

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ТОМАШЕВСЬКИЙ ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ

УДК 621.914

ДИСЕРТАЦІЯ

**«ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПАЗІВ НА ПОВЕРХНЯХ
ВИРОБІВ З НІКЕЛІДУ ТИТАНУ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ»**

Спеціальність 131 «Прикладна механіка»

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

_____ / О.О. Томашевський

Науковий керівник: **БАЛИЦЬКА Наталія Олександрівна**, кандидат технічних наук, доцент

Житомир – 2026

АНОТАЦІЯ

Томашевський О.О. Технологічне забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка». – Державний університет «Житомирська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Житомир, 2026.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню актуальної науково-прикладної задачі технологічного забезпечення якості пазів на поверхнях виробів із нікеліду титану при мікрофрезеруванні шляхом встановлення закономірностей впливу режимів різання, масштабного ефекту, силових, температурних та вібраційних характеристик процесу на формування показників якості пазів.

Зміст дисертаційного дослідження викладено у чотирьох розділах, в яких представлені та обґрунтовані основні результати роботи, що отримані при експериментально-лабораторних дослідженнях та скінченно-елементному моделюванні процесу мікрофрезерування сплаву NiTi мікрофрезами діаметром 0,2 та 0,5 мм 1 мм.

У вступі обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мету, предмет та об'єкт дослідження; вказано поставлені завдання; представлено інформацію про наукову новизну та практичне значення отриманих результатів, їх апробацію та наукові публікації за напрямком роботи.

У першому розділі виконано аналіз сучасного стану досліджень процесу мікрофрезерування сплаву NiTi, розглянуто фізико-механічні та термодинамічні властивості нікеліду титану, фізичні механізми процесу мікрофрезерування, особливості стружкоутворення та утворення заусенців, прояв масштабного ефекту, значення сил різання, температурних та

вібраційних характеристик. Проаналізовано сучасні підходи до скінченно-елементного моделювання процесів мікрорізання та методи оцінювання якості пазів. Встановлено, що у науковій літературі недостатньо дослідженими залишаються питання комплексного взаємозв'язку між режимами різання, масштабним ефектом, силами різання, температурами стружки, динамічною стабільністю процесу та показниками якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi.

У другому розділі розроблено методики експериментальних досліджень та скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплаву NiTi. Розроблено методики вимірювання сил різання, вібраційних сигналів, параметрів шорсткості, визначення показників якості пазів та оптимізації режимів різання. Для проведення експериментів використано вертикально-фрезерні верстати DMU 80 eVo Deckel Maho та HAAS VF-2SSYT-NG, твердосплавні кінцеві мікрофрези GARANT Master Titan з покриттям TiAlN діаметром 0,2, 0,5 та 1 мм, а також вимірювальний комплекс на базі динамометра Kistler 9257B, аналого-цифрового перетворювач Goldammer USB-Basic G0S-1034-4, підсилювач аналогового вихідного сигналу Kistler 5070 та ПК з програмним забезпеченням DIAdem. Для оцінювання шорсткості та геометричних параметрів пазів використано оптичний профілометр Keyence VR-6000. Розроблено методику скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування з урахуванням контактної взаємодії інструмента і заготовки, тепловиділення та адаптивного перебудовування сітки скінченних елементів, що дозволило визначати сили різання та температури стружки у широкому діапазоні режимів різання.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень та скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування пазів у сплаві NiTi. Встановлено закономірності зміни складових сил різання R_x , R_y , R_z та рівнодійної сили різання R залежно від параметрів режиму різання і діаметра інструмента. Показано, що домінуючою складовою сили різання є R_y , а збільшення глибини різання та подачі на зуб призводить до суттєвого зростання

силового навантаження на інструмент. Максимальне значення рівнодійної сили різання при експериментальних дослідженнях становило 54,8 Н для фрези Ø1 мм при глибині різання $t=0,2$ мм, подачі $S_z=0,003$ мм/зуб та швидкості різання $V=20$ м/хв, тоді як для фрези Ø0,2 мм значення сили зменшувалось до 1,97 Н при $t=0,1$ мм, $S_z=0,00002$ мм/зуб та $V=11,3$ м/хв.

Виконано порівняння результатів скінченно-елементного моделювання та експериментальних досліджень процесу мікрофрезерування сплаву NiTi, за результатами якого встановлено, що середня похибка складала 13,17%, а максимальна – 37,5% що підтверджує адекватність розробленої скінченно-елементної моделі.

На основі скінченно-елементного моделювання досліджено залежність питомої сили різання від масштабного коефіцієнта k_m . Встановлено, що при зменшенні масштабного коефіцієнта відбувається різке нелінійне зростання питомих сил різання, які гіпотетично можуть досягати значень до 3100 ГПа, що пояснюється переходом від процесу зрізання матеріалу до переважного пластичного деформування та проявом ефекту пластичного витіснення матеріалу (ploughing effect), характерного для умов, коли товщина зрізу наближається до мінімальної товщини стружки. Визначено, що для забезпечення стабільного стружкоутворення та зниження енергетичних витрат масштабний коефіцієнт доцільно підтримувати на рівні не менше 0,1, а оптимально – понад 0,5.

Встановлено, що збільшення швидкості різання призводить до зростання рівня вібраційних навантажень та появи додаткових високочастотних гармонік у спектрі коливань, що негативно впливає на динамічну стабільність процесу, геометричну точність пазів та шорсткість поверхні. Аналіз показників якості пазів показав, що зі збільшенням глибини різання та подачі на зуб спостерігається погіршення параметрів шорсткості поверхні, збільшення відхилень ширини та глибини пазів, а також утворення заусенців. Встановлено, що фреза Ø1 мм забезпечують більш стабільний процес різання та нижчі

значення шорсткості поверхні завдяки більшій жорсткості інструмента та зменшенню його прогину.

У четвертому розділі виконано дисперсійно-регресійний аналіз результатів досліджень та побудовано багатофакторні регресійні моделі для опису залежностей сил різання, температур, вібраційних характеристик і показників якості пазів від параметрів режиму різання. Встановлено, що складові сили різання та рівнодійна сила визначаються переважно глибиною різання, внесок якої становить до 98–99 %, тоді як питома сила різання визначається головним чином подачею на зуб із внеском до 90 %, що підтверджує визначальний вплив масштабного ефекту на енергетичні характеристики процесу мікрофрезерування. Температура стружки формується переважно під впливом глибини різання та швидкості різання, а вібраційні характеристики процесу визначаються головним чином швидкістю різання.

На основі багатокритеріальної оптимізації із використанням функції бажаності Харрінгтона визначено оптимальні режими різання з урахуванням сукупності критеріїв якості пазів. Встановлено, що однакові значення швидкості видалення матеріалу не гарантують однакових умов стружкоутворення та якості оброблених пазів, оскільки процес мікрофрезерування суттєво залежить від співвідношення подачі на зуб і радіуса різальної кромки інструмента, яке визначає механізм формування стружки та прояв масштабного ефекту. Розроблено рекомендації щодо вибору режимів різання залежно від вимог до точності пазів, шорсткості поверхні та продуктивності процесу.

Отримані результати мають важливе наукове та практичне значення для розвитку технологічних процесів мікрообробки в різних галузях промисловості, зокрема при виготовленні високоточних елементів із сплавів NiTi для біомедичної техніки, авіаційної та приладобудівної галузей. Встановлені закономірності впливу режимів різання, масштабного ефекту, силових, температурних і вібраційних характеристик на формування якості пазів розширюють наукові уявлення про фізичні механізми процесу

мікрофрезерування нітинолу. Впровадження розроблених рекомендацій у виробництво забезпечить підвищення ефективності процесу мікрофрезерування пазів із сплаву NiTi за рахунок покращення якості поверхні, підвищення геометричної точності пазів, зменшення розмірів заусенців, зниження силових та вібраційних навантажень, а також підвищення стабільності процесу різання та стійкості мікроінструмента.

Ключові слова: мікрофрезерування, фрезерування, фреза, нікелід титану, сили різання, температури стружки, вібрації, стружкоутворення, скінченно-елементне моделювання, шорсткість, заусенці, якість пазів.

ABSTRACT

Tomashevskyi O.O. Technological quality control of grooves on the surfaces of titanium-nickel alloy products during micro-milling – Qualifying scientific work as a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in the specialty 131 «Applied Mechanics». – Zhytomyr Polytechnic State University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr, 2026.

