

УДК 539.3:534.1

О.М.Алексейчук, канд.техн.наук,
НТУ України “Киевский политехнический институт”, г.Киев, Украина

ПРОЕКТУВАННЯ ХВИЛЬОВОДІВ ДЛЯ ЗВАРЮВАННЯ ПО КІЛЬЦЕВОМУ КОНТУРУ

Предложен конечно-элементный подход к проектированию класса волноводов для ультразвуковой сварки пластмассовых деталей, которые получают путем соединения конусоподобного стержня на продольной моде колебаний с диском линейнопеременной толщины на изгибной моде колебаний. Резонансная для заданной частоты конфигурация синтезируется из указанных элементов, которые имеют одинаковые частоты, равные заданной. Для реализации подхода построена спектральная диаграмма.

Piecewise-element approaches to design a class of waveguides for ultrasound welding of plastics consisting of a conical rod and disc of linear-variable thickness (one having longitudinal, another – bending modes of oscillations) connected with each other are reported. The resonance dimensions of waveguides were determined from the spectral diagram.

Вступ

При проектуванні хвильоводів для ультразвукового зварювання, конфігурація яких обумовлена формою зварного шва, виникає декілька вимог. По-перше, вони повинні мати резонанс на певній частоті. По-друге, в залежності від способу введення коливань у виріб резонансна мода повинна характеризуватися однорідним розподілом переміщень на робочій поверхні. До додаткових вимог належать заданий коефіцієнт підсилення переміщень, циклічна міцність, низький рівень вібророзігріву та ін..

1. Постановка і метод розв'язання задачі. Задане ізотропне лінійно-пружне тіло V , обмежене поверхнею S . Система співвідношень, що описує гармонічні коливання тіла містить:

рівняння Ламе

$$\nabla^2 \vec{u} + \frac{1}{1-2\nu} \text{grad div } \vec{u} + \rho \omega^2 G^{-1} \vec{u} = 0 \quad (1.1)$$

і граничні умови у вигляді

$$\sigma \cdot \vec{n} = \vec{\sigma}_o \text{ на } S_1; \quad \sigma \cdot \vec{n} = 0 \text{ на } S - S_1 \quad (1.2)$$

де $\vec{u}$ - амплітуда переміщень; σ –тензор амплітуд напружень; $\vec{\sigma}_o$ - амплітуда вектора зовнішнього навантаження; $\vec{n}$ - зовнішня нормаль до S ; G - модуль зсуву; ν -коефіцієнт Пуассона; ρ - густина; ω -колова частота; $\omega = 2\pi f$

Задача (1.1)-(1.2) розв'язується методом скінченних елементів(МСЕ), причому використовується ізопараметричний чотирикутний восьми-вузловий елемент з квадратичною апроксимацією переміщень[1].

Розрахунок резонансних характеристик проводиться в рамках задачі про вимушені коливання [2]. Вводиться функція $F(\omega)$, яка дорівнює характерній компоненті переміщення u_α в зоні її пучності, і звичайно легко визначається в низькочастотному

ультразвуковому діапазоні. В даному випадку використовується переміщення в точці А. Значення і-го наближення резонансної частоти ω_r визначається за методом хорд

$$\omega_1^{(i)} = \omega_1^{(i)} + \left(\omega_2^{(i)} - \omega_1^{(i)} \right) / \left(1 - u_{d1}^{(i)} / u_{d2}^{(i)} \right)$$

де $\omega_1^{(i)}$ і $\omega_2^{(i)}$ – значення ω на кінцях інтервала зміни знака u_a через нескінченність. Схема дозволяє в процесі уточнення частоти по ширині області резонанса оцінити ефективність збудження реальним навантаженням відповідної моди коливань. Точність контролюється критерієм практичної збіжності по КЕ-сітці при допуску 20 Гц ($\sim 0,1\%$ від ω_r).

