

УДК 621

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ВОЛОКИ НА ПРОЦЕСС ВОЛОЧЕНИЯ

© Владимир Константинович Асташев, Елена Борисовна Семенова

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки  
Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН

[v\\_astashev@mai.ru](mailto:v_astashev@mai.ru)

**Аннотация.** Предлагается и исследуется модель взаимодействия волокна и изделия (проволока или прутки) в процессе ультразвукового волочения. При описании силы трения между коническими поверхностями волокна и заготовки учитывается тангенциальная упругая податливость деформируемого материала заготовки. Результаты анализа объясняют многократно наблюдаемые в экспериментах эффекты снижения силы волочения при ультразвуковой вибрации волокна.

**Ключевые слова:** волочение, упругость, податливость, пластичность, трение, колебания, амплитуда, частота, сила, скорость.

В технологическом процессе ультразвукового волочения (рис.1) волоку 1 сообщаются высокочастотные колебания  $u^0(t) = a \sin \omega t$ , где  $a, \omega$  – амплитуда и частота колебаний, а прутку (проволоке) 2 – подача с постоянной скоростью  $v$ .

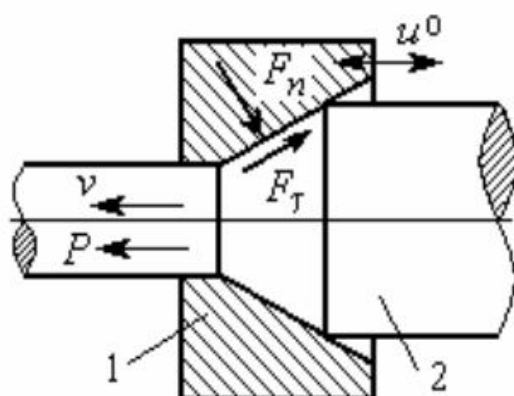


Рис. 1

Равномерное движение прутка поддерживается постоянной силой  $P$ . Колебания волокна создаются ультразвуковой колебательной системой.

Экспериментально установлено [1, 2], что наложение ультразвуковой вибрации приводит к снижению силы  $P$  волочения.

Для объяснения этого эффекта используется подход, развитый в [3, 4]. Относительно обрабатываемой заготовки волокно движется по закону

$$u(t) = vt + u^0(t) = vt + a \sin \omega t. \quad (1)$$

Смещение волокна относительно заготовки вызывает деформацию заготовки, и в зоне контакта возникают нормальная  $F_n(u, \dot{u})$  и касательная  $F_t(u, \dot{u})$  реакции. Будем считать, что нормальная сила  $F_n(u, \dot{u})$  и деформация связаны характеристикой идеального упругопластического материала, которую с учетом характера движения (1), запишем в виде (рис. 2,а)

$$F_n(u, \dot{u}) = \begin{cases} 0 & u \leq \Delta \\ K_n(u - \Delta) \sin \alpha & \Delta \leq u \leq \Delta + d \\ D_n & \Delta + d \leq u \leq u_m \\ D_n - K_n(u_m - u) \sin \alpha & u_m - d \leq u \leq u_m \\ 0 & u \leq u_m - d \end{cases} \begin{matrix} \dot{u} > 0 \\ \\ \\ \dot{u} < 0 \end{matrix}, \quad (2)$$

где  $\Delta$  – относительная координата волоки в момент начала контакта конических поверхностей;  $K_n, D_n$  – статическая жесткость в зоне контакта и сила, соответствующая пределу текучести материала;  $d = D_n / (K_n \sin \alpha)$ ;  $u_m = a \left[ \sqrt{1 - \nu^2} + \nu \arccos(-\nu) \right]$  – максимальное в течение одного периода значение функции (1);  $\nu = v/a\omega$ ;  $\alpha$  – угол образующей конической поверхности волоки с ее осевой линией. На рис. 2,а, кроме того, обозначено  $k_n = K_n \sin \alpha$ .

