

УДК 621.9.048.4

**М. Г. Киселев, д-р техн. наук, проф., А. В. Дроздов, канд. техн. наук,
В. Л. Габец, А. А. Столяров**

ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ, СООБЩАЕМЫХ НАКАТНОМУ РОЛИКУ ПОД УГЛОМ, НА УСЛОВИЯ ЕГО КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ С ПОДВИЖНЫМ ОСНОВАНИЕМ

В статье предложена математическая модель контактного взаимодействия ролика с жестким подвижным основанием при сообщении ролику ультразвуковых колебаний, направленных под углом к вертикальной оси, позволяющая исследовать влияние угла введения колебаний и их интенсивности на силовые, временные и скоростные параметры этого процесса. В частности, получена аналитическая зависимость для расчета угловой скорости вращения ролика при ультразвуковом воздействии в зависимости от угла введения колебаний, их интенсивности, статической нагрузки, скорости движения основания, массы и радиуса ролика при условии сохранения виброударного режима взаимодействия ролика с поверхностью подвижного основания. Представлен механизм влияния ультразвуковых колебаний на характер изменения угловой скорости вращения ролика при его попутном и встречном взаимодействии с поверхностью подвижного основания. Показано, что путем сообщения накатному ролику (деформирующему инструменту) ультразвуковых колебаний становится возможным за счет изменения направления их введения и интенсивности целенаправленно и в широком диапазоне влиять на условия его контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, включая управление как угловой скоростью вращения ролика, так и его направлением.

Введение

Значительное количество технологических операций обработки материалов основано на методе обкатки. К примеру, при обработке деталей поверхностным пластическим деформированием путем обкатывания их роликами или шариками под нагрузкой; при шаржировании поверхностей инструментов алмазными или абразивными зёрнами путем их вдавливания в материал инструмента накатным роликом [1]. Особо следует подчеркнуть, что для конкретной операции с учетом условий ее выполнения и предъявляемых требований необходимо реализовать такой закон движения обрабатывающих инструментов, при котором обеспечивались бы наиболее эффективные условия их контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью. Так, применительно к шаржированию поверхностей необходимо, чтобы закон движения накатного ролика (деформирующего инструмента), с одной стороны, создавал благоприятные условия для гарантированного попадания алмазных (абразивных) зёрен в зону контакта в их исходном (неразрушенном) со-

стоянии, а с другой, обеспечивал такой характер и уровень их силового нагружения, при которых происходило бы их интенсивное вдавливание в материал обрабатываемой поверхности и надежное закрепление в нем.

Успешное решение этой задачи, в первую очередь, связано с научно обоснованным применением таких дополнительных воздействий на технологическую систему, которые дали бы возможность целенаправленно и в широком диапазоне управлять законом движения деформирующего инструмента, а соответственно и условиями его контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

Одним из эффективных вариантов такого воздействия является применение энергии ультразвука путем сообщения колебаний деформирующему инструменту [2, 3]. При этом степень и диапазон управляющего воздействия ультразвука на изменение условий контактного взаимодействия инструмента с обрабатываемой поверхностью определяются как интенсивностью колебаний,

так и направлением их введения в зону обработки. Однако полученные в предшествующих исследованиях результаты относятся к взаимодействию поверхностей в условиях их трения скольжения, а поэтому не могут быть напрямую использованы для оценки управляющего влияния ультразвука на процесс контактного взаимодействия деформирующего инструмента с обрабатываемой поверхностью при методе обкатки, т. е. в условиях трения качения.

Последнее обстоятельство определило цель данной работы, которая заключалась в теоретической оценке влияния интенсивности и направления введения

ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику, на условия его контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью.

Расчетная модель, примененная в исследованиях

Для математического описания процесса контактного взаимодействия ролика с подвижной поверхностью при сообщении ему продольных ультразвуковых колебаний, направленных под углом к вертикальной оси, обратимся к модели акустической колебательной системы, представленной на рис. 1.

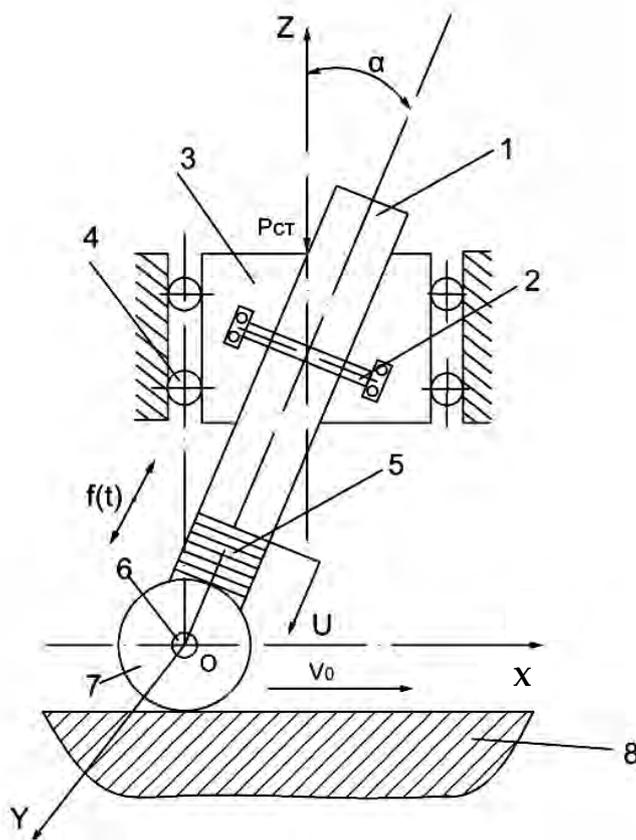


Рис. 1. Модель акустической колебательной системы для описания процесса взаимодействия ролика с подвижной поверхностью при сообщении ему ультразвуковых колебаний, направленных под углом к вертикальной оси

