

УДК 621.9.048.4

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ
ИЗМЕНЕНИЯ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ТЕЛА КАЧЕНИЯ
ПРИ ЕГО ВИБРОУДАРНОМ КОСОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С УПРУГИМ ОСНОВАНИЕМ**

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

Проводится теоретическое исследование траектории движения накатного ролика, установленного на выходном торце акустической колебательной системы, при взаимодействии с упругим основанием для различных углов ее наклона. Анализ полученных форм траекторий позволил выявить характер изменения угловой скорости вращения накатного ролика в зависимости от уровня статической нагрузки на него, а также угла наклона акустической колебательной системы.

Операция шаржирования широко применяется при производстве различного доводочного и притирочного инструмента, в частности доводочных и притирочных плит и планшайб, ограночных и распиловочных дисков. В результате ее выполнения рабочие поверхности этих инструментов приобретают режущие свойства, обеспечивающие прецизионную обработку деталей, изготовленных из самых различных материалов, включая монокристаллы алмаза. В настоящее время распространение получили две основные технологические схемы шаржирования: втирание абразивных (алмазных) зерен в поверхность инструмента плоской вращающейся шайбой и их вдавливание в нее телом качения, в частности накатным роликом. Взаимодействие контактирующих поверхностей в первом случае протекает в условиях трения скольжения, а во втором – в условиях трения качения с проскальзыванием, что приводит к различию условий и механизмов внедрения и закрепления твердых абразивных частиц в шаржируемую поверхность.

В работе [1] проанализированы традиционные схемы шаржирования и показано, что в силу особенностей кинематики втирание плоским инструментом значительно снижает вероятность гарантированного «втягивания» (доставки) абразивных частиц в зону шаржирования по сравнению с применением в качестве деформирующего инструмента накатного ролика. Кроме того, в работе [2] показано, что в случае использования ультразвуковых колебаний, обеспечивающих реализацию движения качения с проскальзыванием накатного ролика, вероятность успешного затягивания абразивной частицы в зону обработки существенно возрастает, а доминирующее влияние на обеспечение этого требования оказывают кинематические условия контактного взаимодействия накатного ролика с обрабатываемой поверхностью (скорость его проскальзывания). В этой связи целью данной работы явилось теоретическое исследование влияния направления и интенсивности ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику, на условия его кинетического взаимодействия с шаржируемой поверхностью.

Для достижения поставленной цели необходимо прежде всего теоретически исследовать характер движения точек деформирующего инструмента при его взаимодействии с шаржируемым основанием в условиях ультразвукового воздействия, технологическая схема которого представлена на рисунке 1.

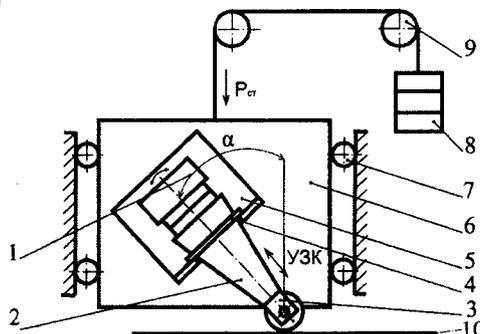


Рис. 1. Технологическая схема шаржирования с применением ультразвуковой колебательной системы, наклоненной под углом α к обрабатываемой поверхности:

- 1 – акустическая укаточная головка; 2 – конический концентратор; 3 – вилка с накатным роликом;
4 – фланец; 5 – угловой кронштейн; 6 – подвижная плита; 7 – шариковые направляющие;
8 – сменные аттестованные грузы; 9 – трособлочная система; 10 – шаржируемая поверхность

Примечание. Положительное значение отчета угла α условно принято за поворот колебательной системы против часовой стрелки, нулевое значение угла поворота соответствует положению колебательной системы перпендикулярно основанию.

Благодаря наклону акустической колебательной системы на угол α относительно вертикали к обрабатываемой поверхности вынуждающую ультразвуковую силу $F_{\text{узк}}(t)$ можно разбить на две составляющие: горизонтальную $F_z(t) = F_{\text{узк}}(t)\sin\alpha$, которая обеспечивает возвратно-поступательное перемещение деформирующего инструмента вдоль шаржируемой поверхности, и вертикальную $F_d(t) = F_{\text{узк}}(t)\cos\alpha$, ответственную за внедрение деформирующего инструмента в заготовку.

$$F_{\text{узк}}(t) = A_0\omega^2 m \cos(\omega_{\text{узк}}t),$$

где A_0 – амплитуда ультразвуковых колебаний; $\omega_{\text{узк}} = 2\pi f$ – круговая частота ультразвуковых колебаний (f – частота ультразвуковых колебаний); m – масса деформирующего инструмента.

