

## ДИНАМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА ТРЕНИЯ В УЛЬТРАЗВУКОВОМ РЕЗЬБОВОМ КОНТАКТЕ

© 2011 С.Я. Березин, В.Н. Леонов, И.М. Кулеш

Читинский государственный университет

Поступила в редакцию 09.03.2011

В статье рассматривается механизм влияния ультразвуковых колебаний на процесс контактного трения. Установлен характер изменения параметров трения в соответствии со значениями результирующей скорости скольжения, амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний. Получена математическая модель динамического коэффициента трения в скользящем ультразвуковом контакте.

Ключевые слова: *ультразвуковые колебания, сборка резьбовых соединений, трение*

Энергия мощного ультразвука используется во многих технологических операциях, связанных с обработкой резьбовых поверхностей выдавливанием, сборкой соединений с натягом, затяжкой резьбы и т. д. Во многих подобных случаях процесс связан со значительными силами трения, которые изменяются при наличии ультразвуковых колебаний (УЗК). В настоящее время известно немного попыток описать действующие механизмы и представить их математические модели, помогающие пониманию сути процессов, происходящих в ультразвуковом скользящем контакте. Механизм воздействия ультразвуковых колебаний на контактное трение обусловлен изменением кинематики скольжения на контактной поверхности, характера взаимодействия контактируемых поверхностей и эффективности действия смазок [1]. Взаимодействие пульсирующих поверхностей сопровождается трением между микронеровностями, в результате чего выделяется тепло. Нагрев микровыступов приводит к уменьшению напряжений, необходимых для их смятия или сдвига. При наличии смазки снижение сил контактного трения происходит не только за счет сил экранирующего и нивелирующего действия смазки, но и путем пластифицирования поверхностного слоя обрабатываемого металла вследствие расклинивающего действия смазки и адсорбционного эффекта понижения прочности [1]. Ультразвуковые колебания могут активизировать химические, в том числе и окислительные реакции на контактных поверхностях [5], увеличивать проникающую способность смазок и создавать

кавитационные полости в среде СОЖ. Знакопеременный характер давлений в таких плоскостях приводит к образованию кавитационных пузырьков и их схлопыванию, что может создавать ударные гидродинамические волны с давлением до 100 МПа [2]. Интенсивные акустические течения улучшают смазывающую способность СОЖ и снижают силы трения. Указанные возможности ультразвука позволяют надеяться на положительный эффект при различных технологических процессах, в том числе и при сборке резьбовых соединений с резьбообразующими крепежными деталями.

С другой стороны, снижение сил трения в нестационарных процессах связывают с проявлением «скоростной» зависимости коэффициента трения [3]

$$f(\hat{V}) = \frac{f_0}{1 + a\hat{V}}, \quad (1)$$

где  $f_0$  – коэффициент трения покоя;  $a$  – константа;  $\hat{V}$  – переменная скорость относительного скольжения.

В условиях УЗК относительная скорость скольжения всегда выше стационарной. Тогда, в соответствии с данными работы [4], коэффициент трения в определенном диапазоне скоростей имеет тенденцию к понижению, в силу соотношения

$$f_B = \frac{T_0}{N} = \sqrt{f_0^2 - B \frac{A^2 \omega^2}{V^2 + A^2 \omega^2}}, \quad (2)$$

где  $T_0$  – единичная тангенциальная сила сопротивления без вибраций;  $N$  – нормально действующая сила;  $f_0$  – стационарный коэффициент трения;  $B$  – коэффициент;  $A$  – амплитуда УЗК;  $V$  – стационарная скорость;  $\omega$  – круговая частота вибраций.

*Березин Сергей Яковлевич, доктор технических наук, профессор. E-mail: Verlog-berezin2011@mail.ru*  
*Леонов Владимир Николаевич, кандидат технических наук, доцент. E-mail: leochit@gmail.com*  
*Кулеш Ирина Михайловна, аспирантка*

Уточненная характеристика трения представляется в виде суммы характеристик сухого и (линейного и нелинейного) вязкого трения [6]

$$F = N(f_1 \text{sign} \dot{x} - f_2 \dot{x} + f_3 \dot{x}^3), \quad (3)$$

где  $N$  – нормальная реакция;  $f_1, f_2, f_3$  – постоянные коэффициенты соответственно сухого, линейного и нелинейного вязкого трения.