Здесь ультразвуковой преобразователь вместе с концентратором заменен жестким стержнем 1, имеющим ту же массу и длину. В узловом сечении на

стержне предусмотрен фланец 2, посредством которого он закрепляется на подвижной части 3 шариковых направляющих 4. При этом конструкция креп-

ления позволяет устанавливать его под углом к вертикальной оси. К выходному торцу стержня жестко прикреплен невесомый упругий элемент 5, имеющий неподвижную ось 6, на которую по скользящей (с нулевым зазором) посадке установлен ролик 7. За счет статической нагрузки $P_{ст}$, приложенной к подвижной части шариковых направляющих, ролик прижимается к поверхности подвижного жесткого основания 8.

Рассчитаем угловую скорость вращения ролика при его взаимодействии с подвижным основанием в обычных условиях качения и при сообщении ему ультразвуковых колебаний, направленных под различным углом к вертикальной оси. Для этого обратимся к расчетной схеме взаимодействия ролика с подвижным жестким основанием, приведенной на рис. 2.

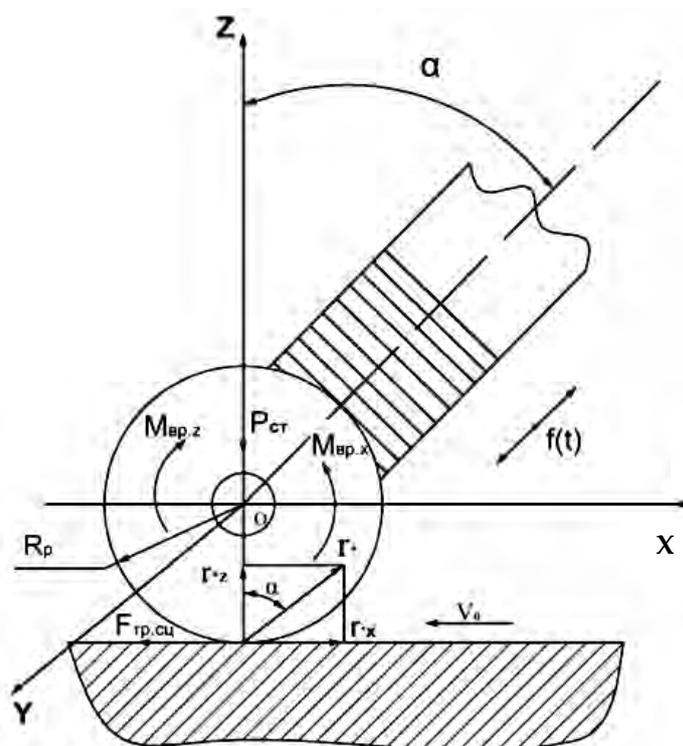


Рис. 2. Расчетная схема контактного взаимодействия ролика с подвижной поверхностью при сообщении ему ультразвуковых колебаний, направленных под углом к вертикальной оси

Примем, что проскальзывание ролика относительно плоскости основания отсутствует, т. е. в зоне их контакта действуют только силы трения сцепления, а силы сопротивления вращению ролика вокруг оси OY , совпадающей с осью его вращения, действующие в сопряжении ось-ролик, настолько малы, что ими можно пренебречь.

Тогда для обычных условий качения ролика при его нагружении статической нагрузкой $P_{ст}$ средняя угловая скорость его вращения вокруг оси OY за время, равное

периоду ультразвуковых колебаний T , определяется следующим образом:

$$\omega_y = \frac{\mu \cdot P_{ст} \cdot R_p}{J_y} T, \quad (1)$$

где μ – коэффициент трения; R_p – радиус ролика; J_y – момент инерции ролика относительно оси OY , $J_y = \frac{1}{2} m_p R_p^2$; m_p – масса ролика.

Внося значение J_y в формулу (1), получим

$$\omega_y = \frac{2\mu \cdot P_{cm} \cdot T}{m_p R_p} \quad (2)$$

Из формулы (2) следует, что при обычных условиях качения ролик совершает равномерное вращательное движение вокруг оси OY , скорость которого возрастает с увеличением μ и $R_{ст}$ и со снижением m_p и R_p .

Переходя к расчету угловой скорости вращения ролика при ультразвуковом воздействии, воспользуемся следующими положениями, сделанными авторами [4] для случая, когда ультразвуковые колебания сообщаются ролику вдоль оси OZ , т. е. когда угол $\alpha = 0$.

В частности, с учетом четности работы ультразвукового преобразователя упругий невесомый элемент имеет характеристику:

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

где U – текущее значение смещения упругого элемента; R – усилие, сжимающее элемент; c – жесткость упругого элемента;

A_0 – амплитуда ультразвуковых колебаний; $\omega_{ак}$ – их круговая частота.

Обозначив $r = -\frac{R}{c}$, получим

$$U + r = A_0(1 - \cos \omega_{ак} t), \quad (3)$$

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

Пусть в статическом режиме взаимодействия ролика с основанием $U_{ст} = -\frac{P_{ст}}{c}$, $r_{ст} = -\frac{P_{ст}}{c}$, тогда $U_{ст} + r_{ст} = 0$.

Положим, что при взаимодействии с колебаниями в присутствии динамических составляющих U_d и r_d выполняется условие

$$U = U_{ст} + U_d; \quad r = r_{ст} + r_d.$$

Тогда из формулы (3) получаем

$$U_d + r_d = A_0(1 - \cos \omega_{ак} t).$$

С целью упрощения математического описания заменим гармонический закон изменения U и r на закон треугольника. С учетом этого на рис. 3 показано поведение системы за период ультразвуковых колебаний.