Для теоретического исследования характера данного внедрения обратимся к расчетной схеме, приведенной на рисунке 2.

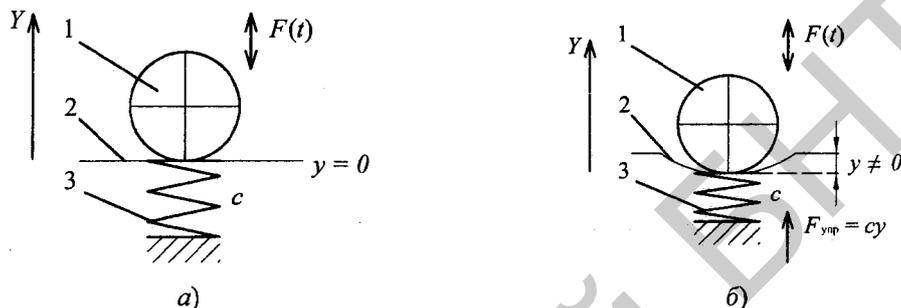


Рис. 2. Схема, использовавшаяся в математической модели для расчета перемещения точек деформирующего инструмента относительно обрабатываемой поверхности:

а – начальное положение взаимодействующих тел;

б – положение тел при внедрении деформирующего инструмента в шаржируемую поверхность

В данном случае с целью оценки характера взаимодействия деформирующего инструмента и шаржируемой поверхности воспользуемся принципом, предложенным в работе [3], и разместим между взаимодействующими телами пружину жесткостью c таким образом, чтобы в момент начального контакта деформирующего инструмента и поверхности заготовки данная пружина находилась в свободном (недеформированном) состоянии (рис. 2, а). Ось Y направим вертикально вверх, а для учета действующей статической силы нагружения акустической колебательной системы начало координат оси совместим с положением поверхности основания при ее деформации только под действием этой силы. При этом деформирующий инструмент заменим абсолютно жестким шаром 1, который за счет действия гармонической вынуждающей силы $F_b(t) = F_{\text{узк}}(t)\cos\alpha$ внедряется в шаржируемую поверхность 2, сжимая при этом пружину 3 на глубину своего внедрения (рис. 2, б).

Представленная схема моделирует систему с одной степенью свободы, которая совершает колебания под действием вынуждающей силы $F_b(t)$. В любой момент времени на шар массой m действуют две силы: сила упругости пружины, пропорциональная величине внедрения деформирующего инструмента в заготовку y , и возмущающая сила $F_b(t) = F_{\text{узк}}(t)\cos\alpha$.

Дифференциальное уравнение движения груза:

$$m\ddot{y} + cy = F_b(t),$$

или

$$\ddot{y} + \omega^2 y = \frac{F_b(t)}{m},$$

где $\omega = \sqrt{\frac{c}{m}}$ – собственная частота колебаний рассматриваемой системы; c – жесткость основания, Н/м.

В работе [4] приведено аналитическое решение указанного дифференциального уравнения, которое при нулевых начальных условиях выражается формулой

$$y(\tau) = \frac{1}{m\omega} \int_0^\tau F_b(t) \sin[\omega(\tau-t)] dt, \quad (1)$$

где τ – момент времени, в который необходимо определить перемещение y .

На рисунке 3 показано изменение координаты y за период T ультразвуковых колебаний с шагом $T/1000$.

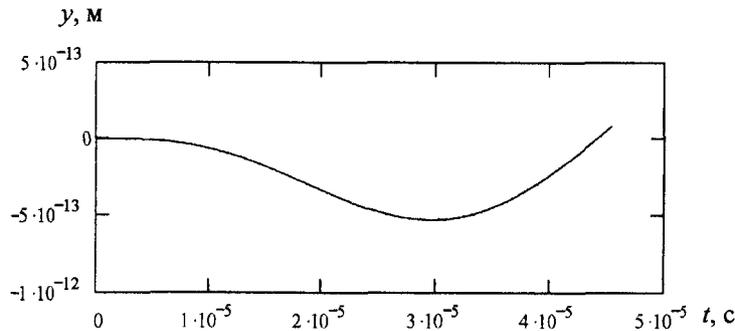


Рис. 3. Расчетное изменение глубины внедрения деформирующего инструмента в шаржируемую поверхность за один период ультразвуковых колебаний ($A_0 = 20$ мкм; $f = 22$ кГц; $c = 2,4 \cdot 10^7$ Н/м; $m = 0,005$ кг; $\alpha = 10^\circ$)

Видно, что за счет действия пружины скорость внедрения шарика в основание значительно ниже скорости его возврата к первоначальному положению, с переходом координаты Y положения тела в область положительных значений. С учетом того, что кроме вертикальных перемещений шарика под действием силы $F_z(t) = F_{узк}(t)\sin\alpha$ происходит возвратно-поступательное перемещение шарика вдоль основания, можно получить результирующую траекторию движения точек деформирующего инструмента относительно заготовки при различных углах ввода ультразвуковых колебаний в зону шаржирования (рис. 4).

