

ТЕОРЕТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ РАЦІОНАЛЬНИХ ПАРАМЕТРІВ ІНСТРУМЕНТУ ДЛЯ РІЗАННЯ МАТЕРІАЛІВ ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ ПРИ ДІЇ УЛЬТРАЗВУКОВИХ КОЛИВАНЬ

В статті викладено частину теоретичних досліджень процесів різання матеріалів легкої промисловості при дії ультразвукових коливань. Ультразвукова ріжуча система складається з генератора електричних коливань високої частоти, перетворювача електричних коливань в механічні, акустичного трансформатора і ріжучого інструменту. Наведено обґрунтування необхідності технологічного і конструктивного узгодження системи пристроїв ультразвукового різання з властивостями матеріалів, що різються. Представлено математичні рівняння для визначення раціональної геометричної форми інструменту для різання. В рівняннях враховані фізичні характеристики конструкційних матеріалів і резонансна частота процесу руйнування матеріалів легкої промисловості. Результатом представлених досліджень є математична модель, яка дозволяє здійснювати розрахунок геометричної форми робочих органів системи для різання з ультразвуковою дією.

Ключові слова: рівняння, модель, різання, ультразвукові коливання, матеріал, легка промисловість.

AL-YAFAI NASR
Khmelnitsky national university

THEORETICAL DEFINITION OF RATIONAL PARAMETERS OF A TOOL FOR CUTTING OF LIGHT INDUSTRY MATERIALS UNDER THE ACTION OF ULTRASONIC OSCILLATIONS

The theoretical part of the research of the cutting processes of light industry materials under the action of ultrasonic oscillations has been presented in the article. Ultrasonic cutting system consists of a generator of electric oscillations of the high frequency, the transducer of electric to mechanical oscillations, acoustic transformer and the cutting tool. The substantiation of necessity of technological and constructive coordination of device system of ultrasonic cutting with shredded material properties has been offered. The author recommended the mathematical equations for determining of the rational geometrical shape of the cutting tool. The physical characteristics of structural materials and the resonant frequency of the destruction process light industry of materials have been considered in the equations. The mathematical model is the result of the presented researches which allows making the calculation of the geometric shape of the working parts of the cutting system with ultrasound action.

Key words: equations, model, cutting, ultrasonic vibrations, material, light industry.

Об'єкт та методи досліджень

За останні роки в технологічних процесах різання матеріалів стало використовуватись явище коливань інструменту з ультразвуковою частотою. Практика використання ультразвукових технологій показує, що при коливанні ріжучого інструменту з певною частотою і амплітудою можна досягти значного зниження зусиль опору різанню і покращенню якості поверхонь розділу матеріалів [1].

Ультразвукова ріжуча система складається з генератора електричних коливань високої частоти, перетворювача електричних коливань в механічні, акустичного трансформатора, ріжучого інструменту і матеріалу, що різеться.

Постановка завдання

Для досягнення максимального технологічного ефекту ультразвукова ріжуча система повинна бути налагодженою під певний вид коливань (повздовжні або поперечні) з частотою, яка є резонансною для даної системи "інструмент – матеріал". При цьому визначальними чинниками є фізичні властивості акустичного трансформатора, інструменту і матеріалу, що різеться та геометричні параметри системи.

Проектування ультразвукових ріжучих пристроїв здійснюється на основі емпіричних підходів, при яких визначення раціональних параметрів системи (частота, амплітуда, вид коливань, конструкційні матеріали, форма і розміри інструменту) здійснюється шляхом чисельних експериментальних досліджень. Відомі спроби використання методу обмежених елементів для чисельного моделювання процесів ультразвукової обробки [2]. Однак, його використання ускладнюється тим, що робота ультразвукової системи критично залежить від взаємодії ріжучого інструменту з матеріалом.

Математичне моделювання процесу ультразвукового різання може дати можливість проектувальникам проводити параметричні дослідження на основі обчислювального експерименту і значно зменшити кількість експериментальних випробувань.

Результати досліджень та їх обговорення

Математична модель процесу різання матеріалу інструментом, що коливається з ультразвуковою частотою може бути розроблена з використанням теорії повздовжніх коливань стержнів [3].

Розглянемо стержень, в якому відбуваються повздовжні коливання (рис. 1).