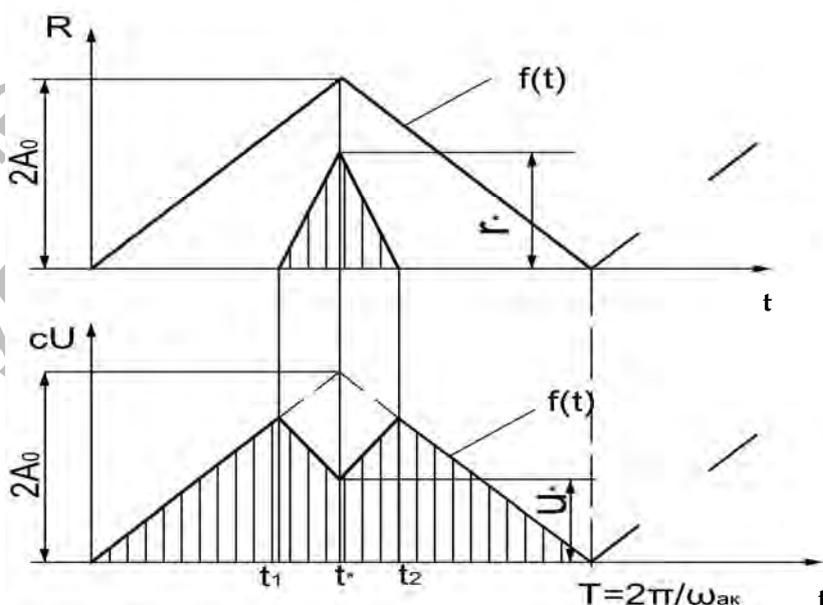


Рис. 3. Характер изменения R и cU за период ультразвуковых колебаний при замене гармонического закона на закон треугольника

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

$$R = -cr; \quad r = f(t) - U;$$

$$f(t) = 2A_0 \frac{\omega_{ак} t}{\pi}; \quad dz = -dU.$$

Примем, что сила реакции основания за время контакта с роликом также меняется по закону треугольника и

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

В [4] получены формулы для расчета времени контактного взаимодействия поверхностей t_k за период колебаний, максимального значения силы реакции r_* за время t_k и значение импульса I силы r_* за время контакта поверхностей:

$$t_k = \frac{4P_{ст} \pi}{A_0 \omega_{ак} c} C; \quad (4)$$

$$r_* = \frac{2P_{ст}}{c} D; \quad (5)$$

$$I = cr_* t_k \frac{8P_{ст}^2 \pi}{A_0 \omega_{ак} c} C D, \quad (6)$$

где

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

Значения безразмерных коэффициентов Δ и β определяются следующим образом:

$$\Delta = \frac{mv_1^2 c}{4P_{ст}^2}; \quad \beta = cr_* t_k \frac{A_0 m \omega_{ак} v_1}{\pi P_{ст}^2},$$

где m – масса ультразвукового преобразователя (масса стержня); v_1 – скорость стержня в момент соударения, $v_1 = 2\sqrt{q(A_0 - 2z_{ст})}$, $z_{ст}$ – величина предельного натяга (сжатие упругого

элемента), обусловленная статическим нагружением системы, $z_{ст} = \frac{P_{ст}}{c}$.

В полученные выражения для определения t_k , r_* и I входят безразмерные коэффициенты C и D , которые могут принимать значения от единицы и выше. Они будут равны единице, если $A_0 = 2z_{ст}$ и $v_1 = 0$, что соответствует безотрывному режиму взаимодействия ролика с неподвижным основанием при $v_0 = 0$. Тогда выражения (4)–(6) примут вид:

$$r_* = \frac{2P_{ст}}{c} = 2z_{ст}; \quad t_k = T;$$

$$I = \frac{2P_{ст} \pi}{\omega_{ак} c} = P_{ст} T.$$

Отсюда следует, что в безотрывном режиме взаимодействия ролика с основанием, когда они колеблются как единое целое в пределах упругих деформаций, колебательная система является линейной, при этом величина импульса силы за период колебаний соответствует статическому нагружению системы.

Если $A_0 > 2z_{ст}$, то взаимодействие ролика с неподвижной поверхностью основания протекает в виброударном режиме, а система становится нелинейной, что обусловлено нелинейным возрастанием коэффициентов C и D . При этом по мере увеличения указанного неравенства значения r_* и I нелинейно возрастают, а величина t_k снижается.

Теперь рассмотрим, как изменится режим работы акустической колебательной системы, если ролик взаимодействует с поверхностью подвижного основания, имеющего линейную скорость v_0 (см. рис. 1). В этом случае на ролик со стороны движущейся поверхности действует постоянная реакция, вызывающая дополнительное сжатие упругого невесомого элемента, что оп-

равданно трактовать как соответствующую величину натяга в акустической колебательной системе. Следовательно, при взаимодействии ролика с подвижным основанием суммарный натяг в акустической колебательной системе z_{Σ} будет определяться величиной натяга, обусловленной ее статическим нагружением $z_{ст}$, а также значением натяга, вызванного скоростью движения основания $v_0(v_0)$. Поэтому условие работы системы в виброударном режиме запишется как

$$A_0 > 2z_{\Sigma} \quad \text{или} \quad A_0 > 2[z_{ст} + z_v(v_0)]. \quad (7)$$

Согласно полученным в [5] данным, $z_v(v_0) = z_{ст}(e^{\varepsilon v_0} - 1)$. Тогда неравенство (7) примет вид:

$$A_0 > 2z_{ст}e^{\varepsilon v_0}, \quad (8)$$

где e – основание натуральных логарифмов; ε – коэффициент, определяемый экспериментально.