2. Спектральна діаграма. Визначення резонансної для частоти f_r конфігурації хвильовода розглядуваного типу (рис.1) базується на зображенні її складеної з двох резонансних для тієї ж частоти конфігурацій верхнього та нижнього конусів, з'єднаних по поверхні S_2 . Змістовність такого підходу обґрунтована аналізом форм коливань парціальних елементів. На мал.2,а,б приведено типові контурні форми коливань верхнього і нижнього конусів.

Незважаючи на те, що в цих конусах реалізується відповідно рух згинного та поздовжнього типів, переміщення на поверхнях S_2^+ та S_2^- добре узгоджені. Ці поверхні здійснюють майже однакові, близькі до поршневого рухи. Поняття кінематичної узгодженості можна формалізувати за допомогою параметра χ :

$$\chi = S_2^{-1} \int_{S_2} \left[(\hat{u}_{r+} - \hat{u}_{r-})^2 - (\hat{u}_{z+} - \hat{u}_{z-})^2 \right] ds ,$$

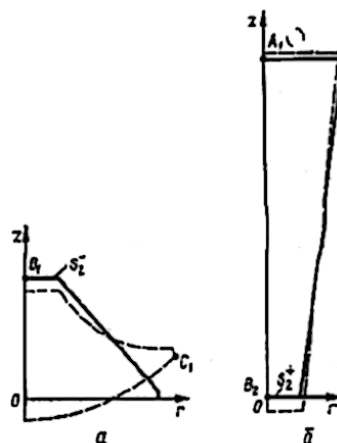
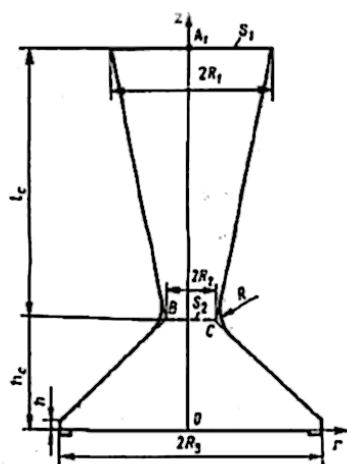


Рис.1 Конфігурація хвильовода Рис.2. Форми коливань конусів

де використані нормовані переміщення парціальних елементів

$$\hat{u}_{r,z+}(r,z) = u_{r,z+}(r,z) / u_z(B_2) \text{ на } S_2 + \hat{u}_{r,z+}(r,z) = u_{r,z+}(r,z) / u_z(B_2);$$

$$\hat{u}_{r,z+}(r,z) = u_{r,z+}(r,z) / u_z(B_1) \text{ на } S_2^-.$$

Критерієм доброї узгодженості є $\chi < 1$. Можна очікувати, що при виконанні цієї умови з'єднані по вузловій для напружень поверхні S_2 елементи, які мають однакову резонансну частоту, не будуть здійснювати одне на одне суттєву кінематичну та динамічну дію, тож резонансна форма і частота синтезованої конфігурації суттєво не зміниться. Таку конфігурацію назвемо резонансно узгодженою або узгодженою. Для її визначення використаємо спектри верхнього і нижнього конусів. Вважатимемо, що параметри R_1, R_2, R_3 та h задано, а параметри h_c, l_c і R треба знайти. Розглянемо декілька модальних характеристик. Загальний коефіцієнт підсилення переміщень визначимо за співвідношенням

$$K_u = |u_z(A_2) / u_z(A)|.$$

Введемо також коефіцієнти підсилення переміщень верхнього і нижнього конусів в синтезованій конфігурації

$$K_u^+ = |u_z(B) / u_z(A_1)|, K_u^- = |u_z(A_2) / u_z(B)|$$

і як окремих елементів

$$K_{uf}^+ = |u_z(B) / u_z(A_1)|, K_{uf}^- = |u_z(C_1) / u_z(B_1)|$$

Обчислення проводилися для хвильовода із сталі 45 з наступними характеристиками [3]:

$$E = 0,205 \cdot 10^{12} \text{ Па}, \nu = 0,28, \rho = 0,781 \cdot 10^4 \text{ кг/м}^3,$$

де E – модуль Юнга.