The dissertation is devoted to solving the relevant scientific and applied problem of ensuring the quality of grooves on nickel-titanium alloy (NiTi) surfaces during micro-milling by establishing the relationships between cutting conditions, scale effect, cutting force, temperature, and vibration characteristics of the process and the resulting groove quality parameters.

The dissertation consists of four chapters presenting and substantiating the main results obtained through experimental investigations and finite element modeling of the micro-milling process of NiTi alloy using micro-end mills with diameters of 0.2, 0.5, and 1.0 mm.

The introduction substantiates the relevance of the research topic, formulates the aim, object, and subject of the study, defines the research objectives, and presents

the scientific novelty, practical significance, approbation, and publications related to the dissertation topic.

The first chapter analyzes the current state of research on the micro-milling of NiTi alloys. The physical, mechanical, and thermodynamic properties of nickel-titanium alloy, the physical mechanisms of micro-milling, chip formation, burr formation, scale effect, cutting forces, temperatures, and vibration characteristics are reviewed. Modern approaches to finite element modeling of micro-cutting processes and methods for evaluating groove quality are analyzed. It is established that the scientific literature still lacks comprehensive investigations into the interrelationships among cutting parameters, the size effect, cutting forces, chip temperatures, process dynamic stability, and groove quality characteristics during the micro-milling of NiTi alloys.

The second chapter presents the methodology of experimental investigations and finite element modeling of NiTi micro-milling. Methods for measuring cutting forces, vibration signals, surface roughness parameters, groove quality indicators, and cutting condition optimization are developed. Experimental investigations were carried out using DMU 80 eVo Deckel Maho and HAAS VF-2SSYT-NG machining centers, GARANT Master Titan solid carbide end mills with TiAlN coating and diameters of 0.2, 0.5, and 1.0 mm, as well as a measuring system based on a Kistler 9257B dynamometer, a Goldammer USB-Basic G0S-1034-4 analog-to-digital converter, a Kistler 5070 charge amplifier, and DIAdem software. A Keyence VR-6000 optical profilometer was used for evaluating groove roughness and geometric parameters. A finite element modeling methodology for the micro-milling process was developed, taking into account tool–workpiece contact interaction, heat generation, and adaptive mesh remeshing. This methodology enabled the prediction of cutting forces and chip temperatures over a wide range of cutting conditions.

The third chapter presents the results of experimental investigations and finite element simulations of groove micro-milling in NiTi alloy. The relationships between cutting force components P_x , P_y , P_z and the resultant cutting force R , cutting conditions, and tool diameter were established. It was shown that P_y is the dominant

cutting force component, while increasing the depth of cut and feed per tooth significantly increases the cutting load on the tool. The maximum resultant cutting force obtained experimentally reached 54.8 N for a 1 mm diameter end mill at a depth of cut of 0.2 mm, feed per tooth of 0.003 mm/tooth, and cutting speed of 20 m/min, whereas for a 0.2 mm diameter end mill the resultant force decreased to 1.97 N at a depth of cut of 0.1 mm, feed per tooth of 0.00002 mm/tooth, and cutting speed of 11.3 m/min.

A comparison between the results of finite element simulations and experimental investigations of the NiTi micro-milling process was carried out. The results showed that the average error was 13.17%, while the maximum error reached 37.5%, confirming the adequacy of the developed finite element model.

The dependence of specific cutting force on the scale coefficient k_m was investigated using finite element simulations. It was established that a decrease in the scale coefficient leads to a sharp nonlinear increase in the specific cutting forces, which may hypothetically reach values of up to 3100 GPa. This behavior is attributed to the transition from a material shearing mechanism to predominantly plastic deformation and the manifestation of the ploughing effect, which is characteristic of cutting conditions where the undeformed chip thickness approaches the minimum chip thickness. It was determined that to ensure stable chip formation and reduce energy consumption, the scale coefficient should be maintained above 0.1 and preferably above 0.5.

It was established that increasing the cutting speed leads to higher vibration levels and the appearance of additional high-frequency harmonics in the vibration spectrum, adversely affecting process dynamic stability, groove geometric accuracy, and surface roughness. Analysis of groove quality indicators showed that increasing the depth of cut and feed per tooth results in deterioration of surface roughness, increased deviations in groove width and depth, and more intensive burr formation. It was also found that 1 mm diameter end mills provide a more stable cutting process and lower surface roughness values due to their higher stiffness and reduced deflection.

The fourth chapter presents the analysis of variance and regression analysis of the obtained results and the development of multifactor regression models describing the relationships between cutting forces, temperatures, vibration characteristics, groove quality indicators, and cutting conditions. It was established that cutting force components and the resultant cutting force are primarily determined by the depth of cut, whose contribution reaches 98–99%, whereas the specific cutting force is mainly influenced by feed per tooth, with a contribution of up to 90%, confirming the dominant influence of the scale effect on the energy characteristics of the micro-milling process. The chip temperature was found to be primarily influenced by the depth of cut and cutting speed, whereas the vibration characteristics of the process were determined mainly by the cutting speed.

Based on multi-criteria optimization using the Harrington desirability function, optimal cutting conditions were identified considering the combined groove quality criteria. It was established that identical material removal rates do not guarantee identical chip formation conditions or groove quality, since the micro-milling process is strongly dependent on the ratio between feed per tooth and cutting-edge radius. This ratio governs the chip formation mechanism and the manifestation of the size effect.

Recommendations were developed for the selection of cutting parameters according to the required groove accuracy, surface roughness, and process productivity. The obtained results have significant scientific and practical value for the development of micro-machining technologies in various industrial fields, particularly in the manufacturing of high-precision NiTi components for biomedical, aerospace, and instrumentation applications. The established relationships between cutting conditions, scale effect, cutting force, temperature, and vibration characteristics and groove quality formation expand the scientific understanding of the physical mechanisms governing NiTi micro-milling. Implementation of the developed recommendations will improve the efficiency of NiTi groove micro-milling by enhancing surface quality, improving geometric accuracy, reducing burr

dimensions, decreasing force and vibration loads, and increasing process stability and tool life.

Keywords: micro-milling, milling, milling cutter, nickel-titanium alloy, cutting forces, chip temperatures, vibrations, chip formation, finite element modeling, surface roughness, burrs, groove quality.

Список публікацій здобувача

1. Наукові праці, в яких опубліковано основні наукові результати дисертації

Стаття опублікована у журналі, що індексується в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science

1. Balytska, N. O., Tomashevskiy, O. O., & Shadura, V. A. (2025). Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling. *Journal of Engineering Sciences*, 12(1), A20–A27. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3)

Загальний обсяг 0.9 друк. арк., особисто автору належить 0.4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у виконанні скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплавів NiTi, визначенні сил різання та температурних полів, аналізі результатів моделювання, підготовці графічних матеріалів.

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

2. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2023). Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд. *Технічна інженерія*, 2(92), 74–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88).

Загальний обсяг 1.6 друк. арк., особисто автору належить 0.8 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у проведенні аналізу наукових джерел з проблематики мікрофрезерування металів і сплавів, узагальненні результатів досліджень та підготовці основної частини рукопису статті.)

3. Томашевський, О. О., Балицька, Н. О., & Прилипка, О. І. (2024). Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу. *Технічна інженерія*, 1(93), 81–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88).

Загальний обсяг 0.7 друк. арк., особисто автору належить 0.3 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у розробленні скінченно-елементної моделі процесу мікрофрезерування нітинолу, постановці задачі моделювання, аналізі сил різання та температурних полів, обробці отриманих результатів, підготовці графічних матеріалів.

4. Балицька Н.О., Томашевський О.О. (2025) Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах на основі скінченно-елементного моделювання. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 351 (3.1), 35-43. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-4>.

Загальний обсяг 0.9 друк. арк., особисто автору належить 0.4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у проведенні скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах, визначенні сил різання та температурних полів, виконанні порівняльного аналізу отриманих результатів і підготовці графічного матеріалу.

5. Томашевський, О. О. (2026). Експериментальна оцінка вібрацій у процесі мікрофрезерування титанового сплаву. *Herald of Khmelnytskyi National*

University. Technical Sciences, 363(2), 649–657. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-85>. (заг. обсяг 0.8 друк. арк.)

2. *Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації*

1. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Механізм стружкоутворення при мікрофрезеруванні. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 9–10 листопада 2023 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С 104 – 105 с. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>.

Загальний обсяг 0.12 друк. арк., особисто автору належить 0.07 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі механізмів стружкоутворення при мікрофрезеруванні та підготовці матеріалів доповіді.

2. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Утворення задирок при мікрофрезеруванні нітинолу. Тези доп. Всеукр. наук.-практ. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2024. С. 125-126. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/sekcija-6.pdf>.

