

УДК 539

С.М. ІСАКОВ, О.С. ІСАКОВ, С.І. МАРУСЕНКО

## ТРИБОЛОГІЧНА СИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ЗВАРЮВАННЯ. ПІДСИСТЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ІНСТРУМЕНТУ

Розроблено підсистему ультразвукового інструменту з використанням програмного комплексу ANSYS, що інтегровано у трибологічну систему ультразвукового зварювання. Проведено моделювання ультразвукового інструменту, симетричного відносно осі, та чисельні розрахунки робочої резонансної частоти та форми коливань. Запропоновано підхід до інтегрування нової підсистеми у загальну трибологічну систему ультразвукового зварювання.

**Ключові слова:** трибологічна система, високочастотне навантаження, ультразвукове зварювання.

**Вступ.** Трибологічну систему ультразвукового зварювання (УЗЗ), що було запропоновано у [1, 3], для більш точного моделювання усіх процесів, що проходять внаслідок взаємодії ультразвукового інструменту (УЗІ) та деталей, що оброблюються, треба доповнити підсистемою ультразвуковий інструмент. Підсистема УЗІ базується на розрахунках резонансних режимів ультразвукового інструменту (надалі інструмент або модель), що моделюється з використанням активних та пасивних матеріалів [5], що відповідають конструктивним елементам УЗІ – п'єзокерамічному перетворювачу, системі хвилеводів і робочого наконечника, що у свою чергу є знімним. Напруга генератора змінного струму подається на електроди п'єзокерамічних елементів, внаслідок п'єзо ефекту коливання електричного струму перетворюються в механічні коливання, а використання елементів зворотного зв'язку дозволяє підвищити ефективність системи автоматичного контролю та управління процесом зварювання.

У рамках роботи проводиться геометричне моделювання ультразвукового інструмента з урахуванням особливостей конструкції, та розрахунок резонансної форми коливань УЗІ з використанням можливостей та програмних засобів програмного комплексу ANSYS.

**Опис підсистеми УЗІ.** У рамках даної роботи було запропоновано для моделювання УЗІ використання віссиметричного плоского кінцевого елемента. Фізико-механічні характеристики матеріалів, що використовуються у моделі УЗІ, зібрані у підсистемі матеріалів і формалізовані як функції, що залежать від температури.

Характеристики титанового сплаву, з якого виготовлений інструмент, наведені в табл. 1.

П'єзокерамічна ортотропність обумовлена поляризацією матеріалу уздовж осі  $X$ , що спрощує вид матриць.

Матриця пружних постійних:

$$C = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{13} & c_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & c_{22} & c_{12} & 0 & 0 & 0 \\ & & c_{33} & 0 & 0 & 0 \\ & & & c_{44} & 0 & 0 \\ \text{сим.} & & & & c_{55} & 0 \\ & & & & & c_{66} \end{bmatrix}$$

Матриця діелектричних постійних:

$$C = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & & 0 \\ & \varepsilon_{22} & \\ 0 & & \varepsilon_{33} \end{bmatrix}$$

Матриця п'єзоелектричних постійних:

$$S = \begin{bmatrix} s_{33} & & & & & \\ & s_{31} & & & & \\ & & s_{31} & & & \\ & & & s_{15} & & \\ & & & & & s_{15} \end{bmatrix}$$

Щільність  $\rho = 7500 \text{ кг/м}^3$ .

Таблиця 1 – Характеристики титанового сплаву

Характеристика	Розмірність	Величина
Модуль пружності, $E$	Н/м <sup>2</sup>	$10,7 \cdot 10^{10}$
Коефіцієнт Пуассона, $\nu$		0,3.
Щільність, $\rho$	кг/м <sup>3</sup>	4450

Параметри робочого процесу УЗІ розраховуються з використанням методик, що були запропоновані у [3] з використанням підсистеми тертя та термодинамічної підсистеми трибологічної системи ультразвукового зварювання.

Використання програмного комплексу ANSYS потребує написання та відпрацювання спеціалізованого інтерфейсу [2] між ПК та трибологічною системою УЗЗ.

**Геометрична модель УЗІ.** Інструмент являє собою комбінацію циліндричних і конічних тіл, які в перетині мають прямокутник і трапецію, і є віссиметричним. У ПК ANSYS було побудовано перетин, який надалі було повернено навколо вісі (рис. 1).