Неравенство (8) устанавливает границу работы акустической колебательной системы в виброударном режиме с учетом статического нагружения ролика и скорости движения основания. Из него видно, что с увеличением v_0 значение суммарного натяга в колебательной системе возрастает, что смещает границу виброударного режима в область меньших значений $P_{ст}$.

Заменяя в выражениях (4)–(6) удвоенную величину натяга, обусловленную только статическим нагружением системы (при $v_0 = 0$) $2z_{ст} = \frac{2P_{ст}}{c}$, на удвоенное значение суммарного натяга $2z_{\Sigma} = 2z_{ст}e^{\varepsilon v_0}$, получим зависимости для расчета r_* , t_k и I при взаимодействии ролика с подвижным основанием, имеющим скорость v_0 :

$$t_k = \frac{4z_{ст}e^{\varepsilon v_0} \pi}{A_0 \omega_{ак}} C; \quad (9)$$

$$r_* = 2z_{ст}e^{\varepsilon v_0} D; \quad (10)$$

$$I = \frac{8P_{ст}z_{ст}e^{\varepsilon v_0}}{A_0 \omega_{ак}} C D. \quad (11)$$

При этом $v_1 = 2\sqrt{q(A_0 - 2z_{ст}e^{\varepsilon v_0})}$.

Используя полученное выражение для определения временных и силовых параметров контактного взаимодействия ролика с подвижным основанием при введении колебаний перпендикулярно его поверхности (вдоль оси OZ), рассчитаем угловую скорость вращения ролика вокруг оси OY, когда колебания ему сообщаются под углом α к оси OZ (см. рис. 2). В этом случае силу реакции со стороны основания, действующую на ролик за время их контакта r_* , разложим на тангенциальную составляющую r_*^x и нормальную r_*^z , значения которых определяются как

$$r_*^x = r_* \cos \alpha \quad \text{и} \quad r_*^z = r_* \sin \alpha.$$

Запишем уравнение вращательного движения ролика вокруг оси OY, когда колебания ему сообщаются под α , используя теорему о моменте количества движения системы при воздействии внешних мгновенных сил (ударов):

$$J_y (\omega_y - \omega_{y0}) = \sum_{i=1}^n M_{вр,i}, \quad (12)$$

где ω_y и ω_{y0} – угловые скорости вращения ролика в моменты времени t и t_0 соответственно.

В правой части уравнения (12) стоит сумма моментов импульсов внешних мгновенных сил относительно оси OY. Если пренебречь силами сопротивления, возникающими в подвижном сопряжении ось-ролик, то на него за время контактного взаимодействия с подвижным основанием действует вращательный момент, равный сумме противоположно направленных моментов импульсов сил, создаваемых составляющими r_*^x и r_*^z относительно оси

ОУ. Причем момент импульса силы r_*^z направлен по часовой стрелке, а момент импульса силы r_*^x – против часовой стрелки (см. рис. 2).

Значения указанных моментов определяются следующим образом:

$$M_{вр}^x = I_x \mu R_p \quad \text{и} \quad M_{вр}^z = I_z \mu R_p,$$

где μ – коэффициент трения сцепления; I_x, I_z – импульсы силы реакции, действующие вдоль осей ОХ и ОZ, за время контакта поверхностей соответственно, которые определяются как

$$I_x = I \cos \alpha; \quad I_z = I \sin \alpha.$$

Подставляя в формулу (12) выражения для вычисления моментов импульсов сил, действующих на ролик за время его контакта с поверхностью подвижного основания, и принимая, что при $t_0 = 0$ $\omega_{y0} = 0$, после преобразования получим выражение для определения средней угловой скорости вращения ролика за время контакта поверхностей при сообщении ему ультразвуковых колебаний под углом α к оси ОZ

$$\omega_{yak} = \frac{16\mu \cdot P_{cr} \cdot z_{cr} \cdot e^{e\nu_0}}{A_0 \omega_{ak} m_p R_p} \text{СД}(1 - \text{tg} \alpha). \quad (13)$$

Чтобы определить среднюю угловую скорость вращения ролика вокруг оси ОУ за время, равное периоду ультразвуковых колебаний, примем, что в момент разрыва контакта и на протяжении времени отрыва поверхностей ($T - t_k$) вращение ролика отсутствует ($\omega_y = 0$). Тогда достаточно в выражение (13) внести отношение $\frac{t_k}{T}$ и получим формулу для расчета средней угловой скорости вращения ролика относительно оси ОУ за время, равное периоду ультразвуковых колебаний:

$$\omega_{yak} = \frac{16\mu \cdot P_{cr} \cdot z_{cr} \cdot e^{e\nu_0}}{A_0 \cdot \omega_{ak} \cdot m_p \cdot R_p} \frac{t_k}{T} \text{СД}(1 - \text{tg} \alpha). \quad (14)$$

Заметим, что полученное выражение позволяет рассчитать угловую скорость вращения ролика при условии, что угол α изменяется в пределах $-\frac{\pi}{2} > \alpha < \frac{\pi}{2}$. Такое ограничение связано

с тем, что при $\alpha = -\frac{\pi}{2}$ и $\frac{\pi}{2}$ сообщаемые

ролику ультразвуковые колебания действуют только вдоль оси ОХ, исключая тем самым условия для возникновения в колебательной системе виброударного режима ее работы, включая безотрывное колебательное взаимодействие ее звеньев. Принятая в данных исследованиях расчетная модель взаимодействия ролика с основанием при ультразвуковом воздействии справедлива для тех случаев, когда в колебательной системе предусмотрены соответствующие условия для реализации виброударного режима ее работы. Поэтому с целью оценки влияния ультразвуковых колебаний, сообщаемых ролику вдоль оси ОХ, на условия его контактного взаимодействия с подвижным основанием необходимо использовать иную расчетную модель, разработке которой и ее исследованию посвящены последующие исследования авторов.