Загальний обсяг 0.13 друк. арк., особисто автору належить 0.08 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі причин утворення задирок під час мікрофрезерування нітинолу та підготовці висновків.

3. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Проблеми скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 24-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 26–27 червня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. С. 125 – 127. - URL: https://www.atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf.

Загальний обсяг 0.14 друк. арк., особисто автору належить 0.07 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в літературному аналізі та підготовці матеріалів доповіді.

4. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Особливості процесу мікрофрезерування. Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: Матеріали 25-го Міжнародного науково-технічного семінару, 25–26 березня 2025 р. – Київ: АТМ України, 2025. С. 158 – 160. - URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-25s.pdf>.

Загальний обсяг 0.14 друк. арк., особисто автору належить 0.07 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в узагальненні теоретичних положень щодо процесу мікрофрезерування, аналізі впливу масштабного ефекту на процес різання.

5. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Масштабний ефект при мікрофрезеруванні нітинолів. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 12-17 травня 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С.121. – URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/6.pdf>.

Загальний обсяг 0.09 друк. арк., особисто автору належить 0.05 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в дослідженні впливу співвідношення товщини зрізаного шару та радіуса округлення різальної кромки на процес мікрофрезерування сплавів NiTi та аналізі отриманих результатів.

6. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Сили і температури різання при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплаву NiTi. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 10-12 червня 2025 року. Київ : АТМ України, 2025. С. 102-104. – URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-25zb.pdf>.

Загальний обсяг 0.08 друк. арк., особисто автору належить 0.05 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у проведенні скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплавів NiTi, визначенні сил різання та температурних полів для різних фазових станів матеріалу й аналізі отриманих результатів.

7. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Питомі сили різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: Матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 11–13 листопада 2025 року. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. С. 128 – 129 с. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/128-1.pdf>.

Загальний обсяг 0.11 друк. арк., особисто автору належить 0.06 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у визначенні питомих сил різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi на основі результатів скінченно-елементного моделювання та аналізі прояву масштабного ефекту.

8. Томашевський О.О. Вібрації при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: Матеріали 26-го Міжнародного науково-технічного семінару, 31 березня – 02 квітня 2025 р. – Київ: АТМ України, 2026. С. 129 – 131. - URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/sl-26c.pdf>. (заг. обсяг 0.13 друк. арк.)

9. Томашевський О.О., Оліщук Н.О. Фактори, що впливають на якість пазів при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. Тези доп. Всеукр. наук.-практ. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2026. С. 259-260. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2026/06/sekcija-6.pdf>.

Загальний обсяг 0.1 друк. арк., особисто автору належить 0.08 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у дослідженні факторів, що впливають на якість пазів, аналізі експериментальних результатів.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	17
РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПАЗІВ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ.....	25
1.1. Мікрофрезерування, як перспективний метод обробки пазів на поверхнях виробів із сплаву NiTi	25
1.2. Фізико-механічні та термодинамічні властивості сплаву NiTi	30
1.3. Фізичні механізми та специфічні ефекти процесу мікрофрезерування сплаву NiTi.....	36
1.3.1. Механізм стружкоутворення та утворення заусенців	38
1.3.2. Масштабний ефект.....	44
1.3.3. Силкові та температурні характеристики процесу різання	48
1.3.4. Вібраційні явища та динамічна стабільність процесу мікрофрезерування	53
1.4. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрорізання сплаву NiTi	58
1.5. Якість формування пазів, як комплексна характеристика процесу мікрофрезерування.....	62
1.5.1. Основні показники якості пазів	65
1.5.2. Методи оцінювання якості пазів	68
1.5.3. Вплив режимів різання на показники якості пазів	71
1.6 Схема дослідження.....	72
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1.....	75
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ СПЛАВУ NiTi	77
2.1. Оброблюваний матеріал та підготовка заготовок для мікрофрезерування	77
2.2. Обладнання, інструменти та вимірювальне обладнання	78
2.3. Методики експериментальних досліджень	85
2.3.1.Методика вимірювання сил різання.....	87
2.3.2. Методика дослідження вібраційних сигналів	90
2.3.3. Методика визначення показників якості пазів.....	94
2.4. Методика скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування.....	95
2.5.Методика оптимізації режимів різання.....	104

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2.....	107
РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ ПАЗІВ У СПЛАВІВ NiTi.....	109
3.1. Складові та питомі сили різання.....	109
3.2. Температура стружки.....	122
3.3. Вібрації.....	125
3.4. Показники якості пазів	127
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3.....	141
РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПАЗІВ.....	144
4.1 Дисперсійно-регресійний аналіз результатів дослідження	144
4.1.1 Дисперсійно-регресійний аналіз сил різання	144
4.1.2 Дисперсійно-регресійний аналіз температур стружки.....	151
4.1.3 Дисперсійно-регресійний аналіз вібраційних прискорень	155
4.1.4 Дисперсійно-регресійний аналіз показників якості пазів	158
4.1.4.1 Дисперсійно-регресійний аналіз шорсткості дна пазів.....	158
4.1.4.2 Дисперсійно-регресійний аналіз показників геометричної точності пазів	162
4.1.4.3 Дисперсійно-регресійний аналіз розмірів заусенців	167
4.2. Оптимізація режимів різання для забезпечення якості пазів при мікрофрезеруванні.....	172
4.3 Рекомендації з призначення режимів різання для підвищення якості пазів	184
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4.....	188
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	190
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	
ДОДАТКИ	

ПЕРЕЛІК ПРИЙНЯТИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

NiTi – нікелід титану

V – швидкість різання, м/хв;

t – глибина різання, мм;

S_z – подача на зуб, мм/зуб;

P_x, P_y, P_z – складові сили різання вздовж осей X, Y та Z , Н

R – рівнодійна сила різання, Н

K – питома сила різання, ГПа

k_m – масштабний коефіцієнт

d – діаметр фрези, мм

Δb – відхилення ширини паза від номінального значення, мкм

Δh – відхилення глибини паза від номінального значення, мкм

α_L, α_R – кути нахилу лівої та правої бокових поверхонь паза, °

r_L, r_R – радіус заокруглення профілю з лівої та правої бокових поверхонь паза, мкм

h_{bL}, h_{bR} – висота заусенців на лівій та правій кромках паза, мкм

b_{bL}, b_{bR} – ширина заусенців на лівій та правій кромках паза, мкм

D – інтегральний показник бажаності Харрінгтона

АЦП – аналогово-цифровий перетворювач

R_a – середнє арифметичне відхилення профілю шорсткості, мкм;

RMS – середньоквадратичне значення вібраційного прискорення, м/с²

MRR – швидкість видалення матеріалу, мм³/хв

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні тенденції розвитку машинобудування, біомедичної техніки, мікромеханіки та приладобудування характеризуються постійною мініатюризацією виробів, ускладненням їх конструкції та підвищенням вимог до точності й якості мікророзмірних елементів. У зв'язку з цим зростає потреба у розробленні високоточних технологій обробки мікроелементів, в тому числі і із сучасних матеріалів з ефектом пам'яті форми. Одним із таких перспективних матеріалів є сплав нікеліду титану (NiTi).

NiTi є унікальним матеріалом, що поєднує властивості псевдопружності та ефекту пам'яті форми, завдяки чому знаходить широке застосування у біомедичних, авіаційних і прецизійних галузях промисловості. Водночас складна поведінка NiTi під час механічної обробки, обумовлена його високою міцністю, низькою теплопровідністю, інтенсивним деформаційним зміцненням і фазовою чутливістю, що значно ускладнює процес мікрофрезерування, зокрема при виготовленні пазів.

Мікрофрезерування є одним із методів високоточної обробки мікроелементів та формування пазів на виробах із сплаву NiTi. Однак процес мікрофрезерування пазів супроводжується рядом технологічних викликів: високими силами різання, інтенсивним зношенням і поломками інструменту, вібраціями, утворенням заусенців, а також значними температурними полями. Це суттєво ускладнює забезпечення необхідної якості пазів, зокрема їх геометричної точності, шорсткості поверхні та стабільності формоутворення. У зв'язку з цим виникає необхідність пошуку шляхів підвищення якості пазів, зменшення зношення інструменту та контролю температурних, силових характеристик процесу мікрофрезерування.