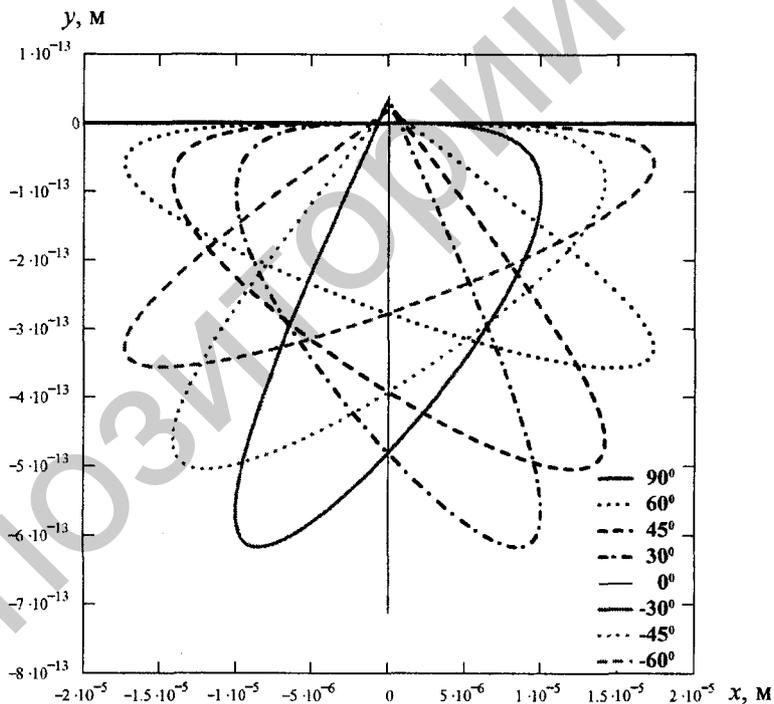


Рис. 4. Расчетные формы траекторий движения точек деформирующего инструмента при его взаимодействии с основанием заготовки при различных углах подачи ультразвуковых колебаний на деформирующий инструмент

Указанные на рисунке 4 траектории были получены в программной среде *MathCAD* путем символьного решения уравнения (1), определяющего координату y вертикального перемещения деформирующего инструмента, а также вычисления координаты x его горизонтального перемещения, задаваемого уравнением

$$x(t) = F_{узк}(t)\sin\alpha \quad (2)$$

для углов α , лежащих в диапазоне от -90 до $+90^\circ$ с шагом в 1° . При этом координаты x и y хранились в виде отдельных матриц, соединение которых на графике давало представление о результирующей траектории движения деформирующего инструмента при заданном наклоне акустической колебательной системы.

Из рисунка 4 видно, что с увеличением угла α отклонения акустической колебательной системы от вертикали происходит вытягивание по горизонтали и сужение по вертикали результирующей траектории движения деформирующего инструмента, что связано с соответствующим изменением составляющих $F_x(t)$ и $F_y(t)$ вынуждающей силы. При этом в предельных случаях (при $\alpha = 0^\circ$ и $\alpha = 90^\circ$) траектория движения деформирующего инструмента вырождается в прямую линию, направленную, соответственно, перпендикулярно и параллельно поверхности основания. При отрицательных значениях угла наклона акустической колебательной системы, что соответствует ее зеркальному отображению на рисунке 1, происходит зеркальное отображение получаемой траектории движения, как, например, при $\alpha = 45$ и -45° .