В рамках данной работы, основываясь на зависимости (14), проанализируем влияние угла введения ультразвуковых колебаний, их интенсивности, а также статической нагрузки, скорости движения основания и параметров ролика на среднюю угловую скорость его вращения вокруг оси ОУ.

Так, при $\alpha = 0$, когда ультразвуковые колебания действуют вдоль оси ОZ, $\text{tg} \alpha = 0$ и выражение (14) принимает вид:

$$\omega_{yak} = \frac{16\mu \cdot P_{cr} \cdot z_{cr} \cdot e^{e\nu_0}}{A_0 \omega_{ak} m_p R_p} \frac{t_k}{T} \text{СД}. \quad (15)$$

В этом случае $I_x = 0$ и $M_{вр}^x = 0$, а, следовательно, вращение ролика вокруг оси ОУ происходит за счет действия

одного вращающего момента $M_{вр}^z = I_z \mu R_p$ (см. рис. 2). Поэтому направление его вращения остается таким же, как при его качении относительно подвижного основания в обычных условиях их контактирования (без ультразвукового воздействия). При виброударном режиме их взаимодействия, когда $A_0 > 2z_{cm} e^{\epsilon v_0}$, то как следует из формулы (15), по мере увеличения амплитуды ультразвуковых колебаний значение $\omega_{уак}$ снижается. Аналогичным образом на изменение угловой скорости вращения ролика влияют его радиус и масса. С увеличением статической нагрузки и скорости перемещения основания значение $\omega_{уак}$ возрастает, что обусловлено снижением интенсивности виброударного режима работы акустической колебательной сис-

темы за счет возрастания в ней суммарного натяга.

Сделанное допущение о том, что сила реакции основания Γ_* за время его контакта с роликом t_k изменяется по закону треугольника, позволяет считать, что и величина вращающего момента за это время $M_{вр}$ также будет изменяться по этому закону. Примем, что угловая скорость вращения ролика в момент начала его контакта с основанием и в момент их отрыва равна нулю. С учетом этого на рис. 4 показан характер изменения угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний при виброударном режиме его взаимодействия с подвижным основанием для различных значений амплитуды колебаний с введением их вдоль оси OZ.

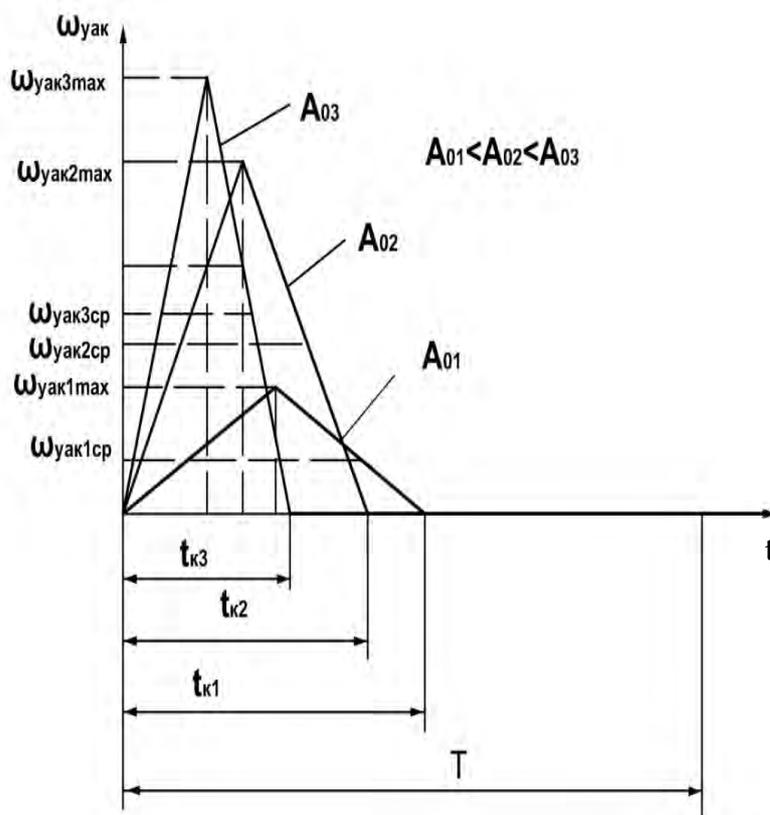


Рис. 4. Характер изменения угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний при виброударном режиме его взаимодействия с подвижным основанием для различных значений амплитуды колебаний с введением их вдоль оси OZ

Отсюда видно, что угловая скорость вращения ролика с момента начала контакта возрастает от нуля до своего максимального значения ω_{yak}^{max} , которое соответствует половине времени контактного взаимодействия поверхностей $\frac{t_k}{2}$.

После этого она снижается и становится равной нулю к моменту их отрыва и сохраняет это значение на протяжении данной стадии $(T - t_k)$ вплоть до наступления следующего контактного взаимодействия поверхностей. Поэтому среднее значение угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний будет определяться, с одной стороны, ее средним значением за время контактного взаимодействия поверхностей ω_{yak}^{cp} , которое равно $\frac{\omega_{yak}^{max}}{2}$, а с другой – отношением продолжительности этой стадии к периоду колебаний $\frac{t_k}{T}$.