Значний обсяг наукових досліджень, присвячених процесам механічної обробки сплавів з ефектом пам'яті форми, зокрема нікеліду титану (NiTi), представлено у працях Weinert H.-J., Petzoldt T., Aslantaş K., Kaynak Y., Zainal Abidin Z., Segreto G., Obikawa T. та Kundiya R. У зазначених роботах

розглянуто закономірності процесу мікрофрезерування, формування поверхневого шару та особливості обробки сплаву NiTi, зокрема механізми стружкоутворення, формування сил різання, температур та методи моніторингу процесу різання. В Україні дослідження сплавів з ефектом пам'яті форми (NiTi) представлені у працях учених Житомирської політехніки а саме Мельничука П.П, Балицької Н.О. Окремий напрям досліджень представлений працями вчених НАН України, зокрема Ковалю Ю.М., Філатової В.С., Односума В.В., Щерецького О.А., Фірстова Г.С., Шелягіна В.Д., Бернацького А.В., Сіורי О.В., Кедровського С.М. та ін., у яких основну увагу приділено дослідженню фізико-механічних властивостей сплавів з ефектом пам'яті форми, закономірностей мартенситних перетворень, а також впливу лазерного зварювання на мікроструктуру, функціональні характеристики та ефект відновлення форми сплавів TiNi медичного призначення.

Разом з тим, аналіз науково-технічної літератури показує, що питання забезпечення якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi, зокрема з урахуванням масштабного ефекту, а також комплексного впливу режимів різання на геометричну точність, шорсткість поверхні та утворення заусенців, досліджені недостатньо повно. У більшості робіт розглядаються окремі аспекти процесу без встановлення узагальнених закономірностей формування якості мікроелементів.

Це зумовлює необхідність проведення системних досліджень, спрямованих на встановлення взаємозв'язку між параметрами режимів різання, масштабним ефектом та показниками якості пазів, а також розроблення науково обґрунтованих рекомендацій щодо забезпечення якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi, що і визначає актуальність даної науково-технічної задачі.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційне дослідження виконано у відповідності до: Постанови кабінету Міністрів України №476 від 30.04.2024 р. якою затверджено перелік пріоритетних напрямів наукових досліджень і науково-технічних розробок в

Україні, зокрема «Дослідження новітніх проблем механіки суцільного середовища і механіки машин»; Положень про організацію наукової, науково-технічної та інноваційної діяльності в Державному університеті «Житомирська політехніка» від 31.05.2019 р. №9/од.; держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка» «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстуруванням» (2023–2025 рр.), державний реєстраційний номер 0123U102013.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є технологічне забезпечення якості виготовлення пазів на поверхнях виробів зі сплаву NiTi методом мікрофрезерування шляхом керування режимами різання.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні **основні завдання**:

1. Здійснити аналітичний огляд наукових джерел щодо забезпечення якості пазів на поверхнях сплаву NiTi при мікрофрезеруванні та визначити основні фактори, відповідальні за якість обробки пазів;
2. Розробити методики та виконати експериментальні дослідження процесу мікрофрезерування сплаву NiTi, включаючи вимірювання сил різання, вібраційних сигналів та оцінювання якості пазів;
3. Розробити скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування пазів на поверхнях сплаву NiTi для визначення сил різання і температурних полів в широкому діапазоні режимів різання, встановлення закономірності зміни питомих сил різання залежно від масштабного коефіцієнту та визначення допустимих значень масштабного коефіцієнта;
4. Здійснити комплексний аналіз результатів досліджень процесу мікрофрезерування. Виконати дисперсійно-регресійний аналіз впливу режимів різання при мікрофрезеруванні на характеристики процесу різання та показники якості пазів;
5. Виконати оптимізацію режимів різання для підвищення якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi.

6. Розробити рекомендації щодо призначення режимів різання для підвищення якості обробки пазів на поверхнях виробів зі сплаву NiTi.

Об'єкт дослідження. Процес мікрофрезерування пазів на поверхнях виробів із аустенітного сплаву NiTi.

Предмет дослідження. Закономірності формування показників якості пазів на поверхнях сплаву NiTi при мікрофрезеруванні, а саме шорсткості, геометричної точності та розміру заусенців.

Методи дослідження. У роботі використано комплекс експериментальних, теоретичних та скінченно-елементних методів дослідження. Експериментальні дослідження процесу мікрофрезерування пазів у сплаві NiTi проводилися на вертикальних оброблювальних центрах DMU 80 eVo Deckel Maho та HAAS VF-2SSYT-NG. Вимірювання сил різання у системі координат верстата використовувався багатокомпонентний динамометр Kistler 9257B, підсилювача сигналу Kistler 5070, аналого-цифрового перетворювача Goldammer USB-Basic G0S-1034-4 та програмного забезпечення National Instruments DIAdem для реєстрації й обробки сигналів.

Дослідження вібраційних характеристик процесу мікрофрезерування виконувалось методом вібродіагностики із застосуванням п'єзоелектричного віброперетворювача ДН-3, аналого-цифрового перетворювача E20-10 L-Card та програмного забезпечення LGraph. Оцінка показників якості пазів проводилась методом оптичної профілометрії за допомогою 3D-профілометра KEYENCE VR-6000, що дозволило визначати параметри шорсткості, геометричної точності пазів та розміри заусенців.

Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування використовувалось для дослідження впливу масштабного ефекту на сили різання, температури стружки та умови стружкоутворення. Для встановлення закономірностей впливу режимів різання на показники якості пазів використано методи математичної статистики, дисперсійно-регресійного аналізу та багатокритеріальної оптимізації із застосуванням функції бажаності

Харрінгтона. Використані методи дослідження забезпечили достовірність отриманих результатів та обґрунтованість сформульованих висновків.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

Вперше на основі експериментальних досліджень та скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування пазів на поверхнях виробів зі сплаву NiTi встановлено взаємозв'язки між параметрами режиму мікрофрезерування, силами різання, температурами стружки, вібраціями та показниками якості оброблених пазів. Це дозволило визначити залежності прогнозування параметрів якості пазів залежно від параметрів режиму різання.

Вдосконалено підхід до встановлення закономірностей зміни питомих сил різання залежно від масштабного коефіцієнту на основі скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування аустенітного сплаву NiTi. Це дозволило визначити критичні значення масштабного коефіцієнта, які обумовлюють перехід від пластичного деформування до стабільного стружкоутворення в процесі різання.

Набули подальшого розвитку положення теорії мікрофрезерування сплавів NiTi, щодо визначення взаємозв'язків між режимами різання, силами різання, температурами стружки, вібраціями та параметрами якості оброблених пазів, що дозволяють оптимізувати режими різання та науково-обґрунтовано керувати якістю обробки пазів.

Практична значимість отриманих результатів визначається наступним:

Розроблено та валідовано скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування пазів на поверхнях виробів зі сплаву NiTi, яка дозволяє на основі врахування масштабного коефіцієнта визначати складові сили та температурні поля, а також питомі сили різання, та обґрунтовувати вибір режимів різання для забезпечення стабільного стружкоутворення;

Розроблено та верифіковано регресійні математичні моделі сил різання, температури стружки, вібраційного прискорення, шорсткості дна та показників геометричної точності пазів у сплавах NiTi при мікрофрезеруванні залежно від

режимів різання. Регресійні моделі мають високий рівень статистичної достовірності та придатні для прогнозування показників якості пазів та оптимізації режимів обробки на етапі технологічної підготовки виробництва;

Оптимізовано та експериментально апробовано режими мікрофрезерування пазів у сплавах NiTi, які забезпечують підвищення якості обробленої поверхні (зниження параметрів шорсткості, зменшення розмірів заусенців і підвищення геометричної точності).

Розроблено рекомендації щодо вибору режимів різання при мікрофрезеруванні пазів у сплавах NiTi з урахуванням вимог до якості поверхні. Отримані результати можуть бути використані при розробці технологічних процесів виготовлення деталей зі сплаву NiTi;

Результати досліджень впроваджено у навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка» при підготовці здобувачів освітніх ступенів «бакалавр» та «магістр» за спеціальностями G9 «Прикладна механіка» та G11.01 «Машинобудування (Верстати та інструменти)» при викладанні дисциплін «Теорія різання», «Прогресивні процеси обробки матеріалів» та «Робочі процеси високих технологій».

Дисертаційне дослідження виконано в рамках держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка» «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстуруванням» (202302025 pp.), державний реєстраційний номер 0123U102013.

Результати роботи були впроваджені в діяльність ТОВ «СОФ-Орто» та на підприємстві «Даніко» (м.Черняхів).

