

РОЗРАХУНОК ХВИЛЕВОДІВ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ ПІД ДІЄЮ ВІБРАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ

Трубачев С.І., Колодежний В.А.

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Розроблена методика розрахунку хвилеводів під дією вібраційних навантажень. Запропонований підхід визначення динамічних характеристик хвилеводу для ультразвукового зварювання. Для чисельної реалізації методики використовується варіаційно-сітковий метод. Визначені власні частоти. Дані рекомендації щодо проектування хвилеводів.

Ключові слова: ультразвукове зварювання, хвилевід, вібраційне навантаження, власні частоти, резонанс.

Постановка проблеми. Ультразвукове зварювання широко застосовується в промисловості. Переваги ультразвукової технології перед класичними методами зварювання – в можливості зварювати елементи конструкцій в важкодоступних місцях, будь-якій формі та міцності зварних швів, низьких частотах та великій потужності. Тому розрахунок хвилеводів під дією вібраційних навантажень є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що для розрахунку хвилеводів необхідно вирішити задачу про вимушені коливання [1; 2], а це неможливо без визначення власних частот та форм коливань. Тому необхідно розробляти ефективні та економічні методи визначення спектру власних частот та форм коливань

Викладення невіршених раніше частин загальної проблеми. Недостатньо досліджень коливань хвилеводів змінного поперечного перерізу з використанням ефективних чисельних методик розрахунків, які програмно реалізовані і апробовані на практичних задачах.

Метою статті є розробка ефективної методики визначення власних частот та форм коливань хвилеводів, що необхідно для вирішення задачі про вимушені коливання.

Виклад основного тексту. При проектуванні хвилеводів 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].

Розрахунок резонансних характеристик проводиться в рамках задачі про вимушені коливання [2]. Вводиться функція $F(\omega)$, яка дорівнює характерній компоненті переміщення u_a в зоні її пучності і звичайно легко визначається в низькочастотному ультразвуковому діапазоні. Значення i -го наближення резонансної частоти ω_r визначається за методом хорд:

$$\omega_r^{(i)} = \omega_1^{(i)} + (\omega_2^{(i)} - \omega_1^{(i)}) / (1 - u_{a1}^{(i)} / u_{a2}^{(i)}), \quad (1)$$

де $\omega_1^{(i)}$ і $\omega_2^{(i)}$ – значення ω на кінцях інтервалу зміни знаку u_a .

Визначення резонансної для частоти f_r конфігурації хвилеводу базується на зображенні її

складеної з двох резонансних для тієї ж частоти конфігурацій верхнього та нижнього конусів, з'єднаних по поверхні S_2 .

Незважаючи на те, що в цих конусах реалізується відповідно рух згинального 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 :

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

де використані нормовані переміщення парціальних елементів:

$$\hat{u}_{r,z+}(r, z) = u_{r,z+}(r, z) / u_z(B_2) \text{ на } S_2^+; \quad (3)$$

$$\hat{u}_{r,z+}(r, z) = u_{r,z+}(r, z) / u_z(B_1) \text{ на } S_2^-. \quad (4)$$

Критерієм доброї узгодженості є $\chi \ll 1$. Можна очікувати, що при виконанні цієї умови з'єднані по вузловій для напружень поверхні S_2 елементи, які мають однакою резонансну частоту, не будуть здійснювати одне на одне суттєву кінематичну та динамічну дію, тож резонансна форма і частота синтезованої конфігурації суттєво не зміняться. Таку конфігурацію назвемо резонансно узгодженою [2]. 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

$$K_u = |u_z(A_2) / u_z(A)|. \quad (5)$$

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

$$K_u^+ = |u_z(B) / u_z(A_1)|, \quad K_u^- = |u_z(A_2) / u_z(B)|, \quad (6)$$

і як окремих елементів:

$$K_{uf}^+ = |u_z(B) / u_z(A_1)|, \quad K_{uf}^- = |u_z(C_1) / u_z(B_1)|. \quad (7)$$

Обчислення проводилися для хвилеводу із сталі 45 з наступними характеристиками [3]: $E = 0,205 \cdot 10^{12}$ Па, $\nu = 0,28$, $\rho = 0,781 \cdot 10^4$ кг/м³, де E – модуль Юнга, ν – коефіцієнт Пуассона, ρ – щільність матеріалу.

При розрахунку динамічних характеристик основні труднощі полягають у визначенні спектра власних частот і форм коливань хвилеводів. У загальному випадку розрахунок зводиться до відомої узагальненої задачі на власні значення:

$$(Ku, v) = \omega^2 (Mu, v), \quad \forall v \in V, \quad (8)$$

де V – множина допустимих функцій, (Ku, v) , (Mu, v) – сімейство симетричних білінійних безперервних форм, що відповідають амплітудним значенням потенціальної і кінетичної енергії системи, K – матриця жорсткостей, M – матриця мас.

При розв'язанні задачі чисельними методами нескінченномірний простір допустимих функцій V замінюється скінченномірним V_h шляхом дискретизації системи. При цьому задача (8) замінюється наближеною: для заданого скінченномірного простору V_h необхідно знайти такі значення ω , u_h , що

$$(Ku_h, v_h) = \omega^2 (Mu_h, v_h), \quad \forall v_h \in V_h. \quad (9)$$

Для визначення основної власної частоти використовується формула Релея:

$$\omega_0^2 = \frac{\int_0^l EF(u')^2 dx}{\int_0^l \rho Fu^2 dx}. \quad (10)$$

При поздовжніх коливаннях стрижня сили спрямовані уздовж прямолінійної осі, а напруження і деформації розподілені по площі перерізу рівномірно. Амплітудні значення потенціальної і кінетичної енергії стрижня мають вигляд [4]:

$$P = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{du}{dx} \right)^2 dx, \quad T = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l \rho Fu^2 dx, \quad (11)$$

тут E – модуль Юнга, F – площа поперечного перерізу, ρ – щільність матеріалу, l – довжина хвилевода.