Для пружного стержня з ізотропного матеріалу з вільними граничними умовами, рівняння руху може бути знайдене, розглядаючи маленький елемент стержня dx , який під дією прикладної сили P зміщується від початкового положення X на величину u .

Тоді для координати $x + dx$ зміщення буде становити $u + \frac{\partial u}{\partial x} dx$. Елемент dx тепер буде мати довжину $\frac{\partial u}{\partial x} dx$ і деформація розтягнутого елемента буде становити $\frac{\partial u}{\partial x}$, як показано на рис. 1.

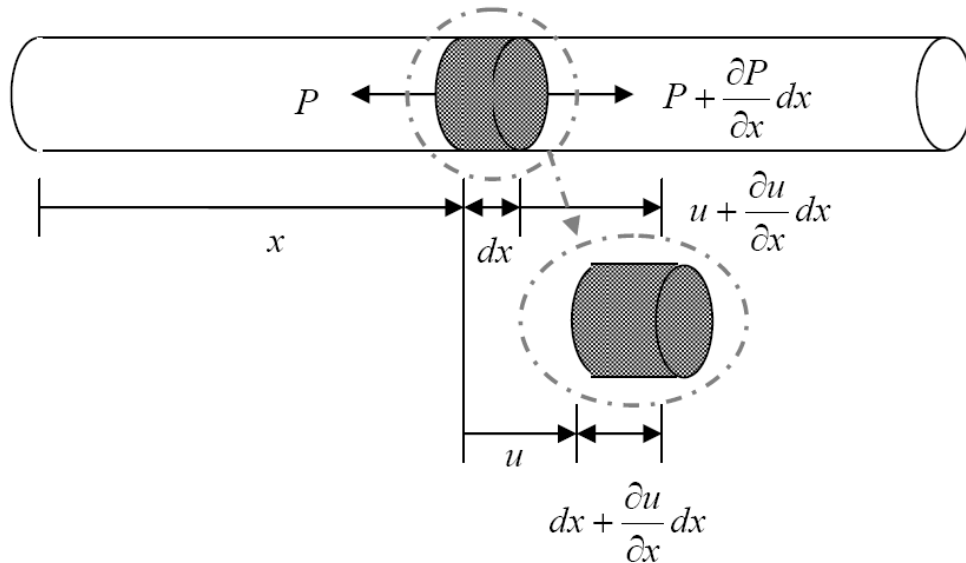


Рис. 1. Схема розповсюдження повздовжніх коливань в стержні:
 u - зміщення елемента матеріалу стержня; x - координата положення елемента; t - час

Вважаємо, що стержень підпорядковується закону Гука, тобто:

$$\sigma = \varepsilon E,$$

де σ - напруження в елементі; ε - відносна деформація елемента; E - модуль пружності матеріалу стержня.

Тоді, для стержня з довжиною L , під дією зусилля P відносно подовження становитиме:

$$\varepsilon = \frac{u + \frac{\partial u}{\partial x} dx - u}{dx} = \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{P}{EL} \quad (1)$$

Згідно з другим законом Ньютона:

$$P + \frac{\partial P}{\partial x} dx - P = \rho L dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де ρ - густина матеріалу стержня.

Підставимо (2) в (1) і після перетворень отримаємо:

$$LE \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} dx = \rho L dx \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}. \quad (3)$$

Звідки

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (4)$$

Формула (4) може бути представлена у вигляді:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (5)$$

де $c^2 = \frac{E}{\rho}$ - швидкість звуку в матеріалі стержня.

Диференціальне рівняння (5) може бути вирішено шляхом розділення змінних. Рішення може бути представлено у формі:

$$u(x, t) = G(x)H(t). \quad (6)$$

З урахуванням (6) перепишемо (5) у вигляді:

$$\frac{1}{G} \frac{\partial^2 G}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{1}{H} \frac{\partial^2 H}{\partial t^2}. \quad (7)$$

Кожна частина рівняння (7) повинна бути константою, оскільки ліва частина незалежна від x і права частина незалежна від t . Нехай константа - $\left(\frac{\omega}{c}\right)^2$, тоді два звичайних диференціальних рівняння будуть мати вигляд:

$$\frac{d^2 G}{dx^2} + \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 G = 0; \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 H}{\partial t^2} + \omega^2 H = 0. \quad (9)$$

Загальне рішення має вигляд:

$$G(x) = A \sin \frac{\omega}{c} x + B \cos \frac{\omega}{c} x; \quad (10)$$

$$H(t) = C \sin \omega t + D \cos \omega t.$$

де постійні A, B, C, D – отримуються при граничних і початкових умовах.