Особистий внесок здобувача полягає у самостійному формулюванні мети роботи та завдань дослідження, наукової концепції, розробці й реалізації комплексної методики для забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні. Автором виконано аналітичний огляд літературних джерел, що дозволило оцінити проблематику оброблюваності сплаву NiTi. Здобувачем проведено серію експериментально-лабораторних

досліджень з фіксування вібраційних сигналів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi, вимірювання показників якості пазів, зокрема параметрів шорсткості, геометричної точності (відхилення ширини та глибини пазів, кутів нахилу бокових поверхонь, радіусів заокруглення профілю) і розмірів заусенців, а також проведення скінченно-елементного моделювання. Наукові результати дисертаційного дослідження впроваджені у навчальний процес університету, виробничий процес ТОВ «СОФ-Орто» та у діяльності ТОВ «Даніко».

Апробація результатів дисертації. Результати досліджень доповідались та обговорювалися на 9 науково-технічних конференціях, у тому числі міжнародних: XII Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (2023, Житомир), Всеукраїнській науково-практичній online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій», присвяченій Дню науки (2024, Житомир), 24-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів» (2024, Київ), 25-му Міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті» (2025, Київ), Всеукраїнській науково-практичній online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій», присвяченій Дню науки (2025, Житомир), 25-й Міжнародній науково-технічній конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів» (2025, Київ), XIII Всеукраїнській науково-технічній конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (2025, Житомир), 26-му Міжнародному науково-технічному семінарі «Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті» (2026, Київ), Всеукраїнській науково-практичній online-конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених «Перспективи розвитку машинобудівної інженерії та транспортних технологій», присвяченій Дню науки (2026, Житомир).

Публікації. За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, із них: 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, що індексується в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, а також 9 публікацій апробаційного характеру в інших наукових виданнях.

Структура та обсяг дисертації. Повний обсяг дисертації становить 243 сторінок та включає 39 таблиць, 106 рисунків, список використаних джерел із 88 найменувань і 8 додатків.

РОЗДІЛ 1. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПАЗІВ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ

1.1. Мікрофрезерування, як перспективний метод обробки пазів на поверхнях виробів із сплаву NiTi

Сучасний розвиток високотехнологічних галузей промисловості, зокрема біомедичної техніки, мікромеханіки, робототехніки, MEMS-систем, авіакосмічного машинобудування та приладобудування, супроводжується постійним зростанням потреби у виготовленні мініатюрних елементів складної геометричної форми з високими вимогами до точності та якості поверхні [1–3]. Особливого поширення набули мікропази, мікроканали та інші функціональні елементи, які використовуються у медичних імплантах, мікроприводах, ендоскопічних системах, мікроактуаторах та елементах мікромеханічних систем. Значна частина таких виробів працює в умовах циклічного навантаження, контакту з агресивними середовищами або підвищених вимог до функціональної стабільності, що обумовлює необхідність використання матеріалів із високими експлуатаційними характеристиками.

Одним із найбільш перспективних матеріалів для виготовлення таких виробів є сплав нікеліду титану (NiTi), який поєднує ефект пам'яті форми, псевдопружність, високу корозійну стійкість, біосумісність та значну втому на міцність [1, 4, 5]. Завдяки комплексу функціональних властивостей сплави NiTi набули широкого застосування у біомедичній техніці, робототехніці, авіакосмічній галузі та мікромеханіці. Сучасні та перспективні сфери застосування сплавів із пам'яттю форми наведені в табл. 1.1.

Найбільшого поширення NiTi набув у біомедичній сфері, де його використовують для виготовлення судинних стентів, ортодонтичних дуг, скоб для фіксації кісткових фрагментів, катетерів, ендоскопічних систем та мікрохірургічних інструментів (рис. 1.1) [6, 7].

Таблиця 1.1

Сучасні та перспективні сфери застосування сплавів з пам'яттю форми [1]

Галузь застосування	Функція/вузол	Приклади застосування
Автомобілебудування	Двигун	Радіатор, муфта вентилятора, система керування двигуном, паливна форсунка
	Трансмісія	Система керування трансмісією
	Колеса/гальма/підвіска	Гальма, амортизатор, шина
	Кузов	Лампи, склоочисник, люк, бокове дзеркало, капот двигуна, спойлер
	Інтер'єр	Заднє оглядове вікно, подушки безпеки, панель приладів
Аерокосмічна галузь	Двигун	Впускний канал, ротор, сопло
	Корпус	Аеродинамічні конструкції, обшивка, крило, закінцівка крила, закрийлок
Робототехніка	Біоміметичні системи	Роботизовані системи з біоміметичними типами руху
	Біомедичні роботи	Ендоскопічні системи
	Гуманоїдні роботи	Роботизовані кисті, маніпулятори, елементи голови та системи імітації міміки
Біомедицина	Вироби та імплантати для серцево-судинної системи	Стенти, фільтри, клапани, аортальні конструкції
	Ортопедичні та травматологічні імплантати	Ендопротези, кісткові пластини, фіксатори, спиці
	Ортодонція	Брекети, скоби, піднебінні дуги, ендодонтичні файли
	Хірургічні інструменти	Катетери, ендоскопи, шовний матеріал
Телекомунікації	Антени	Щілинні радіочастотні антени

Для таких виробів особливо важливими є геометрична точність мікроелементів, стабільність поверхневого шару та відсутність дефектів, які можуть впливати на функціональні властивості виробу.

Сплави NiTi належать до важкооброблюваних матеріалів через високу пластичність, деформаційне зміцнення, низьку теплопровідність та значну адгезійну активність матеріалу. Унаслідок цього процес механічної обробки супроводжується інтенсивним зношуванням інструмента та складністю забезпечення стабільної якості поверхні.



Рис. 1.1 – Використання сплаву NiTi [7–10]

Для виготовлення мікроелементів зі сплавів NiTi застосовують різні методи мікрообробки, зокрема електроерозійну, лазерну, електрохімічну та механічну обробку (табл. 1.2).

Таблиця 1.2

Порівняльна характеристика основних методів мікрообробки сплавів NiTi [2]

Метод обробки	Основні переваги	Основні недоліки
Мікрофрезерування	Висока точність; можливість формування 3D-поверхонь; висока гнучкість процесу; відсутність значного термічного впливу	Утворення заусенців; вібрації; інтенсивне зношування інструмента
Електроерозійна обробка	Висока точність; можливість обробки твердих матеріалів	Термічний вплив на поверхневий шар; низька продуктивність
Лазерна обробка	Висока швидкість; безконтактна обробка	Зона термічного впливу; можливість утворення мікротріщин
Електрохімічна обробка	Відсутність механічних сил різання; висока якість поверхні	Складність контролю процесу; висока вартість обладнання

Однак методи, що супроводжуються значним тепловим впливом, можуть викликати зміну структури поверхневого шару, виникнення дефектів та погіршення функціональних властивостей матеріалу. Зокрема, при лазерній та електроерозійній обробці можливе формування зони термічного впливу, мікротріщин та локальних структурних змін поверхневого шару [1]. У зв'язку з цим одним із перспективних методів формування мікропрофільних поверхонь і пазів є мікрофрезерування [11, 12].

У роботах D. Dornfeld [2], а також J. Chae, S. S. Park і T. Freiheit [3] зазначено, що мікромеханічна обробка дозволяє формувати тривимірні поверхні складної геометрії та характеризується високою гнучкістю технологічного процесу. Додатковою перевагою процесу є відсутність значного термічного впливу на поверхневий шар матеріалу порівняно з лазерними або електроерозійними методами.

Однією з головних переваг мікрофрезерування є можливість формування мікропазів та мікроканалів у деталях складної конфігурації. У роботі K. Weinert та V. Petzoldt наведено результати мікрофрезерування пазів у сплавi NiTi (рис. 1.2) [13].