Поздовжні переміщення апроксимуються лінійним поліномом:

$$u(x) = u_i + \frac{u_j - u_i}{l} x, \quad (12)$$

де u_i , u_j – переміщення i -го й j -го вузлів.

У випадку згинальних коливань хвилевода амплітудні значення потенціальної і кінетичної енергії мають вигляд

$$P = \frac{1}{2} \int_0^l EI \left(\frac{d^2 w}{dx^2} \right)^2 dx, \quad T = \frac{1}{2} \omega^2 \int_0^l \rho F w^2 dx. \quad (13)$$

У цьому випадку для апроксимації переміщень використовуємо поліном 3-го порядку:

$$w(x) = \frac{w_i}{l^3} (2x^3 - 3x^2 l + l^3) + \frac{w_j}{l^3} (3x^2 l - 2x^3) + \varphi_i \frac{1}{l^2} (xl^2 - 2x^2 l + x^3) + \varphi_j \frac{1}{l^3} (x^3 - x^2 l). \quad (14)$$

Для розв'язку задачі (9) використовувався ітераційний метод покоординатного спуску [5], застосування якого дозволяє уникати труднощів, пов'язаних з формуванням, зберіганням і оперуванням з матрицями мас і жорсткостей. В даній роботі для визначення 2-ї та більш високих власних частот та власних форм коливань пропонується використовувати метод підвищення жорсткостей, який оснований на використанні мінімакських властивостей функціонала Релея-Рітца та проєкційних методів [6; 7]. Для визначення першої власної частоти та форми в роботі використовується метод квазістатичних ітерацій [7]. Метод підвищення жорсткостей є найбільш ефективним та економічним методом з точки зору обчислювальних ресурсів порівняно з традиційним методом, в якому кожна наступна форма і частота знаходиться шляхом мінімізації на підпросторі, що ортогональний всім попереднім знайденим власним векторам. Слід підкреслити, що метод підвищення жорсткостей дозволяє визначити необхідну кількість власних частот і форм коливань, включаючи кратні, що важливо при розв'язуванні задачі о вимушених коливаннях механічних систем.

Висновки і пропозиції. У роботі розглянута задача о коливаннях ультразвукового зварювання. Запропонована методика визначення спектру власних частот та форм коливань хвилеводів. Суттєвою перевагою хвилеводів 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. Дана методика дозволяє визначити власні частоти та форми коливань для різних розмірів контура, резонансних частот, коефіцієнтів підсилення переміщень та матеріалів хвилеводів, що необхідно при проектуванні конструкцій.

Список літератури:

1. Козлов В.И. Термомеханическое поведение вязкоупругих тел. Вращения при осесимметричном деформировании / В.И. Козлов, С.Н. Якименко, Б.Я. Черняк // Прикл. механика. – 1989. – № 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 / И.К. Сенченков, В.И. Козлов, О.П. Червинко, Б.Я. Черняк // Прикл. механика. – 1990. – № 11. – С. 35–39.
3. Холопов Ю.В. Ультразвуковая сварка пластмасс и металлов / Ю.В. Холопов. – Л.: Машиностроение, 1988. – 224 с.
4. Трубочев С.И. Визначення власних частот і форм коливань стрижнів / С.И. Трубочев, В.А. Колодежний // Молодий вчений. – 2017. – № 2. – С. 151–154.
5. Бабенко А.Е. Застосування й розвиток методу покоординатного спуску в задачах визначення напружено-деформованого стану при статичних та вібраційних навантаженнях / А.Е. Бабенко. – К.: КПІ, 1996. – 96 с.
6. Бабенко А.Е. Определение частотного спектра и собственных форм колебаний упругих систем методом повышения жесткостей / А.Е. Бабенко, О.А. Боронко, С.И. Трубочев // Проблемы прочности. – 1990. – № 2. – С. 122–124.
7. Бабенко А.Е. Визначення динамічних характеристик багатошарових фотоелектричних модулів сонячних батарей / А.Е. Бабенко, О.О. Боронко, С.И. Трубочев // Прогресивна техніка і технологія та інженерна освіта: матеріали XVIII Міжнародної наук.-техн. конф., 29 черв.-1 лип. 2017 р., м. Київ. – К.: КПІ, 2017. – С. 43–44.

Трубачев С.И., Колодежный В.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

РАСЧЕТ ВОЛНОВОДОВ УЛЬТРАЗВУКОВОЙ СВАРКИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ВИБРАЦИОННЫХ НАГРУЗОК

Аннотация

Разработана методика расчета волноводов под действием вибрационных нагрузок. Предложен подход определения динамических характеристик волновода для ультразвуковой сварки. Для численной реализации методики используется вариационно-сеточный метод. Определены собственные частоты. Даны рекомендации по проектированию волноводов.

Ключевые слова: ультразвуковая сварка, волновод, вибрационная нагрузка, собственные частоты, резонанс.

Trubachev S.I., Kolodezhnyi V.A.

National Technical University of Ukraine
«Kyiv Polytechnic Institute named after Igor Sikorsky»

CALCULATION OF WAVEGUIDES OF ULTRASONIC WELDING UNDER ACTION OF VIBRATION LOADS

Summary

A technique for calculating waveguides under the action of vibrational loads is developed. An approach is proposed for determining the dynamic characteristics of a waveguide for ultrasonic welding. For numerical realization of the method, the variational-grid method is used. The natural frequencies are determined. Recommendations for the design of waveguides are given.

Keywords: ultrasonic welding, waveguide, vibration load, natural frequencies, resonance.