При этом скорость вращения ролика будет определяться расстоянием, пройденным им вдоль обрабатываемой поверхности, т.е. изменением координаты x в течение одного периода ультразвуковых колебаний за время прохождения данного расстояния. Учитывая, что полученная форма траекторий напоминает искаженный незамкнутый эллипс, часть точек которого имеют положительные координаты y , это означает, что происходит отрыв деформирующего инструмента от основания, т.е. реализуется виброударный режим работы акустической колебательной системы. В этот момент вращение ролика за счет сил сцепления с основанием прекращается, что влияет на конечную скорость деформирующего инструмента. Для определения момента $t_{\text{отр}}$ отрыва ролика от основания в среде MathCAD был составлен программный код, в котором производилась проверка условия

$$y(t_{\text{отр}}) > 0. \quad (3)$$

В нем также определялась угловая скорость вращения деформирующего инструмента по формуле

$$\omega_{\text{ди}} = f(x_0 - x_{\text{отр}}) / R, \quad (4)$$

где x_0 – горизонтальная координата деформирующего инструмента в начальный момент времени ($x_0 = 0$); $x_{\text{отр}}$ – горизонтальная координата деформирующего инструмента в момент времени отрыва ($t_{\text{отр}}$) ролика от основания; R – радиус деформирующего инструмента.

На рисунке 5 показано изменение скорости вращения деформирующего инструмента в зависимости от угла наклона α акустической колебательной системы.

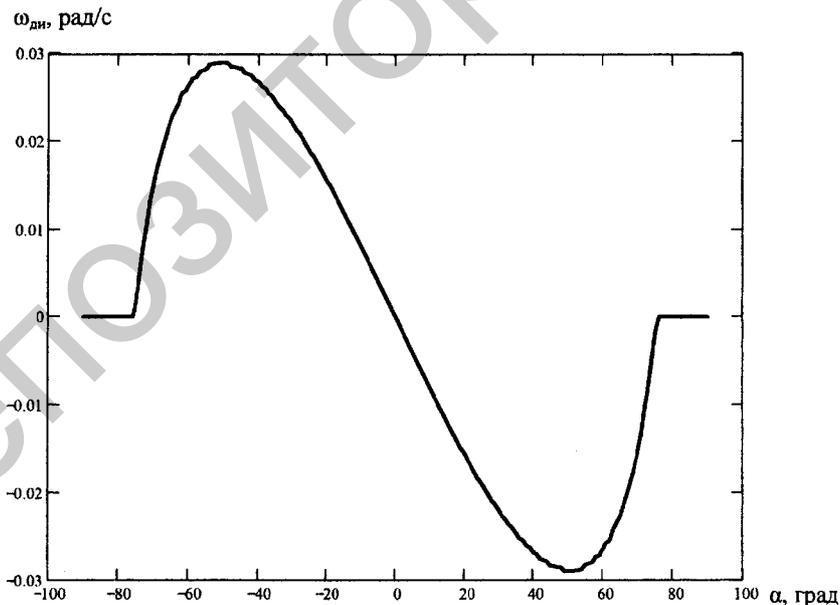


Рис. 5. Рассчитанная зависимость угловой скорости вращения накатного ролика, установленного на выходном торце концентратора акустической колебательной системы, от угла ее вертикального отклонения ($A_0 = 20$ мкм; $f = 22$ кГц; $c = 2,4 \cdot 10^7$ Н/м; $m = 0,005$ кг; $P_{\text{ст}}/c = 0,1 \cdot 10^{-13}$ м); $P_{\text{ст}}$ – статическая нагрузка на деформирующий инструмент, Н

Из представленных данных видно, что изменение угла наклона акустической колебательной системы приводит к изменению скорости вращения деформирующего инструмента. Так, при углах наклона, близких к $\pm 90^\circ$, на графике присутствуют горизонтальные участки с незначительно уменьшающейся ($\alpha < 0^\circ$) или увеличивающейся ($\alpha > 0^\circ$) скоростью вращения. Данный участок (на рисунке 5 шириной в 14°) соот-

ветствует безударному взаимодействию накатного ролика с поверхностью основания, поскольку вертикальная составляющая траектории движения деформирующего инструмента мала. По мере подъема акустической колебательной системы и приближения ее к вертикальному положению характер изменения скорости вращения накатного ролика существенно меняется. В диапазоне углов α от -76° и до -51° (рис. 5) происходит интенсивное увеличение скорости вращения деформирующего инструмента. Это связано с ростом вертикальной составляющей $F_v(t)$ вынуждающей силы, что приводит к более интенсивной деформации поверхности основания в первый период ультразвуковых колебаний, обеспечивающей затем стремительный возврат внедренного ролика к начальному положению и переход его по инерции в виброударный режим. При этом в данном диапазоне углов сохраняется значительное горизонтальное перемещение деформирующего инструмента, которое с приближением угла α к 0° снижается, вызывая закономерное снижение скорости вращения ролика. При $\alpha = 0^\circ$ горизонтальное перемещение ролика отсутствует (рис. 4), что приводит к остановке вращения деформирующего инструмента. Дальнейшее увеличение угла поворота (при $\alpha > 0^\circ$) приводит к симметричному отражению зависимости, обеспечивая тем самым вращение накатного ролика, но только уже в противоположном направлении.

