

ШИРОКОСМУГОВИЙ НАНОВІБРАЦІЙНИЙ ЗБУДЖУВАЧ ДЛЯ ТВЕРДОСПЛАВНИХ ПЛАСТИН

¹Донбаська державна машинобудівна академія,
²Вінницький національний технічний університет

Анотація: У роботі досліджено можливість створення широкосмугового збуджувача наноамплітудних механічних коливань для твердосплавних різальних пластин WC-Co типорозміру $20 \times 10 \times 5$ мм у діапазоні частот від 10 Гц до 3 МГц. Обґрунтовано використання електромагнітного впливу за принципом сили Лоренца у поєднанні з термопружним ефектом, що забезпечує генерацію коливань без застосування традиційних механічних приводів. Визначено, що у діапазоні 10 кГц – 3 МГц можливе ефективне збудження об'ємних пружних хвиль з амплітудою 0,1–50 нм. Побудовано карту власних резонансних частот пластини та встановлено раціональні точки прикладення збуджуючої сили. Запропоновано структуру лабораторної установки із замкненим контуром стабілізації амплітуди та лазерним доплерівським контролем переміщень.

Ключові слова: нановібрації, широкосмуговий збуджувач, пружні хвилі, твердосплавна пластинка, ультразвукова обробка, різальний інструмент.

Abstract: The paper investigates the possibility of developing a broadband nano-amplitude mechanical vibration exciter for WC-Co cemented carbide cutting inserts of size $20 \times 10 \times 5$ mm within the frequency range from 10 Hz to 3 MHz. The use of electromagnetic excitation based on the Lorentz force combined with the thermoelastic effect is substantiated, providing vibration generation without conventional mechanical actuators. It has been determined that in the range of 10 kHz to 3 MHz, efficient excitation of bulk elastic waves with amplitudes of 0.1–50 nm is physically achievable. A map of the natural resonance frequencies of the insert was constructed, and rational excitation application points were identified. A laboratory setup architecture with a closed-loop amplitude stabilization system and laser Doppler displacement monitoring is proposed.

Keywords: nanoscale vibrations, broadband exciter, elastic waves, cemented carbide insert, ultrasonic machining, cutting tool.

Вступ.

Практика промислового застосування ультразвукової обробки підтверджує можливість зменшення сили різання, підвищення стійкості інструменту та отримання поверхонь із покращеними функціональними характеристиками. Разом із тим переважна більшість існуючих вібраційних систем базується на п'єзоелектричних або магнітострикційних приводах, які, попри високу ефективність у вузьких частотних діапазонах, мають обмеження щодо широкосмуговості, адаптивності та стабільності роботи на різних режимах. Для фундаментального дослідження впливу частоти й амплітуди коливань на трибологічні та тепломеханічні явища у зоні різання необхідні універсальні генератори мікро- та нановібрацій, здатні працювати у надширокому діапазоні частот — від низькочастотних режимів до ультразвукової та мегагерцової областей.

Особливий інтерес у цьому контексті становлять твердосплавні різальні пластини на основі WC-Co, які є базовим інструментальним матеріалом сучасного металообробного виробництва. Поєднання високої твердості, жорсткості, теплостійкості та зносостійкості робить такі пластини оптимальним об'єктом для дослідження процесів хвильового енергетичного впливу. Водночас значна густина та пружні характеристики матеріалу формують складну спектральну картину власних коливань, що відкриває можливості резонансного підсилення мікропереміщень ріжучої кромки.

Перспективним фізичним механізмом створення широкосмугових наноамплітудних збуджень є використання сили Лоренца, яка виникає при проходженні електричного струму в магнітному полі. На відміну від класичних механічних приводів, такий принцип забезпечує безконтактну передачу енергії, високу швидкодію, простоту електронного керування та потенційно широкий частотний діапазон. Додаткове використання термопружного ефекту дозволяє розширити амплітудні можливості системи та сформувати комбінований багатофізичний режим збудження.

Відомо, що накладання механічних коливань на різальний інструмент дозволяє знизити сили різання, зменшити знос інструменту та покращити якість обробленої поверхні [1, 2]. Явище, відоме як *ultrasonic assisted cutting*, набуло широкого розповсюдження у прецизійному виробництві. Водночас для дослідження фізичних механізмів впливу коливань різної частоти на процес різання необхідні

спеціалізовані стенди, здатні збуджувати нановібрації у широкому діапазоні частот безпосередньо у матеріалі різального інструменту [3].