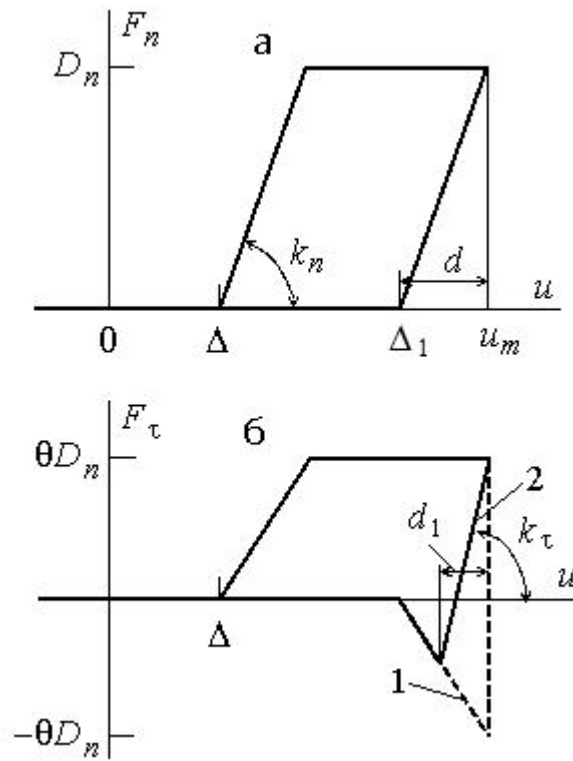


Рис. 2

Пусть контакт конических поверхностей волоки и прутка начинается в некоторый момент времени  $t = t_1$ , когда относительная координата (1) волоки

$$u(t_1) = \nu t_1 + a \sin \omega t_1 = \Delta. \quad (3)$$

В этот момент начинается упругая деформация прутка, которая заканчивается в момент  $t = t_2$  достижения предела текучести  $F_n = D_n$ , когда координата волоки окажется равной

$$u(t_2) = \nu t_2 + a \sin \omega t_2 = \Delta + d = \Delta + D_n / (K_n \sin \alpha). \quad (4)$$

Далее происходит необратимая пластическая деформация прутка в зоне контакта конических поверхностей, которая заканчивается в момент  $t = t_3 = \omega^{-1} \arccos(-\nu)$ , когда

скорость относительного движения меняет знак, а координата достигает максимального в течение одного периода значения  $u(t_3) = u_m$ . При дальнейшем движении происходит разгрузка упругой деформации, накопленной на первом участке контакта конических поверхностей. В момент  $t = t_e$  разгрузка заканчивается. В этот момент координата волокна

$$u(t_e) = vt_e + a \sin \omega t_e = \Delta_1 = u_m - d, \quad (5)$$

контакт конических поверхностей волокна и прутка прерывается, и движение волокна в отрыве от прутка продолжается до момента начала следующего взаимодействия в момент  $t = t_1 + 2\pi/\omega$  в точке с координатой  $u(t_1 + 2\pi/\omega) = \Delta_1$ . Такой процесс будет периодически повторяться с частотой  $\omega$  колебаний волокна.

За один период  $T = 2\pi/\omega$  колебаний волокна прутки, движущийся с постоянной скоростью  $v$ , продвинется на величину  $\delta = 2\pi v/\omega$ , который должен быть равным протяженности участка пластического деформирования (рис.2,а)  $\delta = \Delta_1 - \Delta = u_m - (\Delta + d)$ . Из двух последних равенств находим координату начала взаимодействия конических поверхностей

$$\Delta = u_m - d - 2\pi v/\omega. \quad (6)$$

Соотношения (2) – (6) полностью определяют закон изменения во времени нормальной составляющей  $F_n$  силы взаимодействия конических поверхностей волокна и изделия в процессе ультразвукового волочения.