В данном уравнении члены, пропорциональные скорости  $\dot{x}(t)$  представляют собой первые члены разложения гладкой функции вязкого трения в ряд Маклорена. Такая характеристика называется разрывной характеристикой некулонова трения, которая при некотором значении положительного или отрицательного направления скорости проходит через минимум характеристики. Во всех трех формулах (1, 2, 3) наблюдается снижение сил трения при росте колебательной скорости. Для определения условий трения в резьбовом витке, совершающем ультразвуковые колебания, рассмотрим работу резьбового витка, представленного кольцом, на которое с двух сторон действуют элементарные тела  $n$ , сжимая кольцо. Тела  $n$  имитируют охватывающие витки корпуса в плотном резьбовом контакте (рис. 1).

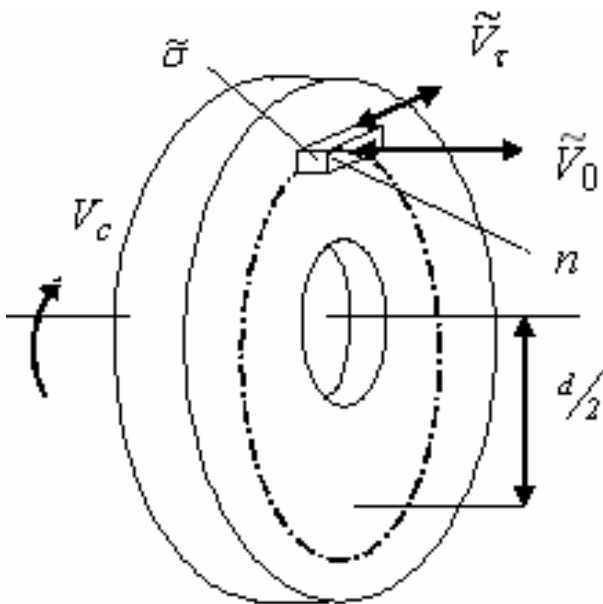


Рис. 1. Модель резьбового соединения

На поверхности его начинают действовать давления  $\tilde{\sigma}$ . Кольцо вращается со скоростью, тангенциальный вектор которой представлен величиной  $V_c$ . В случае прикладывания к телам  $n$  ультразвуковых колебаний, тела

могут передавать кольцу осевые  $\tilde{V}_0$  и тангенциальные  $\tilde{V}_\tau$  колебания, изменяя стационарный режим его вращения. Диаметр, на котором тела  $n$  прижимаются к кольцу, равен  $d$ . В стационарном режиме крутящий момент, необходимый для преодоления сил трения равен

$$M = 2\sigma \cdot F_k \cdot f \frac{d}{2},$$

где  $F_k$  – односторонняя площадь контакта;  $f$  – коэффициент трения.

При наличии обоих векторов УЗК, осевых  $\tilde{V}_0$  и тангенциальных  $\tilde{V}_\tau$ , суммарная скорость скольжения элементарной точки боковой поверхности контакта будет формироваться следующим образом. При условии, что  $V_c > \tilde{V}$ , где  $\tilde{V} = \sqrt{\tilde{V}_0^2 + \tilde{V}_\tau^2}$ , суммарная скорость скольжения будет определять направленность вектора  $\tilde{V}_\tau$  относительно  $V_c$ . Рассмотрим этот механизм на рис. 2. Если результирующая амплитуда УЗК подчиняется закону

$$x = A_\Sigma \cdot \sin \omega t,$$

где  $A_\Sigma$  – амплитуда;  $\omega$  – круговая частота колебаний, то колебательная скорость будет подчиняться закону

$$\dot{x} = \tilde{V} = A_\Sigma \cdot \omega \cdot \cos \omega t, \quad (4)$$

обретая максимум при величине  $\tilde{V}_{\max} = 2\pi \cdot f \cdot A_\Sigma = 2\pi \cdot f \sqrt{A_0^2 + A_\tau^2}$ , где  $A_0$  и  $A_\tau$  – амплитуды соответствующих направлений УЗК. Тогда результирующая скорость скольжения будет равна