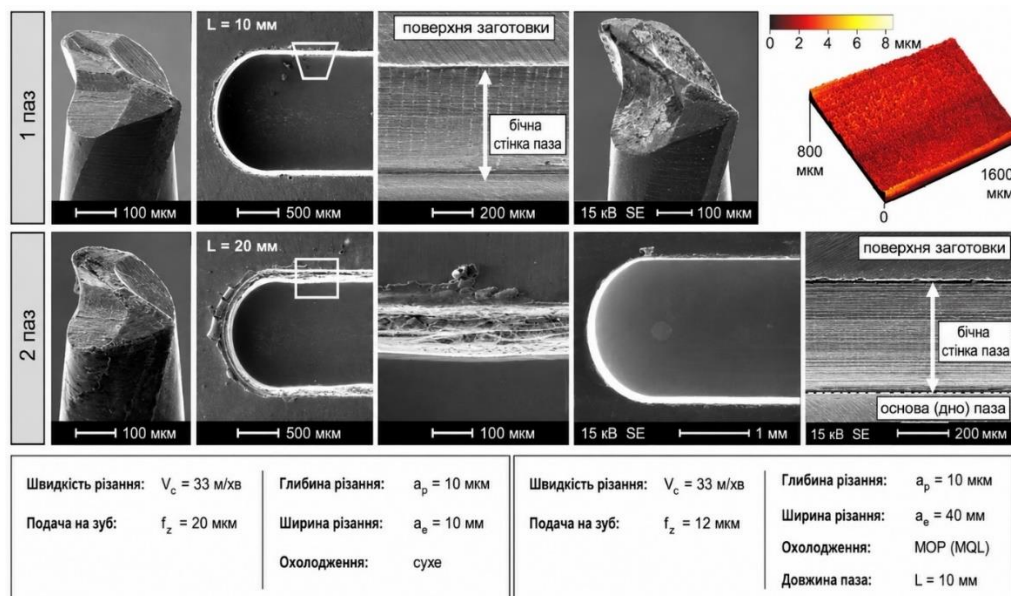


Рис. 1.2. – Результати мікрофрезерування пазів у сплавi NiTi при сухому різанні та при використанні мастильно-охолоджувальної рідини [13]

Значну увагу в сучасних дослідженнях приділено мікрофрезерному текстуруванню поверхонь біомедичних сплавів. Зокрема, у роботах [14–16] досліджено особливості формування функціональних мікроструктур на поверхнях сплавів NiTi, тоді як у роботах [17, 18] аналогічні підходи розглянуто для сплаву Ti-6Al-4V. Отримані результати підтверджують перспективність використання мікрофрезерування для керованої модифікації властивостей поверхневого шару виробів медичного призначення.

У роботі [14] наведено результати дослідження текстурування поверхонь, сформованих при мікрофрезеруванні сплаву NiTi мікрофрезою діаметром 1 мм (рис. 1.3).

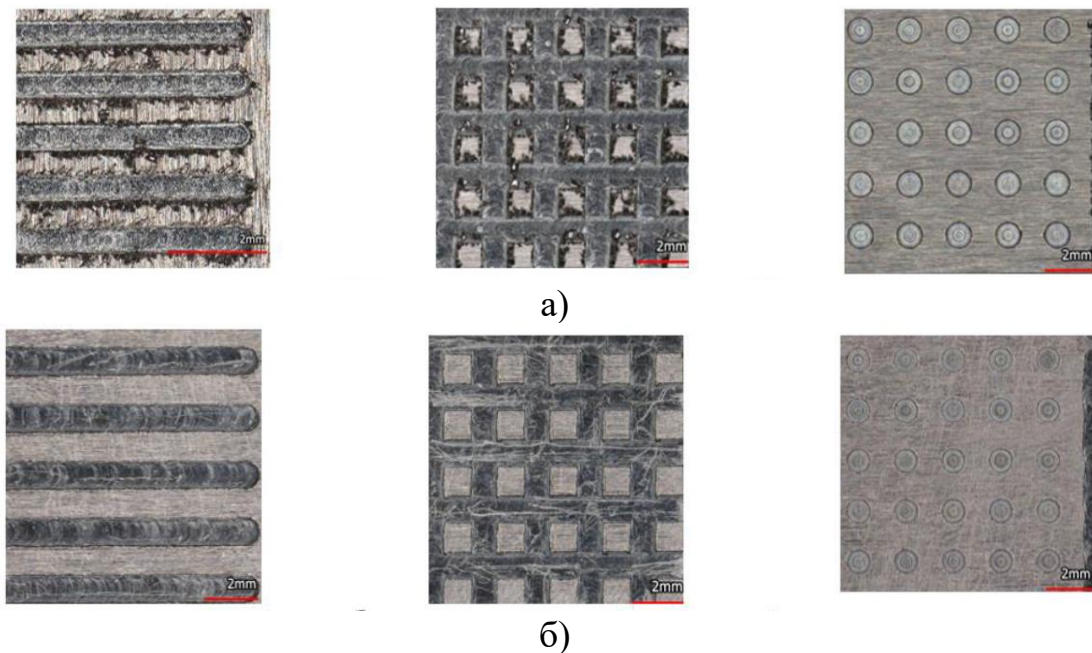


Рис. 1.3 – Поверхневі текстури, виготовлені мікрофрезою діаметром 1 мм, на поверхнях сплаву NiTi: а – мікрофрезеровані поверхневі текстури; б – поверхневі текстури після видалення заусенців [14]

На рис. 1.3 наведено поверхневі текстури, сформовані мікрофрезою діаметром 1 мм на поверхні сплаву NiTi до та після видалення заусенців. Аналіз топографії поверхонь показав, що процес мікрофрезерування супроводжується інтенсивним утворенням верхніх заусенців, особливо при формуванні мікропазів і мікростовпчиків. Встановлено, що найбільші заусенців

утворюються з боку входу зуба фрези в контакт із заготовкою, а їх висота може перевищувати висоту самих текстур. Найменше утворення заусенців спостерігається при формуванні мікроямок, що пояснюється осьовим напрямком подачі інструмента та більш сприятливими умовами стружкоутворення [14].

Незважаючи на значні переваги процесу, забезпечення високої якості пазів при мікрофрезеруванні сплавів NiTi залишається складною технологічною задачею. На якість сформованих поверхонь впливають фізико-механічні властивості матеріалу, умови формування стружки, зношування інструмента та параметри режиму різання. Особливо важливими є показники шорсткості, геометричної точності та інтенсивності утворення заусенців.

Таким чином, мікрофрезерування є одним із найбільш перспективних методів формування високоточних пазів і мікропрофільних поверхонь у виробках зі сплавів NiTi. Перевагами процесу є висока гнучкість, можливість формування складних тривимірних поверхонь та відсутність значного термічного впливу порівняно з електроерозійними й лазерними методами обробки. Водночас складність забезпечення стабільної якості пазів обумовлює необхідність подальших досліджень процесу мікрофрезерування NiTi.

1.2. Фізико-механічні та термодинамічні властивості сплаву NiTi

Сплави системи NiTi належать до класу матеріалів із ефектом пам'яті форми та характеризуються унікальним поєднанням функціональних, механічних і теплофізичних властивостей. Їх основною особливістю є здатність до оборотних мартенситних перетворень між високотемпературною аустенітною фазою B2 та низькотемпературною мартенситною фазою B19, що забезпечує прояв ефекту пам'яті форми та псевдопружності [1, 5]. Саме фазовий стан матеріалу визначає кристалографічну структуру, жорсткість, пластичність, теплопровідність, характер деформування та поведінку в умовах механічного навантаження [1, 4, 5, 19, 20].

На рис. 1.4 представлено узагальнену схему, яка відображає взаємозв'язок температури, напружень і деформацій при прояві ефекту пам'яті форми та надпружності сплаву NiTi.

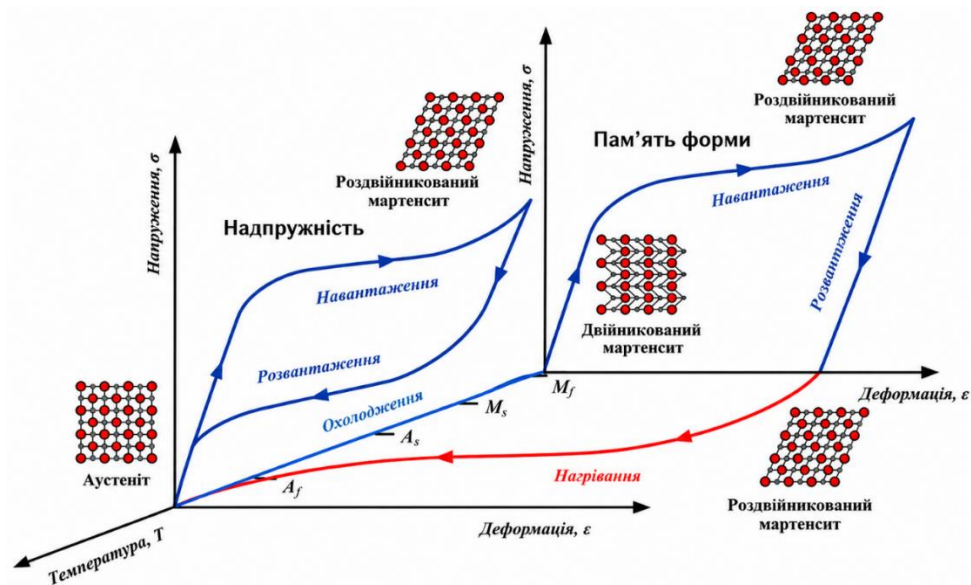


Рис. 1.4 – Фазові перетворення у сплавi NiTi [22]

На рис. 1.5 наведено мікроструктуру сплаву NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах. Аустенітна структура характеризується більш однорідною будовою та чіткішими межами зерен, тоді як мартенситна фаза має характерну пластинчасту морфологію [22]. Такі структурні особливості визначають різний характер пластичного деформування матеріалу, пружного відновлення поверхневого шару та формування контактних напружень під час механічної обробки.