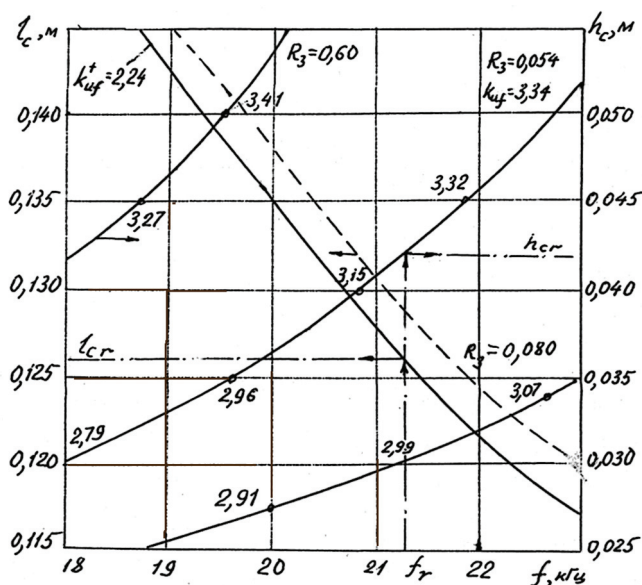


Рис.3 Спектральна діаграма

лініями зі стрілками. Так, для частоти $f_r = 22,00 \text{ кГц}$ маємо:

Для геометричних параметрів приймемо $R_1 = 0,033 \text{ м}$, $R_2 = 0,0135 \text{ м}$, $h = 0,0015 \text{ м}$. Для початку вважатимемо $R = 0$. На рис.3 зображені спектральні криві перших резонансів верхнього конуса, а також нижнього при $R_3 = 0,054 \text{ м}$ та $R_3 = 0,06 \text{ м}$, параметризованих відповідно по розмірах l_c і h_c .

Штрихова лінія відповідає розрахунку за стрижневою теорією [3] і дозволяє оцінити її похибку. Числами вздовж кривих позначені коефіцієнти підсилення переміщень. Визначення параметрів l_c і h_c показано штриховими

$$h_{cr} = 0,0456 \text{ м}, l_{cr} = 0,1224 \text{ м}, K_{uf}^{+} = 2,24, K_{uf}^{-} = 3,32.$$

Для синтезованої конфігурації одержимо $f_r = 22,00$ кГц і $K_u = 8,1$. При цьому форма коливань практично відповідає зображеній на рис.2 а,б. Таким чином розстройка частоти лежить в діапазоні точності обчислень. З спектральної діаграми на рис.3 видно, що із збільшенням радіуса контура R_3 резонансна висота нижнього конуса, а також цілого хвильовода дуже зростає. Цьому можна запобігти, якщо перейти на другу згинну моду коливань нижнього конуса. Відповідну спектральну криву зображено на рис.3. Ця мода має достатньо високий коефіцієнт підсилення переміщень і добре узгоджена з поздовжньою модою верхнього конуса.

Висновки

Суттєвою перевагою хвильоводів з резонансно-узгодженою конфігурацією є можливість синтезувати їх за допомогою спектральних діаграм більш простих елементів, тоді як неузгоджені конфігурації конкретизуються методом перебору і потребують більшої кількості обчислень. Спектральні діаграми можна побудувати для різних розмірів контура, резонансних частот, коефіцієнтів підсилення переміщень та матеріалів хвильоводів. При подальшому дослідженні є доцільним дослідити концентрацію напружень в кутовій точці С на поверхні з'єднання двох контурів.

Список літератури

1. Козлов В.И., Якименко С.Н., Черняк Б.Я. Термомеханическое поведение вязко-упругих тел. Вращения при осесимметричном деформировании // Прикл. механика.- 1989.-25, №5.-С. 22-28.
2. Сенченков И.К., Козлов В.И., Червинко О.П., Черняк Б.Я. К расчету резонансных характеристик осесимметричных волноводов методом конечных элементов // Прикл. механика.- 1990.-26, №11.-С. 35-39.
3. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов.- Л.: Машиностроение, 1988.-224с.