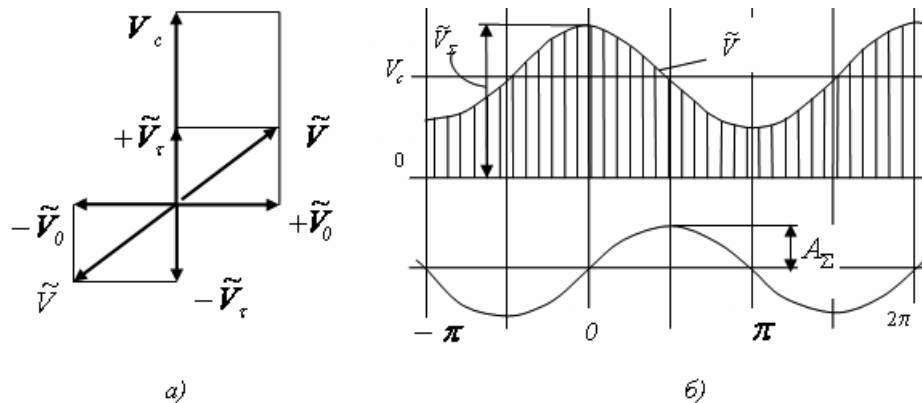
$$\tilde{V}_\Sigma = V_c + \tilde{V} \cdot \cos \omega t$$

Рассмотрим виток как элементарную массу в колебательной системе. Отбросив медленную компоненту, связанную со скоростью  $V_c$ , представим, что виток находится под действием быстрых осевых ( $A_0$ ) и тангенциальных ( $A_\tau$ ) УЗК. Тогда его поведение можно описать следующей системой дифференциальных уравнений

$$\begin{cases} m\ddot{x} + cx = \tilde{Q} \cdot \sin \omega t \\ J\ddot{\phi} + g\dot{\phi} = \tilde{M} \cdot \sin \omega t, \end{cases} \quad (5)$$

где  $m$  – масса витка;  $c$  – жесткость упругого реологического контакта поверхностей витка и тела  $n$ ;  $x$  – осевая координата;  $\mathcal{G}$  – коэффициент вязкого сопротивления;  $\tilde{Q}$  – возмущающая

осевая сила;  $J$  – момент инерции витка;  $\varphi$  – круговая координата;  $\tilde{M}$  – возмущающий крутящий момент.



**Рис. 2.** Формирование суммарной скорости скольжения: а) векторная схема; б) форма колебательного процесса

Для получения возмущающей силы возьмем значение интенсивности УЗК:

$$\tilde{Q} = \frac{J}{V_k} \cdot F_k = \frac{\rho \cdot C_y}{2V_k} \omega^2 A^2 F_k, \quad (6)$$

где  $\rho$  – плотность материала;  $C_y$  – скорость ультразвука в материале. Подставив в формулу (6) среднее значение колебательной скорости  $\bar{V}_k = 4\omega \cdot A$ , получим

$$\tilde{Q} = \frac{\rho \cdot C_y}{8} \omega \cdot A \cdot F_k$$

Учитывая то, что возмущающая сила обеспечивается осевыми колебаниями, а возмущающий момент – тангенциальными, а также то, что  $A_r$  формируются особой формой УЗ преобразователя, можно установить значение  $\tilde{M}$

$$\tilde{M} = \tilde{Q} \cdot d/2 \cdot k \cdot \eta$$

где  $k$  – коэффициент преобразования, равный примерно тангенсу угла наклона разделяющих пазов волновода;  $\eta$  – КПД преобразования (потери по амплитуде). Приведем систему (5) к следующей форме

$$\begin{cases} \ddot{x} + c/m \cdot x = \tilde{Q}/m \cdot \sin \omega t \\ \ddot{\phi} + \mathcal{G}/J \cdot \dot{\phi} = \tilde{M}/J \cdot \sin \omega t. \end{cases} \quad (7)$$

Решая систему (7) относительно значения жесткости, имеем  $c = \frac{\tilde{Q} \cdot \sin \omega t}{x} + m\omega^2$ , или в пре-

дельном случае при  $x \approx A$ ,  $c = \frac{\tilde{Q}}{A} + m\omega^2$ . Тогда величина нормального напряжения в условиях упругого контакта может быть представлена в форме линейной характеристики

$$\bar{\sigma} = \frac{\tilde{n} \cdot A}{F_k} = \frac{\rho \cdot C_y}{8} \omega \cdot A + \frac{m \cdot \omega^2 A}{F_k}. \quad (8)$$