По мере увеличения амплитуды колебаний $A_{01} < A_{02} < A_{03}$ значения как максимальной, так и средней угловой скорости вращения ролика за время его контактного взаимодействия с подвижным основанием возрастают. Но одновременно с этим продолжительность этой стадии сокращается, т. е. t_k уменьшается, а поэтому среднее значение угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний с повышением их амплитуды будет снижаться. Исходя из этого можно сформулировать следующие принципиальные положения о влиянии ультразвуковых колебаний рассматриваемого направления на изменение угловой скорости вращения ролика по сравнению с традиционными условиями его качения. Так, при реализации виброударного режима взаимодействия ролика с подвижным основанием средняя угловая скорость его вращения всегда будет ниже ее значения, соответствующего традиционным условиям качения при сохранении одинакового направления вращения ролика. По мере увеличения интенсивности вибро-

ударного режима взаимодействия ролика с подвижным основанием за счет повышения амплитуды ультразвуковых колебаний или снижения статической нагрузки и скорости перемещения основания степень снижения угловой скорости вращения ролика в сравнении с традиционными условиями его качения возрастает.

Проанализируем условия качения ролика при сообщении ему ультразвуковых колебаний, направленных под углом α к оси OZ. За положительное значение этого угла примем вариант, при котором направление действия тангенциальной составляющей амплитуды колебаний ролика в момент контакта с основанием совпадает с направлением скорости его перемещения, т. е. случай попутного взаимодействия. При встречном взаимодействии направление действия указанных параметров оказывается противоположным, что соответствует отрицательному значению угла α .

Как следует из формулы (14), для оценки влияния угла α на угловую скорость вращения ролика при ультразвуковом воздействии достаточно проанализировать изменение функции $(1 - \operatorname{tg} \alpha)$ в диапазоне $-\frac{\pi}{2} > \alpha < \frac{\pi}{2}$. На рис. 5, а показан характер изменения ω_{yak} от угла введения ультразвуковых колебаний при попутном взаимодействии ролика с подвижным основанием.

Отсюда видно, что по мере увеличения угла α в сторону его положительных значений угловая скорость вращения ролика снижается в сравнении с ее значением при $\alpha = 0$. В том случае, когда $\alpha = \frac{\pi}{4}$ и $\operatorname{tg} \alpha = 1$, $\omega_{yak} = 0$, т. е. вращение ролика отсутствует. При $\frac{\pi}{4} < \alpha < \frac{\pi}{2}$ угловая скорость вращения ролика возрастает, причем изменяется на противоположное направление этого вращения.

Характер изменения ω_{yak} от зна-

чения угла α в пределах $0 \leq \alpha < -\frac{\pi}{2}$,

т. е. при встречном взаимодействии ролика с подвижным основанием, приведен на рис. 5, б. В этом случае с увеличением угла α угловая скорость вращения ролика возрастает по сравнению с ее значением при $\alpha = 0$, при этом направление этого вращения не изменяется. Для $\alpha = -\frac{\pi}{4}$,

когда $\operatorname{tg} \alpha = -1$ угловая скорость вращения ролика в два раза превышает ее значение, соответствующее $\alpha = 0$. С изменением этого угла в пределах

$-\frac{\pi}{4} < \alpha < -\frac{\pi}{2}$ угловая скорость вращения

ролика продолжает возрастать. Отсюда вытекает важный вывод о том, что при сообщении ролику ультразвуковых колебаний, направленных под углом к вертикальной оси, степень их влияния на угловую скорость его вращения, в первую очередь, определяется изменением направления этого угла относительно указанной оси. Другими словами, имеет место попутное или встречное взаимодействие колеблющегося ролика с подвижным основанием.

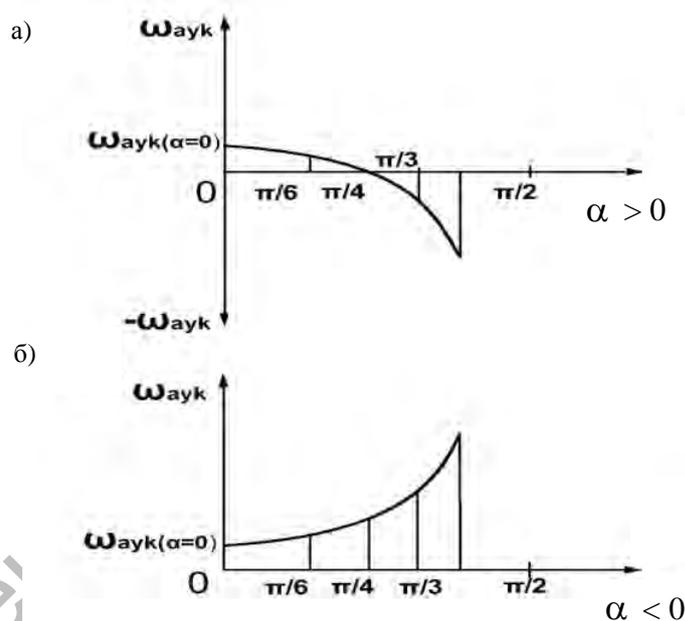


Рис. 5. Зависимость угловой скорости вращения ролика при ультразвуковом воздействии от значения угла введения колебаний относительно вертикальной оси: а – при попутном взаимодействии; б – при встречном взаимодействии ролика с подвижным основанием

Для раскрытия механизма влияния ультразвуковых колебаний на угловую скорость вращения ролика при указанных условиях его взаимодействия с подвижным основанием обратимся к рис. 6.

На нем показан характер изменения угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний при попутном (рис. 6, а) и встречном (рис. 6, б) его взаимодействии с подвижным осно-

ванием при виброударном режиме их контактирования.

Как было показано выше, при попутном взаимодействии на ролик за время его контактирования с поверхностью подвижного основания действуют два вращающих момента, стремящихся повернуть ролик относительно оси OY , но в противоположных направлениях (см. рис. 2).