Перейдем к рассмотрению касательной составляющей  $F_\tau(u, \dot{u})$  силы взаимодействия конических поверхностей. Примем, что заготовка в зоне контакта обладает упругой податливостью в направлении образующей конической поверхности, и учтем, что между коническими поверхностями возникает сила сухого трения

$$F_\tau \leq \vartheta F_n, \quad (7)$$

где  $\vartheta$  - коэффициент трения.

Знак равенства имеет место при проскальзывании этих поверхностей. Учитывая касательную податливость зоны контакта, проскальзывание поверхностей будет происходить, если

$$\vartheta F_n \leq K_\tau (u - \Delta) \cos \alpha, \quad (8)$$

где  $K_\tau$  – коэффициент контактной касательной жесткости.

При отсутствии проскальзывания касательная составляющая

$$F_\tau = K_\tau (u - \Delta) \cos \alpha. \quad (9)$$

С учетом сказанного возможны два случая. Если

$$\xi = \frac{K_\tau}{K_n \vartheta} \operatorname{ctg} \alpha > 1, \quad (10)$$

скольжение поверхностей начинается в начале взаимодействия, и касательная реакция (рис.2,б) описывается выражением

$$F_\tau(u, \dot{u}) = \begin{cases} \vartheta F_n & \dot{u} \geq 0 \\ \left. \begin{array}{l} \vartheta D_n - K_\tau (u_m - u) \cos \alpha \\ -\vartheta [D_n - K_n (u_m - u) \sin \alpha] \\ 0 \end{array} \right\} \begin{array}{l} u_m - d_1 \leq u \leq u_m \\ u_m - d \leq u \leq u_m - d_1 \\ u \leq u_m - d \end{array} & \dot{u} \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

где  $d_1 = 2d/(1 + \xi)$ . На рис 2,б, кроме того, обозначено  $k_\tau = K_\tau \cos \alpha$ .

Во втором случае ( $\xi < 1$ ) предельная величина силы трения превышает упругие тангенциальные силы. Поэтому скольжение отсутствует, и возможно возникновение трещин на конических поверхностях из-за больших касательных упругих деформаций. По этой причине именно первый случай, отвечающий малым углам  $\alpha$ , имеет практическое значение

и рассматривается далее. Заметим, что величина  $d_1$  характеризует упругую касательную деформацию вследствие касательной податливости конических поверхностей. При отсутствии податливости  $K_\tau \rightarrow \infty$  и величина  $d_1 \rightarrow 0$ . При приближении к граничному значению параметра  $\xi \rightarrow 1$  величина  $d_1 \rightarrow d$ .

Рассмотрим более подробно поведение касательной составляющей силы контакта конических поверхностей в процессе их взаимодействия при выполнении условия (10). С момента  $t = t_1$  - начала взаимодействия до момента  $t = t_3$  - конца пластического деформирования, относительное движение поверхностей происходит с проскальзыванием, и касательная сила пропорциональна нормальной силе с коэффициентом пропорциональности  $\mathcal{G}$ . В момент  $t = t_3$  происходит изменение знака скорости относительного движения.

При отсутствии касательной податливости ( $K_\tau \rightarrow \infty$ ) сила трения должна мгновенно изменить знак на противоположный, и при дальнейшем движении убывать, как это показано пунктирной линией 1 на рис. 2,б. Именно такой случай рассматривался в работах [5, 6]. В нашем случае после изменения знака скорости относительного движения происходит разгрузка без скольжения касательной упругой силы до полной разгрузки в точке пересечения линии 2 с осью  $F_\tau=0$ . Дальнейшее движение сопровождается упругой деформацией без скольжения зоны контакта в противоположном направлении. Этот этап заканчивается при достижении координаты  $u = u_m - d_1$ , определяемой точкой пересечения линий 2 и 1. Далее происходит разгрузка зоны контакта с проскальзыванием до разрыва контакта в точке с координатой  $u = \Delta_1$ .

