2. Северденко, В.П. Ультразвук и пластичность / В.П. Северденко, В.В. Клубович, А.В. Степаненко. – Минск: Наука и техника, 1976. – 448 с.
3. Марков, А.И. Ультразвуковая обработка материалов / А.И. Марков. – М.: Машиностроение, 1980. – 237 с.
4. Киселев, М.Г. Математическое моделирование процесса контактного взаимодействия тел в условиях ультразвукового нагружения / М.Г. Киселев, В.А. Ибрагимов // Приборостроение. – Минск, 1989. – № 11. – С. 98 – 102.
5. Киселев, М.Г. Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М.Г. Киселев, В.Т. Минченя, В.А. Ибрагимов; под ред. М.Г. Киселева. – Минск: Тесей, 2001. – 344 с.

Поступила 27.12.2008