С учетом этого на рис. 6, а изменение угловой скорости вращения ролика за время контакта под действием момента M_1 соответствует зависимость (1), а под действием момента M_2 – зависимость (2). Путем их графического сложения получена результирующая зависимость (3), отражающая изменение угловой скорости вращения ролика за время его контактного взаимодействия с подвижным основанием. Отсюда видно, что как максимальное (ω_{yak}^{max}), так и среднее значение (ω_{yak}^{cp}) этой скорости, а также направление вращения ролика будут определяться соотношением действующих на него за время контакта моментов, которые, в свою очередь, зависят от угла α . При $\alpha = -\frac{\pi}{4}$

эти моменты оказываются равными по величине, но действующими в противоположном направлении, в результате чего вращение ролика будет отсутствовать. В том случае, когда $\alpha > \frac{\pi}{4}$, зна-

чение момента M_2 становится больше момента M_1 , вследствие чего ролик изменяет направление своего вращения, угловая скорость которого возрастает по мере увеличения угла α вплоть до его значений, при которых при данных условиях качения ролика сохраняется виброударный режим его взаимодействия с подвижным основанием, т. е.

$$\alpha < \frac{\pi}{2}.$$

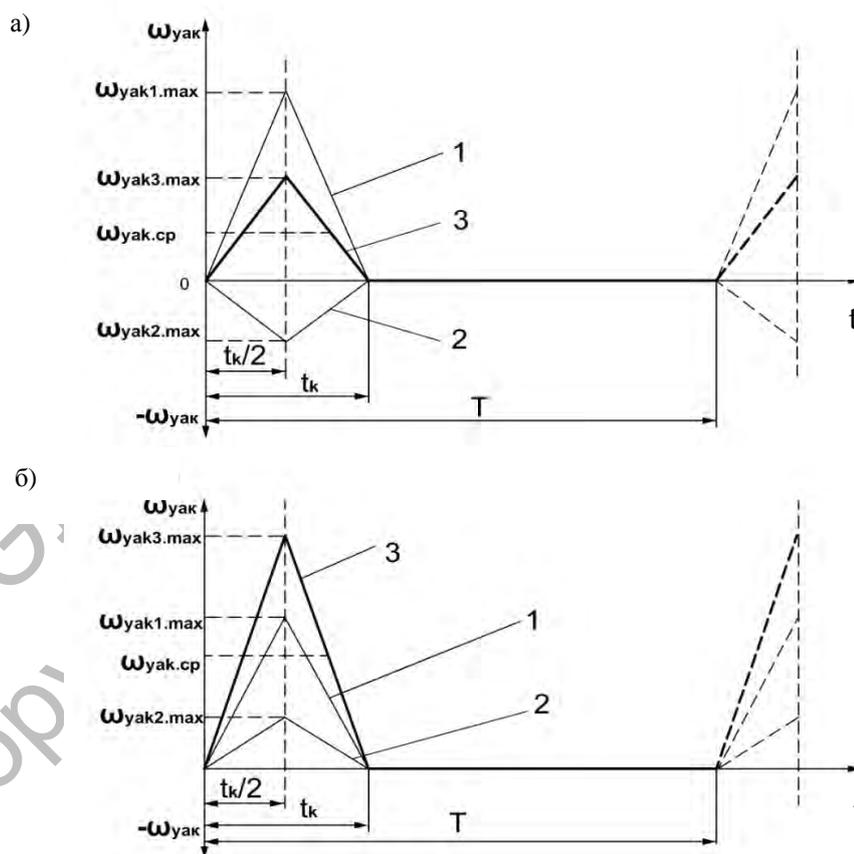


Рис. 6. Характер изменения угловой скорости вращения ролика за период ультразвуковых колебаний при попутном (а) и встречном (б) его взаимодействии с подвижным основанием: 1 и 2 – изменение угловой скорости вращения ролика за время его контакта с подвижным основанием под действием вращающих моментов M_1 и M_2 соответственно; 3 – изменение результирующей угловой скорости вращения ролика за время его контакта с основанием

Отмеченные положения остаются справедливыми для трактования механизма влияния ультразвуковых колебаний на угловую скорость вращения ролика при его встречном взаимодействии с подвижным основанием (см. рис. 6, б). Отличие от предыдущего случая заключается в том, что при встречном взаимодействии ($0 < \alpha < -\frac{\pi}{2}$) вращение ролика происходит

под действием двух вращающих моментов M_1 и M_2 , направленных в одну сторону. Тогда под действием момента M_1 угловая скорость вращения ролика за время его контакта с поверхностью движущегося основания изменяется по зависимости (1), а под действием момента M_2 – по зависимости (2). В результате их сложения результирующее значение угловой скорости вращения ролика за время его контакта с подвижным основанием будет изменяться по зависимости (3). Отсюда следует, что при встречном взаимодействии колеблющегося ролика с подвижным основанием при всех значениях угла α в указанном диапазоне направление вращения ролика не изменяется, а его угловая скорость оказывается выше по сравнению с ее значением, соответствующим $\alpha = 0$.

Так, в частности, при $\alpha = -\frac{\pi}{4}$ угловая скорость вращения ролика в 2 раза превышает ее значение, когда колебания вводятся вдоль вертикальной оси ($\alpha = 0$).

Таким образом, полученные в ходе данных исследований результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы.

1. Предложена математическая модель процесса контактного взаимодействия ролика с жестким подвижным основанием при сообщении ролику ультразвуковых колебаний, направленных под углом к вертикальной оси, позволяющая исследовать влияние угла введения колебаний и их интенсивности на силовые, временные и скоростные параметры этого процесса.