Рисунок 1 – Перетин УЗІ, який побудовано простими чотирикутниками

Розбивку плоского перетину було проведено за допомогою спеціального елемента MESH200, що не є об'ємним (рис. 2). Для використання цього кінцевого

елемента для розбивки плоских перетинів необхідно умовою є вибір опції кількості вузлів і ступенів вільності у вузлі.

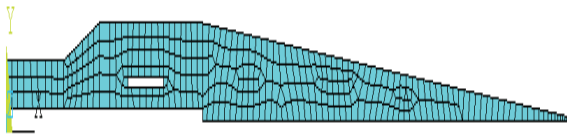


Рисунок 2 – Перетин моделі, що розбито елементом MESH200

Точки з координатами таких вузлів збігаються автоматично, тому що по визначенню функції форм рівні одиниці у даній точці й нулю у всіх інших. Крім цього використане визначення зв'язку глобальних і криволінійних координат забезпечує геометричну відповідність елементів, тобто два суміжних елементи будуть стикатися по всієї границі, тому що функції форм задовольняють умовам безперервності. Такі елементи, у яких функції форм, що визначають геометрію й невідому функцію переміщень, однакові, називаються ізопараметричними. У сучасних програмних комплексах звичайно застосовуються шестигранні ізопараметричні криволінійні КЕ засновані на функціях форм серендипового сімейства елементів.

На площині повинна збігатися кількість вузлів і ступенів вільності на грані об'ємного елемента. Це восьми вузловий квадратичний елемент із трьома ступенями вільності у вузлі. У роботі був використаний об'ємний елемент SOLID95 двадцяти вузловий із трьома ступенями вільності у вузлі. Дані операції виконувалися для створення впорядкованої сітки в кінцевому результаті.

Після обертання площини навколо осі симетрії було отримано тривимірне вісисиметричне тіло (рис. 3).

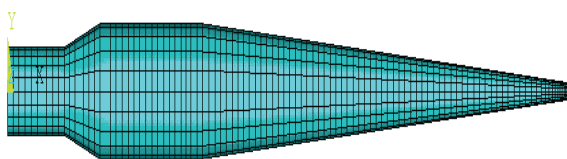


Рисунок 3 – Об'ємна модель інструмента

NODAL SOLUTION  
STEP=1  
SUB =16  
FREQ=23141  
USUM (AVG)  
RSYS=0  
DMX =9.528  
SMN =-.072823  
SMX =9.528

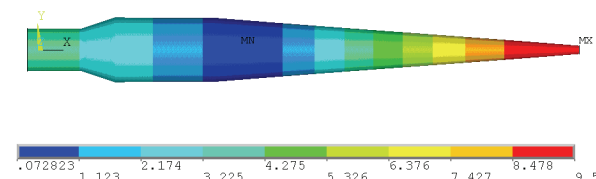


Рисунок 4 – Робоча форма коливань УЗІ

**Розрахунок робочої форми коливань УЗІ.** Частоти й форми коливань було отримано в результаті

розрахунку в ПК ANSYS методом Ланцоша.

Пошук частот проводився в діапазоні від 0 до 35000 Гц, куди потрапило 11 частот (табл. 2).

Таблиця 2 – Частоти, що знайдено у заданому діапазоні

Set	Frequency	Load Step	Substep	Cumulative
1	0.0000	1	1	1
2	0.0000	1	2	2
3	0.0000	1	3	3
4	0.0000	1	4	4
5	0.0000	1	5	5
6	4.67562E-03	1	6	6
7	4032.3	1	7	7
8	4032.3	1	8	8
9	8302.8	1	9	9
10	8302.8	1	10	10
11	13375.	1	11	11
12	13375.	1	12	12
13	18820.	1	13	13
14	18945.	1	14	14
15	18945.	1	15	15
16	23141.	1	16	16
17	25184.	1	17	17
18	25184.	1	18	18
19	27861.	1	19	19
20	32402.	1	20	20
21	32402.	1	21	21
22	35766.	1	22	22
23	37562.	1	23	23
24	40419.	1	24	24
25	40419.	1	25	25
26	42636.	1	26	26
27	48570.	1	27	27
28	48570.	1	28	28
29	51071.	1	29	29
30	51597.	1	30	30

Робочий режим коливань ультразвукового інструменту відбувається на частоті 23,141 кГц, а форма коливань УЗІ наведена на рис. 4.