Как видно из выражения (8), уровень мгновенного контактного напряжения пропорционален амплитуде и квадрату частоты. Решаем второе уравнение системы (7) аналогично первому. Для этого перепишем его в следующей форме

$$\ddot{\phi} + \gamma \dot{\phi} = \xi \cdot \sin(\omega t), \quad (9)$$

где  $\gamma = \mathcal{G}/J$  – приведенный показатель вязкого сопротивления;  $\xi = \tilde{M}/J$  – приведенный возмущающий момент. Таким же образом установим максимум колебательной скорости

$$\dot{\phi}_{\max} = \left| \frac{3\gamma}{\omega^2 + \gamma^2} \right| = \frac{\tilde{M} \cdot \mathcal{G}}{\omega^2 J^2 + \mathcal{G}^2}.$$

Отсюда получаем выражение момента вязкого сопротивления

$$d\dot{\phi}_{\max} = \frac{\tilde{M} \cdot \mathcal{G}^2}{\omega^2 J^2 + \mathcal{G}^2} = \frac{\tilde{M} + \omega^2 J A_r}{2\omega^2 J A_r / \tilde{M} + 1}.$$

Введя допущение о том, что момент вязкого сопротивления равен моменту, образованному переменным контактными давлениями на стороне витка, получим следующее выражение

$$d\dot{\phi}_{\max} = \tilde{\sigma} \cdot F_k \cdot \tilde{f} \frac{d}{2}, \quad (10)$$

где  $\tilde{f}$  - коэффициент трения в условиях УЗК;  $\tilde{\sigma}$  - контактное давление, определяемое по формуле (8);  $d$  - диаметр витка резьбы. Подставляя в формулу (10) все значения и решая его относительно коэффициента трения, получим окончательно формулу динамического коэффициента трения

$$\tilde{f} = \frac{2\tilde{M}(\tilde{M} + \omega^2 A_r J)}{\omega A \left( \frac{\rho \cdot C_y}{8} + \frac{m\omega}{F_k} \right) d \cdot F_k (\tilde{M} + 2\omega^2 A_r J)} \quad (11)$$

Из выражения (11) ясно, что коэффициент трения пропорционален квадрату частоты (числитель) и обратно пропорционален 4-й степени частоты, следовательно, с ростом частоты коэффициент трения снижает свои значения. Однако при одной и той же выходной мощности рост частоты вызывает уменьшение амплитуды колебаний, поэтому монотонной падающей характеристики коэффициента трения от частоты в реальных условиях быть не может, и она имеет более сложный характер. Численные исследования формулы (11) требуют нагрузочных характеристик выходного контура генераторных установок, поэтому для упрощения исследований, можно воспользоваться частной зависимостью коэффициента трения [5], которую можно описать выражением

$$\tilde{f}(t) = f_0 - f^* |\sin \omega t|, \quad (12)$$

где  $f_0$  - коэффициент трения покоя;  $f^*$  - постоянный коэффициент для определенных условий. Вид зависимости (12) представлен на рис. 3.

Найдя производные высших порядков функции  $\tilde{f}(t)$ , можно представить ее в виде ряда Маклорена

$$\begin{aligned} \tilde{f}(t) = & f_0 - f \cdot \omega t - f \cdot \frac{\omega^3 t^3}{3!} - \\ & - f \cdot \frac{\omega^5 t^5}{5!} - f \cdot \frac{\omega^7 t^7}{7!} - \dots \end{aligned} \quad (13)$$