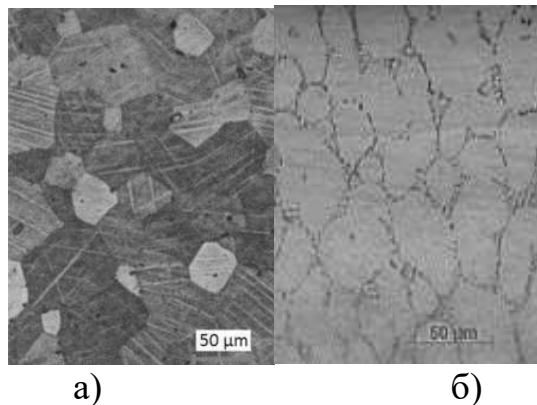


Рис. 1.5 – Мікроструктура сплаву: а) – Ni_{50,8}Ti_{49,2} в аустенітному стані [1]; б) – Ni₅₅Ti₄₅ в мартенситному стані [22]

Аустенітна структура характеризується більш однорідною будовою та чіткішими межами зерен, тоді як мартенситна фаза має характерну пластинчасту морфологію.

У роботах [1, 5] зазначено, що функціональні властивості NiTi суттєво залежать від хімічного складу, температури експлуатації та режимів термічної обробки. Навіть незначна зміна вмісту нікелю може призводити до зміщення температур фазових перетворень, що є особливо важливим для виробів біомедичного та мікромеханічного призначення.

Аустенітний стан NiTi, як правило, характеризується більшою твердістю, жорсткістю та вираженою псевдопружністю, тоді як мартенситний стан має нижчий модуль пружності, вищу пластичність і здатність до значних деформацій під дією навантаження [5, 19].

Порівняльна характеристика фізико-механічних та функціональних властивостей аустенітного і мартенситного сплавів NiTi наведена в табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика фізико-механічних та функціональних властивостей аустенітного та мартенситного сплавів NiTi [1, 4, 5, 19]

Властивість	Аустенітний NiTi (високотемпературна фаза)	Мартенситний NiTi (низькотемпературна фаза)
Кристалічна структура	Кубічна об'ємноцентрована (B2)	Моноклінна (B19)
Густина (г/см ³)	≈ 6,45	≈ 6,45
Температура фазового переходу (°C)	Вище за Af* (≈ 20–100 °C)	Нижче за Mf** (≈ -50–20 °C)
Твердість (HV)	200–400	100–250
Модуль Юнга (ГПа)	40–83	20–41
Модулі пружності (ГПа)	83	28–41
Межа текучості (МПа)	195–690	70–140
Межа міцності (МПа)	800–1500	103–1100
Пластичність	Низька	Висока
Коефіцієнт Пуассона	0,33	0,3–0,33
Коефіцієнт термічного розширення (10 ⁻⁶ /°C)	11	6–8
Теплопровідність (Вт/м·К)	18	8–10
Псевдопружність	Виражена	Відсутня
Ефект пам'яті форми	Активується при нагріванні	Проявляється при зміні температури
Магнітні властивості	Низькомагнітний матеріал	Низькомагнітний матеріал

Закінчення табл. 1.3

Стійкість до корозії	Висока	Висока, але може бути чутливішою до корозії в деформованому стані
Стійкість до втоми	Висока (залежить від циклів деформації)	Вища при низьких напруженнях, але знижується при повторних деформаціях
Реакція на механічне навантаження	Жорсткий, пружний	Гнучкий, легко деформується
Реакція на температуру	Стабільний при високих температурах	Чутливий до зміни температури
Деформація при низьких температурах	Незначна	Легко змінює форму
Стійкість до зношування	Висока	Нижча
Застосування	Ортодонтичні дуги, стенти, супереластичні деталі, датчики температури	Деформівні елементи, фіксатори, медичні зшивачі, механізми з ефектом пам'яті

Af* (Austenite finish) – температура завершення аустенітного перетворення, тобто температура, вище якої сплав повністю переходить в аустенітний стан.

Mf** (Martensite finish) – температура завершення мартенситного перетворення, тобто температура, нижче якої сплав повністю перебуває в мартенситному стані.

Аналіз наведених даних свідчить, що аустенітний і мартенситний стани NiTi суттєво відрізняються за механічними та теплофізичними характеристиками, що необхідно враховувати при механічній обробці матеріалу.

Важливою особливістю NiTi є низька теплопровідність, яка суттєво впливає на температурний режим процесу різання. Унаслідок обмеженого тепловідведення теплота, що генерується у зоні різання, концентрується поблизу різальної кромки та у поверхневому шарі заготовки [1, 23, 24]. Для процесу мікрофрезерування це має особливо важливе значення, оскільки малі розміри інструмента ускладнюють відведення тепла та сприяють локальному перегріву зони контакту інструмента із матеріалом.

Окрім температурних характеристик, суттєвий вплив на процес механічної обробки має схильність NiTi до деформаційного зміцнення та пружно-пластичного відновлення після проходження різальної кромки. У роботах [23, 25] показано, що після проходження інструмента частина

деформованого матеріалу частково відновлює свою форму, що призводить до додаткового контакту матеріалу із задньою поверхнею інструмента.

Автори [25] дослідили особливості формування сил різання під час ортогонального різання сплаву NiTi при швидкості різання $V = 25$ м/хв. Як показано на рис. 1.6, процес різання було умовно поділено на п'ять характерних етапів. На етапі I сили різання поступово зростають і досягають стабільного рівня, після чого на етапі II спостерігається їх повторне збільшення. Етап III відповідає стабільному процесу різання, а після зупинки подачі на етапах IV–V сили різання не зменшуються до нуля.

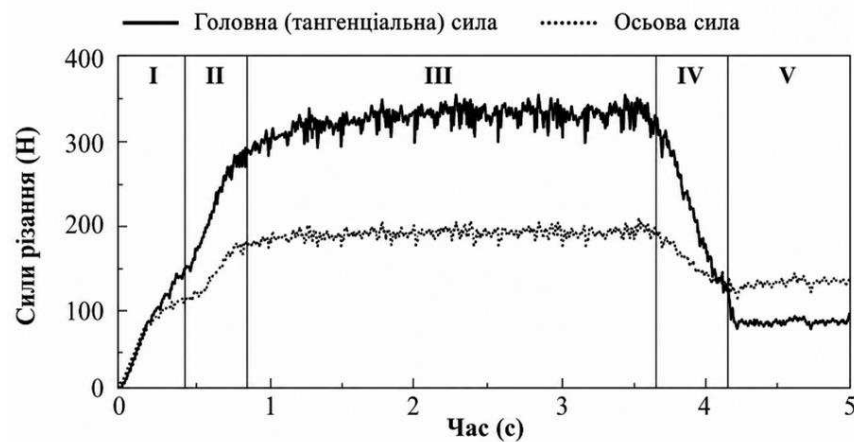


Рис. 1.6 – Осцилограма сил різання під час оброблення сплаву NiTi при швидкості різання $V = 25$ м/хв [25]

На рис. 1.7 показано зображення точки різання в частинах I, II, III та V під час процесу різання сплаву NiTi при $V = 25$ м/хв відповідно.

У частині I утворюються надзвичайно тонкі стружки. Товщина стружок починає збільшуватися з частини II і досягає максимуму в частині III. У частині V, незважаючи на зупинку подачі, стружки все ще утворюються безперервно з товщиною, як у частині I. Відновлення форми оброблюваного матеріалу спостерігається у всіх частинах, зокрема в частинах I та V, де оброблена поверхня поблизу точки різання демонструє увігнуту деформацію внаслідок відновлення форми.