**Висновки.** Проведено моделювання та розрахунок робочої частоти коливань вісисиметричного УЗІ на базі можливостей ПК ANSYS, що за допомогою спеціалізованого інтерфейсу було інтегровано у підсистему УЗІ трибологічної системи ультразвукового зварювання.

Подальші дослідження мають бути спрямовані на моделювання невісисиметричних УЗІ за допомогою спеціалізованих скінченних елементів [4], розробку та налаштування підсистеми вимушених коливань та подальшу інтеграцію нових підсистем з підсистемами трибологічної системи УЗЗ.

**Список літератури:** 1. *Ісаков С.М.* Трибосистема в якості моделі УЗ зварювання / *С.М. Ісаков* // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: Тези доповідей XXI міжнар. наук.-практ. конф., Ч.1 (Харків) / за ред. проф. Товажнянського Л.Л. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – 1 с. 2. *Автономова Л.В.* Управление параметрами технологического процесса структурносвязанной акустической системы / *Л.В. Автономова, С.Н. Ісаков* // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – Х.: 2008. – № 1/5 (31-2008). – С. 3-6. 3. *Ісаков С.Н.* Построение трибологической системы ультразвуковой сварки / *С.Н. Ісаков* // Вісник НТУ «ХПІ». Зб. наук. праць. Серія: Динаміка і міцність машин. – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – № 63 (1036). – С. 55-59. 4. *Isakov S.* Designing of ultrasonic waveguides in conditions of spatial oscillations / *S. Isakov, O. Kedrovskaya* // MicroCAD'99 "Information technologies: Science, Technique, Technology, Education, Health". – 1999. – Iss. 7, part 1. – P.293-299. 5. *Isakov S.* Adaptive Structures Optimization / *S. Isakov* // Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures – Fortschr.-Ber. – VDI Reihe 11 Nr. 268. – Düsseldorf: VDI Verlag 1998.- PP. 249-256.

**Bibliography (transliterated):** 1. Isakov S.M. Trybosistema v yakosti modeli UZ zvaryuvannya. Informatsiyni tekhnolohiyi: nauka, tekhnika, tekhnolohiya, osvita, zdorov'ya: Tezy dopovidey XXI mizhnar. nauk.-prakt. konf., Ch.1 (Kharkiv) za red. prof. Tovazhnyans'koho L.L. Kharkiv, NTU "KhPI" (2013): 1 p. 2. Avtonomova L.V., Isakov S.N. Upravlenie parametrami tehnologicheskogo processa strukturnosvjazannoy akusticheskoy sistemy. Vostochno-evropejskij zhurnalпередovyh tehnologij. Kharkiv 1/5 (2008): pp. 3-6. 3. Isakov S.N. Postroenie tribologicheskoy sistemy ul'trazvukovoy svarki. Visnyk NTU

"KhPI". Zb. nauk. prats'. Seriya: Dynamika i mitsnist' mashyn. Kharkiv: NTU "KhPI", 63 (1036). 2013. pp. 55-59. 4. Isakov S., Kedrovskaya O. Designing of ultrasonic waveguides in conditions of spatial oscillations. MicroCAD'99 Information technologies: Science, Technique, Technology, Education, Health. Iss. 7, part 1 (1999). pp. 293-299. 5. Isakov S. Adaptive Structures Optimization. Modelling and Control of Adaptive Mechanical Structures - Fortschr.-Ber. VDI Reihe 11. Nr. 268. Düsseldorf: VDI Verlag (1998). pp. 249-256.

Надійшла (received) 03.06.2016

*Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors*

**Isakov Serhii Mikolajovych** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, кафедра «Опір матеріалів», Національний технічний університет «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78. si@manoilgroup.com.

**Isakov Sergei** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Sr. Researcher, Department of Resistance of Materials, National Technical University "KhPI", tel.: (057) 707-69-78. si@manoilgroup.com.

**Isakov Oleksii Serhijovych** – аспірант, Національний технічний університет «ХПІ».

**Isakov Oleksii** – postgraduate, National Technical University "KhPI"

**Marusenko Svitlana Ivanivna** – науковий співробітник, кафедра «Опір матеріалів», Національний технічний університет «ХПІ», тел.: (057) 707-61-78.

**Marusenko Svitlana** – researcher, Department of Resistance of Materials, National Technical University "KhPI", tel.: (057) 707-61-78.