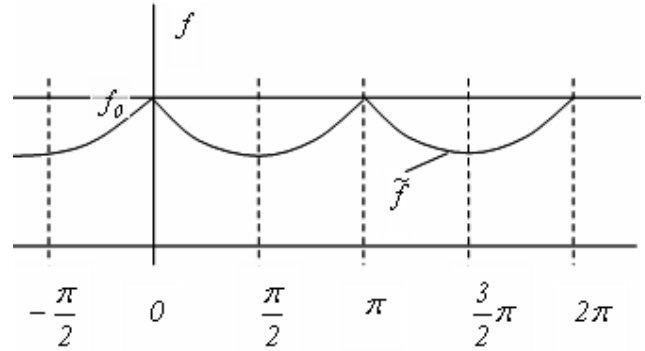


Рис. 3. Характер динамического коэффициента трения

Проинтегрировав функцию  $\tilde{f}(t)$ , получим

$$\begin{aligned} \tilde{f} = \int_0^{\pi/2} \tilde{f}(t) dt = & f_0 - f \omega \frac{t^2}{2} \Big|_0^{\pi/2} - f^* \omega^3 \frac{t^4}{4 \cdot 3!} \Big|_0^{\pi/2} - \\ & - f^* \omega^5 \frac{t^6}{6 \cdot 5!} \Big|_0^{\pi/2} - f^* \omega^7 \frac{t^8}{8 \cdot 7!} \Big|_0^{\pi/2} - \dots \end{aligned}$$

или окончательно

$$\tilde{f}(v) = f_0 - \frac{f^*}{2v} \cdot \pi - \frac{f^*}{2v} \cdot \frac{\pi^3}{3!} - \frac{f^*}{2v} \cdot \frac{\pi^5}{5!} - \frac{f^*}{2v} \cdot \frac{\pi}{7!} \dots \quad (14)$$

где  $v$  - герцовая частота УЗК.

Таким образом, с ростом частоты  $v$  степень снижения коэффициента трения уменьшается, т. к. при этом уменьшается и период провалов  $\tilde{f}^*$ . Представив, что коэффициент  $f^*$  равен  $a \cdot v \cdot A$ , где  $a$  - константа, можно переписать выражение (14) в следующую форму

$$\tilde{f} = f_0 - \frac{a}{2} A \pi - \frac{a}{2} A \frac{\pi^3}{3!} - \frac{a}{2} A \frac{\pi^5}{5!} - \dots \quad (15)$$

Следовательно, рост амплитуды приводит к снижению динамического коэффициента трения.

**Выводы:** на основании всех полученных результатов можно установить, что в общем виде динамический коэффициент трения уменьшается с ростом колебательной скорости. Однако поскольку изменение частоты УЗК ведет к обратному процессу изменения амплитуды, то зависимость  $\tilde{f}(V_k)$  имеет неоднозначный характер и может проходить определенный минимум. В любом случае более точные характеристики трения лучше определять экспериментально для подтверждения теоретических выкладок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Северденко, В.П. Влияние ультразвука на контактное трение при прокатке / В.П. Северденко, А.В. Степаненко, И.Я. Заяи // Ультразвуковые методы интенсификации технологических процессов: сб. науч. тр. – М.; 1970. Вып. 60. С. 275-280.
2. Кулемин, А.В. Физическая модель ультразвукового воздействия на процессы в металлах и сплавах в твердом состоянии // Тез. докладов 5 Всесоюзной научно-технической конференции по ультразвуковым методам интенсификации технологических производств. – М.: МИСИС, 1983. С. 4-5.
3. Юнин, Е.К. Загадки и парадоксы сухого трения. – М.: Книжный дом «Либроком», 2009. 128 с.
4. Суворов, А.А. Влияние низкочастотных вибраций на коэффициент трения / А.А. Суворов, А.А. Барзов, В.Н. Старченко // Изв. вузов. Машиностроение. 1978. № 2. С. 186-188.
5. Березин, С.Я. Ультразвук в процессах резвообразования и сборки: Монография / С.Я. Березин. – Чита: ЧитГУ, 2009. 166 с.
6. Пановко, Г.Я. Лекции по основам теории вибрационных машин и технологий / Г.Я. Пановко. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 192 с.

**DYNAMIC FEATURES OF FRICTION PROCESS  
IN ULTRASONIC CARVING CONTACT**

© 2011 S.Ya. Berezin, V.N. Leonov, I.M. Kulesh

Chita State University

In article the mechanism of ultrasonic fluctuations influence on process of contact friction is considered. Character of friction parameters change according to values of resultant sliding speed, amplitude and frequency of ultrasonic fluctuations is established. The mathematical model of friction dynamic coefficient in sliding ultrasonic contact is received.

Key words: *ultrasonic fluctuations, assemblage of carving connections, friction*