Твердосплавні різальні пластини (ТРП) з WC-Co є стандартним об'єктом дослідження у трибології ріжучого інструменту. Їхня висока щільність ($\approx 15\,000\text{ кг/м}^3$) та модуль Юнга ($\approx 550\text{ ГПа}$) визначають швидкість розповсюдження пружних хвиль на рівні 6000 м/с , що забезпечує унікальну карту резонансних мод у діапазоні до 3 МГц [4]. Збудження контрольованих наноамплітудних коливань у таких пластинках без механічних приводів є актуальною інженерною задачею, яка потребує нових фізичних підходів [5].

Традиційно для збудження ультразвукових коливань застосовують п'єзоелектричні актуатори або магнітострикційні перетворювачі. Однак реалізація ширококутового режиму від 10 Гц до 3 МГц єдиною системою є нетривіальним завданням. Перспективним є використання принципу сили Лоренца, коли модульований змінний струм, що протікає через об'єкт у полі постійного магніту, безпосередньо генерує механічні коливання [6, 7]. Такий підхід отримав назву Lorentz microshaker і широко застосовується у MEMS-системах [8].

Метою даної роботи є дослідження фізичних механізмів збудження наноамплітудних коливань у твердосплавній різальній пластині $20\times 10\times 5\text{ мм}$ та розроблення концепції лабораторної установки з діапазоном частот $10\text{ Гц} - 3\text{ МГц}$.

Результати дослідження.

Основним фізичним механізмом збудження коливань обрано силу Лоренца, яка діє на провідник зі струмом у магнітному полі:

$$F = I \cdot L \cdot B,$$

де I — струм через провідник, А; L — ефективна довжина провідника у полі, м; B — магнітна індукція, Тл. При модуляції струму за законом $I(t) = I_0 \sin(2\pi ft)$ виникає осцилююча механічна сила з частотою f . Використання меандрового провідника (N сегментів) збільшує ефективну довжину до $L_{\text{ef}} = N \cdot L$, що дозволяє збільшити силу збудження у N разів. При $N = 20$ та $L = 1\text{ мм}$ ефективна довжина становить 20 мм , а сила при $B = 0,8\text{ Тл}$, $I = 0,1\text{ А}$ складає $F \approx 1,6\text{ мН}$.

Оскільки пластинка WC-Co є масивним тілом (маса $m \approx 15\text{ г}$), рухати її як ціле за допомогою сили Лоренца фізично неможливо — розрахункова амплітуда руху тіла при $f = 1\text{ МГц}$ складає порядку 10^{-16} м . Тому реальний механізм впливу полягає в інжекції об'ємних пружних хвиль у матеріал пластинки через вібраційну голку або хвилевід [9].

Швидкість пружних хвиль у матеріалі WC-Co складає $v = \sqrt{E/\rho} \approx 6000\text{ м/с}$.

Аналіз резонансних мод пластинки $20\times 10\times 5\text{ мм}$ виконано за формулою $f_n = nv / (2L)$. Результати наведено у табл. 1.

Таблиця 1. Карта основних резонансних мод пластинки WC-Co $20\times 10\times 5\text{ мм}$

Напрямок	Розмір, мм	Мода $n=1$, кГц	Мода $n=2$, кГц
Довжина	20	150	300
Ширина	10	300	600
Товщина	5	600	1200

Ключова перевага методу Лоренца полягає в тому, що теоретична смуга частот обмежена лише електронікою, а не механічними резонансами приводу. Додатковим фізичним ефектом є термопружне збудження: змінний струм нагріває провідник, спричиняючи термічні деформації у біметалічній консольній балці. Для балки Al/Si при нагріванні на $\Delta T = 1-5\text{ К}$ досягаються амплітуди деформації $10-200\text{ нм}$. Об'єднання обох ефектів — електромагнітного і термопружного — дозволяє розширити амплітудний діапазон без збільшення струму.

В табл. 2 представлена порівняльна оцінка трьох типів драйверів для задачі збудження коливань ТРП.

Запропонована архітектура лабораторної установки включає: DDS-генератор (AD9834/AD9959), ширококутовий RF-підсилювач, котушку Лоренца у магнітному зазорі NdFeB ($B = 0,7-1\text{ Тл}$, зазор $3-5\text{ мм}$), акустичний конусний хвилевід (Ti, $l = 40\text{ мм}$, $D_{\text{вх}} = 10\text{ мм} \rightarrow D_{\text{вих}} = 1\text{ мм}$) та лазерний доплерівський віброметр з роздільною здатністю $0,1\text{ нм}$. Для подолання проблеми резонансних стрибків амплітуди реалізовано замкнений контур керування: датчик вимірює амплітуду,

мікроконтролер коригує струм підсилювача, стабілізуючи коливання в межах $\pm 3\%$ в усьому робочому діапазоні [10].