Загальне рішення для u буде:

$$u(x, t) = \left(A \sin \frac{\omega}{c} x + B \cos \frac{\omega}{c} x \right) (C \sin \omega t + D \cos \omega t). \quad (11)$$

Для стержня частота власних коливань може бути знайдена за формулою:

$$f_n = \frac{n}{2l} \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (12)$$

де l - настроєна довжина.

Для відомої резонансної частоти настроєна довжина може бути розрахована за виразом:

$$l = \frac{n}{2f_n} \sqrt{\frac{E}{\rho}}. \quad (13)$$

З формул 12, 13, власна частота, f_n залежить від довжини елемента і констант матеріалу E і ρ . Формули 12, 13 можуть бути застосовані для простих стержневих елементів, які мають довжину, набагато більшу ніж діаметр.

У високоенергетичних ультразвукових пристроях для підсилення амплітуди вібрації, що забезпечується перетворювачем використовують хвильові трансформатори складної форми.

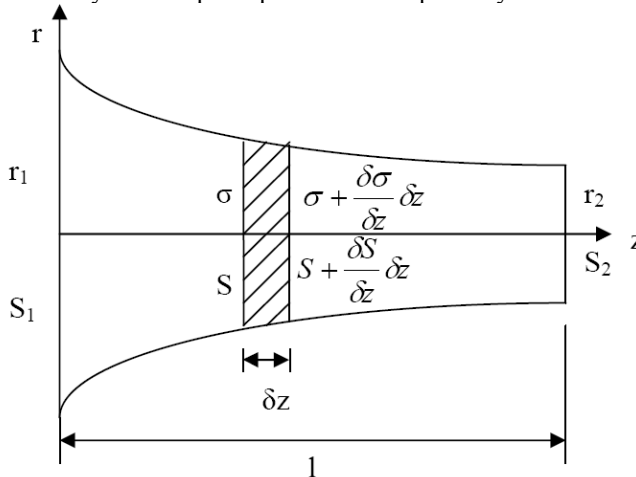


Рис. 2. Розподіл тиску в аксиально-симетричному профілі

Теоретичні рівняння подовжньої вібрації стержнів конічних, показових і катеноїдних були отримані в роботі [3]. Рівняння були отримані, припускаючи те, що хвилі тиску залишаються відмінно виключно плоскими і тиск розповсюджується порівну через перехресну секцію, як можна бачити на рис. 2. Бічний плоский тиск вважається незначним.

Рівняння руху для маленького елемента аксиально-симетричного профілю з початковими перетином S_1 і радіусом r_1 , що звужується до поперечного перетину

S_2 і радіусу r_2 (рис. 2), може бути визначене на основі використання другого закону Ньютона:

$$\sum F = m \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \quad (14)$$

де F – сила; m – маса; $\frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}$ – прискорення.

Об'єм елемента виразимо як:

$$\left(S + \frac{\partial S}{\partial z} dz \right) dz + \left(S - \left(S + \frac{\partial S}{\partial z} dz \right) \right) dz = S dz, \quad (15)$$

де S – будь-який перетин, m маса елемента певної щільності і об'єму, dz – довжина елемента, z – подовжня вісь, r – радіальна вісь і u_z – зсув в z -осі.

Сума сил може бути знайдена як

$$F = \sigma S,$$

де F – сила, σ – тиск в елементі і S – перетин області.