2. С использованием этой модели получена аналитическая зависимость для расчета угловой скорости вращения ролика при ультразвуковом воздействии в зависимости от угла введения колебаний, их интенсивности, статической нагрузки, скорости движения основания, массы и радиуса ролика при условии сохранения виброударного режима взаимодействия ролика с поверхностью подвижного основания.

3. Установлено, что при сообщении ролику ультразвуковых колебаний вдоль вертикальной оси ($\alpha = 0$), обеспечивающих виброударный режим его взаимодействия с подвижным основанием, угловая скорость вращения ролика во всех случаях будет меньше ее значения, соответствующего его качению в обычных условиях с сохранением неизменного направления вращения. При этом показано, что степень этого снижения возрастает с повышением интенсивности виброударного режима работы акустической колебательной системы за счет увеличения амплитуды колебаний, уменьшения статической нагрузки и скорости движения основания.

4. Показано, что при прочих равных условиях степень влияния ультразвуковых колебаний на изменение угловой скорости вращения ролика, в первую очередь, определяется направлением изменения угла α их введения относительно вертикальной оси. В том случае, когда тангенциальная составляющая колебательных смещений поверхности ролика за время его контакта с поверхностью основания совпадает с направлением перемещения последней, имеет место их попутное взаимодействие ($\alpha > 0$). Если $\alpha < 0$, то направление действия указанных параметров является противоположным и реализуются условия встречного взаимодействия ролика с подвижным основанием.

5. На основе анализа действующих на ролик вращающих моментов за время

его контакта с подвижным основанием представлен механизм влияния ультразвуковых колебаний на характер изменения угловой скорости вращения ролика при его попутном и встречном взаимодействии с поверхностью основания:

– показано, что при попутном взаимодействии на ролик за время его контактирования с поверхностью подвижного основания действуют два противоположно направленных вращающих момента. Поэтому как направление вращения ролика, так и значение его угловой скорости за время его контактирования с поверхностью основания определяется соотношением этих моментов, которое, в свою очередь, зависит от угла α . Так, по мере его увеличения в пределах $0 < \alpha < -\frac{\pi}{2}$, угловая скорость вращения

ролика снижается по сравнению с ее значением, когда колебания сообщаются ему вдоль вертикальной оси ($\alpha = 0$). Если $\alpha = -\frac{\pi}{4}$, то вращение ролика отсутствует в силу равенства нулю суммы действующих на него вращающих моментов.

При $\alpha > \frac{\pi}{4}$ направление вращения ролика изменяется на противоположное и его угловая скорость возрастает по мере увеличения угла α вплоть до его значения, при котором сохраняется виброударный режим взаимодействия ролика с подвижным основанием, т. е. до $\alpha < \frac{\pi}{2}$;

– показано, что при встречном взаимодействии на ролик за время его контактирования с поверхностью подвижного основания также действуют два вращающих момента, но направленных в одну сторону, соотношение между которыми определяется значениями угла α . Поэтому во всем интервале его значений $0 > \alpha > -\frac{\pi}{2}$ направление вращения ролика не изменяется и совпадает с направлением

его вращения при введении ультразвуковых колебаний вдоль вертикальной оси ($\alpha = 0$). При этом по мере изменения угла α от нуля в сторону $-\frac{\pi}{2}$

угловая скорость вращения ролика постоянно возрастает по сравнению с ее значением при $\alpha = 0$ и эта закономерность сохраняется до значения угла α , при котором имеет место виброударный режим взаимодействия ролика с подвижным основанием ($\alpha > -\frac{\pi}{2}$).

6. Теоретически обосновано, что путем сообщения накатному ролику (деформирующему инструменту) ультразвуковых колебаний становится возможным за счет изменения направления их введения и интенсивности целенаправленно и в широком диапазоне влиять на условия его контактного взаимодействия с обрабатываемой поверхностью, включая управление как угловой скоростью вращения накатного ролика, так и его направлением.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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.** Ультразвук в поверхностной обработке материалов / М. Г. Киселев, В. Т. Минченя, В. А. Ибрагимов ; под ред. М. Г. Киселева. – Минск : Тесей, 2001. – 344 с.
5. **Киселев, М. Г.** Экспериментальное определение зависимости скоростного натяга в виброударной акустической колебательной системе от частоты вращения ультразвуковых преобразователей / М. Г. Киселев, А. А. Новиков // Вестн. ГГТУ им. П. О. Сухого. – 2006. – № 3. – С. 3–10.

Белорусский национальный технический университет
Материал поступил 20.12.2008

**M. G. Kiselev, A. V. Drozdov,
V. L. Habets, A. A. Stoliarov**
**Influence of ultrasonic oscillation imparted
to knurling tool on-the-miter on the conditions
of its contact interaction with mobile base**

In this article the authors introduce simulator of contact interaction of the knurling tool with hard mobile base while impacting on the tool with ultrasonic oscillation on-the-miter to the pintle. This allows investigating the influence of the angle of entry and intensity of ultrasound on power, temporal and speeding parameters of the process. The authors discover analytic dependence which allows calculating angular velocity of the roller under the impact of ultrasound depending on the angle of entry and intensity of oscillation, static load, velocity of the base, mass and radius of the roller while conserving vibroimpact mode of interaction of the roller and the surface of the mobile base. The authors introduce the mechanism of the impact of ultrasonic oscillation on the behavior of angular velocity of the roller during its forward and backward interaction with the surface of the mobile base. The authors show that by means of ultrasonic excitation of the knurling tool (due to varying the angle of entry and intensity of the oscillation) it is possible to widely affect the conditions of its contact interaction with work surface, including angular velocity and sign of rotation of the roller.