Суммарная динамическая характеристика, связывающая силу взаимодействия волокна и заготовки в направлении скорости  $v$  подачи прутка с перемещением  $u$  и скоростью  $\dot{u}$ , имеет вид

$$F(u, \dot{u}) = F_n(u, \dot{u}) \sin \alpha + F_\tau(u, \dot{u}) \cos \alpha. \quad (12)$$

Учитывая, что вследствие периодичности движения (1) волокна, сила взаимодействия  $f(t) = F[u(t), \dot{u}(t)]$  является периодической функцией времени с периодом  $T = 2\pi/\omega$ , с помощью теоремы импульсов получим соотношение, связывающее постоянную силу  $P$  с параметрами движения волокна

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{2\pi}{\omega} \int_0^T F[u(t), \dot{u}(t)] dt. \quad (13)$$

Из (1), (2), (11) – (13) и рис. 2 следует, что при традиционном волочении без вибрации, а также при волочении со скоростью  $v \geq a\omega$ , сила  $f(t) = D_n (\sin \alpha + \mathcal{G} \cos \alpha) = D = \text{const}$ , и, согласно (4), для ее преодоления необходима постоянная сила  $P = D$ . При наложении вибрации, такой что  $a\omega > v$ , в интервале  $0 \leq t \leq T$  сила  $f(t) \leq D$ , и, следовательно, необходимая для проведения процесса волочения сила  $P < D$ , т.е. происходит снижение усилия волочения. Величина этой силы зависит от упругопластических свойств материала проволоки, коэффициента трения, геометрии волокна, параметров вибрации волокна и скорости волочения.

На рис. 3 построены зависимости статической силы  $P$  от скорости  $v$  волочения при различных значениях отношения  $a/d$ . Отметим, что, как и в процессах пластического деформирования, рассмотренных в [3], при ультразвуковом волочении возможны режимы непрерывного и импульсного (виброударного) деформирования. Штриховая линия на рис. 4 разделяет области импульсного (нижняя) и непрерывного (верхняя) деформирования.

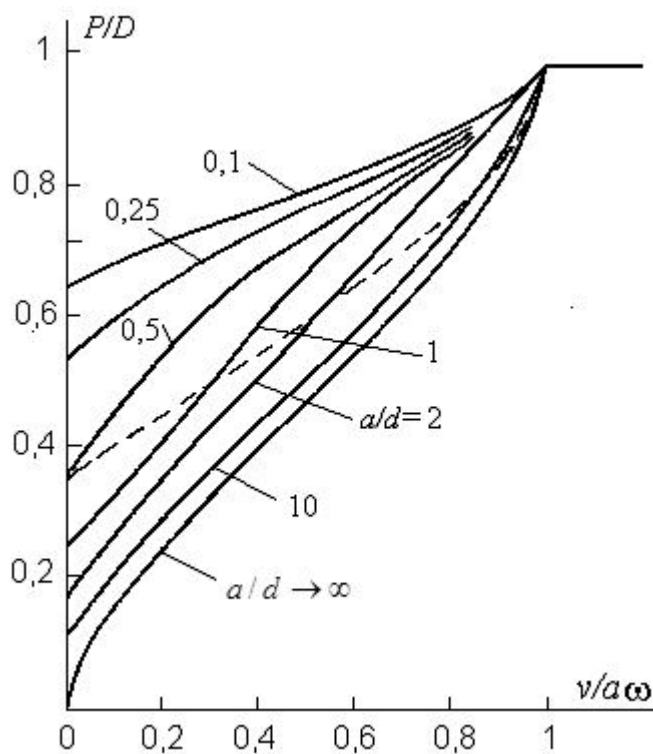


Рис. 3

Из рисунка видно, что виброударные режимы являются наиболее эффективными. Наибольший эффект снижения статического усилия волочения достигается для жесткопластического материала ( $K_n \rightarrow \infty$ ), которому на рис. 3 соответствует кривая, отмеченная индексом  $a/d \rightarrow \infty$ . В этом случае материал при воздействии ультразвуковой вибрации ведет себя подобно вязкой жидкости.