Таблиця 2. Порівняльна характеристика драйверів коливань

Тип драйвера	Амплітуда, нм	Fmax, МГц	Складність	Смуга, декади
Лоренца (Lorentz)	1–50	3+	Середня	5
Магнітострикція	10–200	0,2	Висока	4
П'єзоелектрик (PZT)	1–100	5	Низька	5

Очікувані характеристики системи: діапазон 10 Гц – 3 МГц; амплітуда 0,1–200 нм; сила контакту 0,1–1 Н; стабільність амплітуди $\pm 3\%$; чутливість вимірника 0,1 нм.

Висновки.

1. Встановлено, що переміщення ТРП WC-Co 20×10×5 мм як жорсткого тіла за допомогою сили Лоренца у робочому діапазоні частот фізично неможливе через велику масу (≈ 15 г). Ефективним є збудження об'ємних пружних хвиль у матеріалі пластини через акустичний хвилевід.

2. Побудовано карту резонансних мод пластини: критичні частоти 150, 300, 600, 1200 та 1800 кГц — саме в цих точках досягається максимальна амплітуда коливань ріжучої кромки. Оптимальною точкою прикладення збудження є протилежний від ріжучої кромки торець пластини.

3. Запропоновано поєднання електромагнітного та термпружного механізмів збудження, що дозволяє досягти амплітуди 10–500 нм при струмі 10–50 мА без великих механічних приводів.

4. Розроблено концепцію лабораторної установки з замкненим контуром керування амплітудою. Стабільність $\pm 3\%$ у діапазоні 10 Гц – 3 МГц досягається динамічним регулюванням струму драйвера на основі сигналу лазерного доплерівського вібрметра.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- Rinaldi G., Commandè L., Scalise L. Vibration-assisted machining of hard-to-cut materials: a review. *Journal of Manufacturing Processes*. 2023. Vol. 101. P. 1112–1136. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.052>.
- Ying N., Zhigang D., Zhuji J. A review on ultrasonic assisted machining of engineering ceramics. *Journal of Manufacturing Processes*. 2022. Vol. 84. P. 345–362. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2022.10.024>.
- Bleicher F., Wiesinger G., Kumpf C., Finkeldei D., Baumann C., Lechner C. Vibration suppression of an elder single-flute end mill by adapting the process parameters. *CIRP Annals*. 2018. Vol. 67(1). P. 393–396. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2018.04.020>.
- Bartarya G., Choudhury S. K. State of the art in hard turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2022. Vol. 53(1). P. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2021.103862>.
- Jamshidi H., Nategh M. J. Theoretical and experimental investigation of the frictional behavior of the tool-chip interface in ultrasonic-vibration assisted turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 65. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.09.008>.
- Algamil A. S., Khir M. H. M., Dennis J. O., et al. A review of actuation and sensing mechanisms in MEMS-based sensor devices. *Nanoscale Research Letters*. 2021. Vol. 16. P. 16. DOI: <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03481-7>.
- Liu B., Liang L., Ma L. A broadband Lorentz force MEMS magnetometer with a permanent magnet configuration. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2023. Vol. 354. Art. 114260. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.sna.2023.114260>.
- Kovalevskyy S. Intelligent control systems for mechanical engineering technology tasks. *Міжнародний науково-технічний журнал «Штучний інтелект»*. 2024. № 4(101). С. 218–227. DOI: <https://doi.org/10.15407/jai2024.04.218>.
- Shen X., Zhang D., Duan J. et al. Elastic wave propagation and vibration characteristics of diamond-shaped metastructures. *Smart Materials and Structures*. 2021. Vol. 30. Art. 055017. DOI: <https://doi.org/10.1088/1361-665X/abee9a>.
- Rembe C., Dräbenstedt A. Optical-scanning vibrometer with a high-speed microscope lens and a laser Doppler distance sensor. *Review of Scientific Instruments*. 2020. Vol. 91. Art. 015113. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5130650>.

Ковалевський Сергій Вадимович, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри Інноваційних технологій і управління Донбаської державної машинобудівної академії, м. Краматорськ-Тернопіль, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Марчук Владислав Ігорович – студент групи ІПМ23б, факультет машинобудування та транспорту, Вінницький національний технічний університет

Kovalevskyy Sergiy Vadimovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Innovative Technologies and Management at the Donbas State Engineering Academy, Kramatorsk-Ternopil, e-mail: kovalevskii61@gmail.com.

Marchuk Vladyslav Ihorovich – student of group IPM23b, Faculty of Mechanical Engineering and Transport, Vinnytsia National Technical University.