Сума сил:

$$\sigma S + \frac{\partial S}{\partial z} \sigma dz + \frac{\partial S}{\partial z} S dz - \sigma S = 0. \quad (16)$$

Підставляємо (15) і (16) в (14) і отримуємо рівняння руху

$$\rho S dz \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2} = \frac{\partial \sigma}{\partial z} S dz + \frac{\partial S}{\partial z} \sigma dz. \quad (17)$$

В роботі [4] представлено наступні рівняння для опису отримання резонуючої довжини для декількох видів трансформатора. Ілюстрація цих загальних аксиально-симетричних профілів показана на рис. 3. Відповідні рівняння для обчислення резонансної довжини:

- для конічного трансформатора

$$l = \frac{\lambda k_l}{2\pi}, \quad (18)$$

де $k_l = \frac{\omega}{c}$;

- для експоненціального трансформатора

$$l = \frac{\lambda n}{2} = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{(\pi n)^2 + (\ln N)^2}{\pi^2}}, \quad (19)$$

де $N = \frac{r_1}{r_2}$; $\lambda = \frac{c}{f}$; $n = 1, 2, 3, \dots$;

- для катеноїдного трансформатора:

$$l = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{(k'l)^2 + (\cos^{-1} N)^2}{\pi^2}}, \quad (20)$$

де $k' = \sqrt{k^2 - \gamma^2}$; $N = \frac{r_1}{r_2}$; $\lambda = \frac{c}{f}$; $\gamma = \frac{1}{l} \cos^{-1} \frac{r_1}{r_2}$

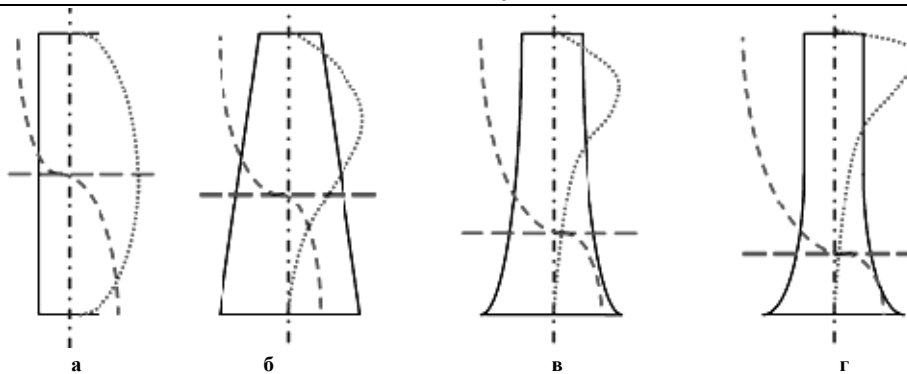


Рис. 3. Загальні схеми профілів, що ілюструють перетин нейтрального шару (---), розподіл напружень (-.-) і вібраційну амплітуду (.....) вздовж довжини ультразвукового акустичного трансформатора:
а – циліндричний профіль; б – конічний профіль; в – експоненціальний профіль; г – катеноїдний профіль

Висновки

Вибір профілю, який використовується, залежить від застосування і амплітуди ультразвуку, потрібного для процесу. Конічний профіль – компроміс між складністю і якістю. Катеноїдні профілі дають більшу вигоду, ніж конічні з такого ж матеріалу. Маніпулювання формою профілів може забезпечити збільшення структурної міцності елемента, змінивши позицію вузла, яка є перетином розташування нейтрального шару.

Література

1. Балдаев Радж Применения ультразвука. – М. : Изд-во Техносфера, Паланичами, 2006. – 576 с.
2. Разинкин А.В. Термомеханические процессы при ультразвуковом резании металлов : автореф. дис. на соискание ученой степени к. т. н. / Разинкин А.В. – М., 2008. – 16 с.
3. Thomson W.T., Dahleh M.D. The Theory of Vibration with Applications fourth Edition. Person Education Asia Limited and Tsinghua University Press, 2005. 546 p.
4. Меркулов Л. Г. Теория ультразвуковых концентраторов / Л. Г. Меркулов // Акустический журнал. – 1957. – Т. 3. № 3.

References

1. Radzh Baldaev Application of ultrasound. M., Tekhnosfera, 2006. 576 p.
2. Razinkin A.V. Thermo mechanic processes at the ultrasonic cutting of metals. Autoreport of diss. of candidate of engineering sciences. M., 2008. 16 p.
3. Thomson W.T., Dahleh M.D. The Theory of Vibration with Applications fourth Edition. Person Education Asia Limited and Tsinghua University Press, 2005. 546 p.
4. Merkulov L.G. A theory of ultrasonic concentrators. Acoustic magazine. 1957. Vol. 3. № 3.

Рецензія/Peer review : 21.3.2013 р.

Надрукована/Printed : 7.4.2013 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Параска Г.Б.