Если деформация материала прутка в зоне контакта не выходит за пределы упругой зоны характеристики (1), в периодическом режиме волокна занимает некоторое положение динамического равновесия, и скорость процесса  $v = 0$ . Условие, при котором деформация захватывает зону пластичности характеристики (2), имеет вид  $a > (\Delta + d)$ . С помощью этого условия из (4) после подстановки (1) - (3) найдем минимальную статическую силу  $P = P_m$ , превышение которой гарантирует проведение процесса волочения с некоторой скоростью  $v \neq 0$ .

Зависимость этой силы от амплитуды колебаний волокна показана на рис.4 сплошной линией 1. Штриховой линией 2 показана та же зависимость в случае  $K_\tau \rightarrow \infty$ , т.е. при пренебрежении касательной податливостью контактной зоны в характеристике силы трения. Здесь  $D_0 = D_n \sin \alpha = D / (1 + 9 \operatorname{ctg} \alpha)$ . Видно, что в этом случае получается парадоксальный результат: любая, сколь угодно малая вибрация, скачком изменяет силу волочения на конечную величину  $(D - D_0)$ . Эта величина равна вкладу, вносимому трением в полную силу при традиционном волочении без вибрации. Указанный парадокс не наблюдается экспериментально, и введение касательной податливости в динамическую характеристику процесса позволяет привести результаты расчетов в соответствие с экспериментальными данными.

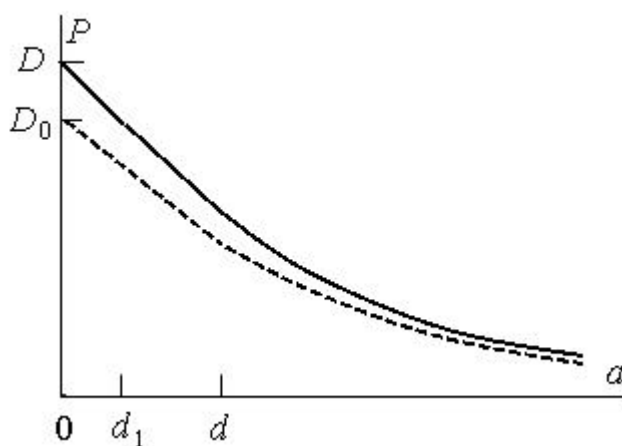


Рис. 4

В заключение заметим, что снижение усилия волочения при ультразвуковом воздействии происходит как за счет влияния на предел текучести материала, так и за счет уменьшения сил трения. Вклад в общий эффект той или иной составляющей зависит от соотношения между упругопластическими свойствами материала, коэффициентом трения, параметрами колебаний волоки и ее геометрическими характеристиками. При определенных соотношениях вклад одной из составляющих может оказаться преобладающим, как это часто и наблюдается в экспериментах [1, 2].

*Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований. Проект № 13-08-01235А.*

#### Список литературы

1. Харитонович М.В., Эскин Г.И. Ультразвук в процессах пластической деформации металлов и сплавов. М.: ВИЛС. 1970. 112 с.
2. Северденко В.В., Клубович В.В., Степаненко А.В. - Ультразвук и пластичность. Минск: Наука и техника. 1976. 446 с.
3. Асташев В.К. О влиянии высокочастотной вибрации на процессы пластического деформирования // Машиноведение. 1983. № 2. С. 3-12.
4. Асташев В.К. Влияние ультразвуковых колебаний резца на процесс резания // Проблемы машиностроения и надежности машин. 1992. №3. С. 81-86.
5. Асташев В.К., Турич В.В. Качество поверхности деталей, обработанных даформирующим протягиванием с наложением ультразвука. - В кн.: Повышение эффективности протягивания. Рига: РПИ. 1986. С. 131-136.
6. Astashev V.K., Babitsky V.I. Ultrasonic Processes and Machines. Dynamics, Control and Applications . Springer. 2007. 330 p.