По мере увеличения статической нагрузки происходит расширение горизонтального участка кривой изменения скорости вращения деформирующего инструмента (рис. 5). Угол, при котором достигается максимальная скорость вращения ролика, приближается к нулю (вертикальному положению акустической колебательной системы). Последующий спад скорости вращения деформирующего инструмента происходит более интенсивно, а максимальная скорость вращения ролика уменьшается (рис. 6).



Рис. 6. Изменение скорости вращения деформирующего инструмента (направление оси Z) в зависимости от угла поворота акустической колебательной системы (направление оси X) и от уровня статической нагрузки (направление оси Y)

Выводы:

1) предложена расчетная схема взаимодействия деформирующего инструмента, моделируемого в виде абсолютно жесткого шара поверхностью упругого основания, которая позволила определить изменение глубины внедрения деформирующего инструмента за период подаваемых на него ультразвуковых колебаний;

2) показано, что результирующая траектория движения точек деформирующего инструмента при различных углах подачи ультразвуковых колебаний относительно основания определяется ее жесткостью и по форме напоминает искаженный незамкнутый эллипс, часть точек которого находится выше основания, обеспечивая отрыв деформирующего инструмента, т.е. реализуя виброударный режим работы акустической колебательной системы;

3) учитывая, что угловая скорость вращения ролика определяется расстоянием, пройденным им вдоль обрабатываемой поверхности, составлен программный код, позволяющий определить скорость вращения деформирующего инструмента в зависимости от уровня статической нагрузки на него, а также от угла наклона акустической колебательной системы;

4) на основании анализа полученных данных установлено, что изменение угла наклона акустической колебательной системы в диапазоне от 90 до 85° не вызывает вращения деформирующего инструмента, что соответствует его безотрывному взаимодействию с основанием. Наклон акустической колебательной системы от 75° и до -50° относительно вертикали инициирует интенсивное увеличение скорости вращения деформирующего инструмента, вызванное интенсивной деформацией поверхности основания

и возникновением интенсивного виброударного режима взаимодействия. Дальнейший поворот акустической колебательной системы к вертикальному положению приводит к снижению горизонтального перемещения деформирующего инструмента, а соответственно и скорости его вращения;

5) увеличение статической нагрузки на деформирующий инструмент приводит к расширению диапазона углов безотрывного взаимодействия накатного ролика с основанием, а также снижению диапазона углов наклона, при которых обеспечивается нарастание скорости вращения деформирующего инструмента, уменьшая ее максимальную величину;

6) показано, что уровень виброударного взаимодействия упругого основания и деформирующего инструмента, регулируемый за счет наклона акустической колебательной системы, определяет его угловую скорость вращения. Причем для реализации движения качения с проскальзыванием деформирующего инструмента необходима незначительная статическая нагрузка на него, что позволяет легче реализовать виброударный режим взаимодействия с упругим основанием, при этом угол наклона акустической колебательной системы должен составлять порядка 40...50° от вертикали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Сагарда, А.А. Анализ схем шаржирования / А.А. Сагарда, В.В. Маковецкий // Сверхтвердые материалы. – 1982. – № 4. – С. 59 – 66.
2. Киселев, М.Г. Теоретическая оценка влияния ультразвуковых колебаний, сообщаемых накатному ролику в процессе шаржирования поверхности, на условия попадания абразивного зерна в зону обработки / М.Г. Киселев, А.В. Дроздов, В.Л. Габец // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Серия В. Промышленность. Прикладные науки». – 2011. – № 11. – С. 70 – 77.
3. Даламбер, Ж. Динамика / Ж. Даламбер; пер. с франц. – М.-Л.: Гос. изд-во техн. теор. лит., 1950. – 343 с.
4. Сурьянинов, Н.Г. Теоретические основы динамики машин: учеб. пособие / Н.Г. Сурьянинов, А.Ф. Дашенко, П.А. Белоус. – Одесса: ОГПУ, 2000. – 306 с.

Поступила 22.06.2012

THEORETICAL RESEARCH OF THE ROLLING BODY SPEED CHANGE UNDER ITS VIBROIMPACT SLANTING INTERACTION WITH THE ELASTIC BASIS

M. KISELEV, A. DROZDOV

Theoretical research of a roller movement trajectory installed on an acoustic oscillatory system output face at interaction with the elastic basis for various corners of its slope is carried out. The analysis of the received trajectory forms allowed to reveal the character of the angular roller rotation speed change depending on the level of static loading on it, and also the angle of elevation of the acoustic oscillatory system slope.