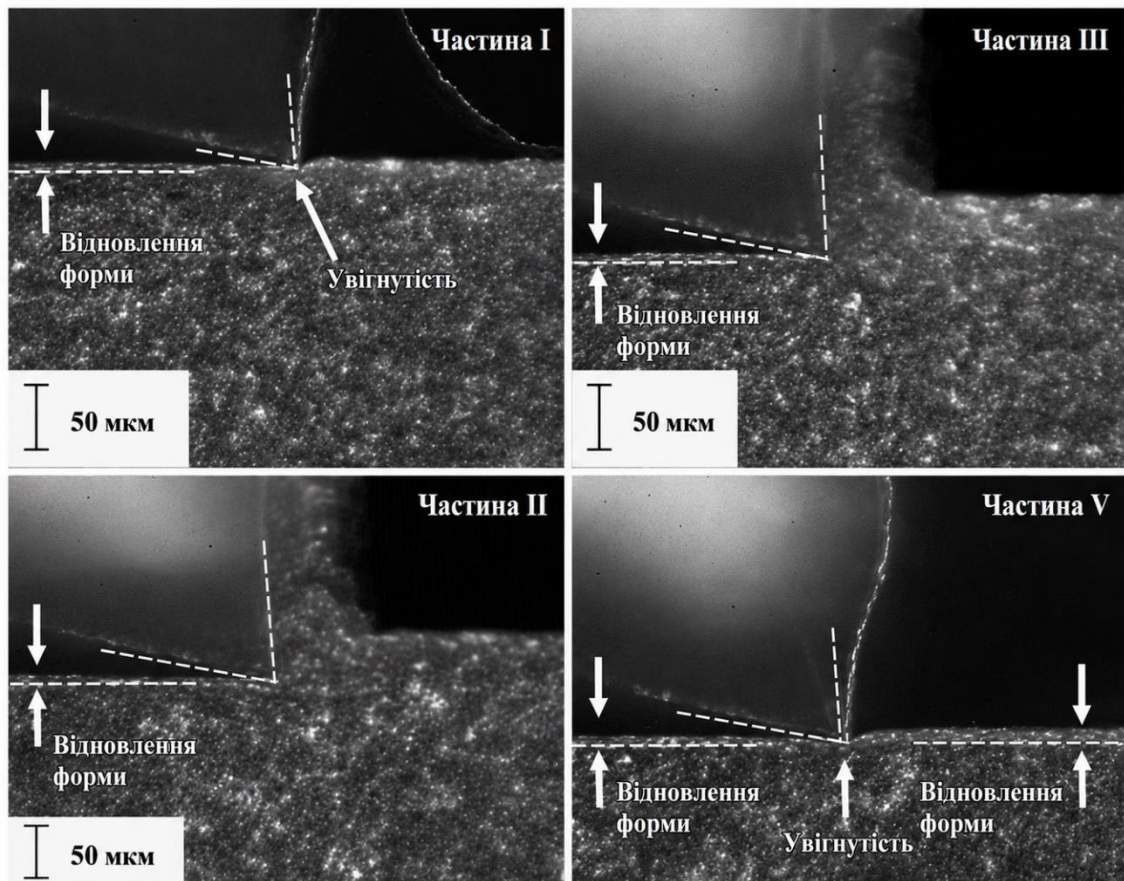


Рис. 1.7 – Пружне відновлення матеріалу в зоні різання сплаву NiTi при швидкості $V = 25$ м/хв [25]

Для процесу мікрофрезерування ефект пружного відновлення матеріалу має особливо небезпечним, оскільки товщина зрізаного шару співрозмірна з радіусом заокруглення різальної кромки, а додаткове тертя може суттєво підвищувати сили різання та погіршувати стабільність процесу[23, 25].

Важливою фізичною особливістю NiTi є також висока адгезійна активність. Під час механічної обробки це проявляється у налипанні оброблюваного матеріалу на передню та задню поверхні інструмента, нестабільності стружкоутворення, погіршенні якості поверхні та прискореному зношуванню різальної кромки (рис. 1.8) [23, 26].

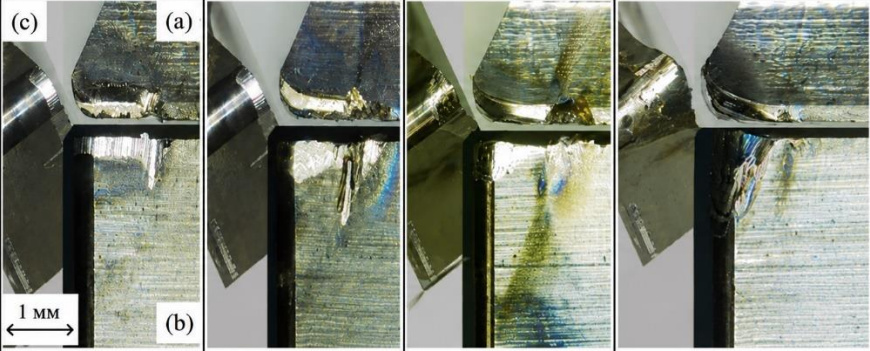
Швидкість різання	25 м/хв	50 м/хв	75 м/хв	100 м/хв
Відстань різання	400 м	400 м	100 м	30 м
TiNi				

Рис. 1.8 – Фотографії зносу інструменту при ортогональному різанні сплаву NiTi:

а) вигляд зверху, б) вигляд збоку, в) вершина ріжучої кромки [23]

Таким чином, сплави NiTi характеризуються поєднанням специфічних механічних, функціональних і теплофізичних властивостей, які суттєво ускладнюють процес їх механічної обробки. Висока пластичність, низька теплопровідність, схильність до деформаційного зміцнення та адгезії обумовлюють необхідність урахування фазового стану матеріалу та його фізико-механічних характеристик при дослідженні процесу мікрофрезерування.

1.3. Фізичні механізми та специфічні ефекти процесу мікрофрезерування сплаву NiTi

Процес мікрофрезерування сплавів NiTi суттєво відрізняється від традиційного макрорізання через малі геометричні розміри інструмента, співрозмірність товщини зрізуваного шару з радіусом заокруглення різальної кромки та значний вплив фізико-механічних властивостей оброблюваного матеріалу [2, 3, 27, 28]. При переході до мікромасштабу класичні закономірності процесу різання змінюються, а визначальними стають масштабний ефект, нестабільність стружкоутворення, локалізація температури,

пружно-пластичне деформування матеріалу та підвищена чутливість процесу до динамічних явищ [12, 27–29].

На відміну від традиційного фрезерування, у процесі мікрофрезерування суттєвий вплив на механіку різання має співвідношення між товщиною зрізуваного шару та радіусом заокруглення різальної кромки. При малих значеннях подачі на зуб значна частина енергії витрачається не на формування стружки, а на пластичне витіснення матеріалу [27, 28]. Для сплавів NiTi цей ефект проявляється особливо інтенсивно через високу пластичність, псевдопружність, схильність до деформаційного зміцнення та низьку теплопровідність матеріалу [1, 19, 23].

Особливості процесу мікрофрезерування NiTi обумовлені також можливістю локальних фазових перетворень у зоні різання. При мікромеханічній обробці процес формування стружки супроводжується одночасною пластичною деформацією та локальними структурно-фазовими змінами матеріалу.

Суттєвий вплив на процес мікрофрезерування NiTi мають локалізація температури в зоні різання, адгезійна взаємодія між інструментом та матеріалом, а також динамічні явища, пов'язані з недостатньою жорсткістю мікроінструмента [12, 13, 23, 30]. Через малі діаметри мікрофрез навіть незначні коливання інструмента можуть призводити до зміни фактичної товщини зрізуваного шару, нестабільності сил різання та погіршення геометричної точності сформованих пазів [3, 12].

У сучасних дослідженнях процес мікрофрезерування NiTi розглядається як складна термомеханічна система, в якій якість сформованої поверхні визначається сукупною взаємодією масштабного ефекту, механізму стружкоутворення, температурних явищ, вібрацій та структурно-фазових змін у поверхневому шарі. [29].

Саме тому сучасні дослідження дедалі більше орієнтовані на комплексний аналіз процесу мікрофрезерування з одночасним урахуванням силових, температурних, динамічних та геометричних характеристик процесу.

Таким чином, процес мікрофрезерування сплавів NiTi характеризується сукупністю взаємопов'язаних фізичних процесів, які визначають формування якості поверхні та геометричної точності пазів. До найбільш значущих належать масштабний ефект, особливості стружкоутворення і формування заусенців, силові та теплові характеристики процесу різання, а також динамічні явища технологічної системи, що детально розглянуті в наступних підрозділах.

1.3.1. Механізм стружкоутворення та утворення заусенців

Механізм стружкоутворення при мікрофрезеруванні суттєво відрізняється від процесів традиційного макрорізання через співрозмірність товщини зрізаного шару з радіусом заокруглення різальної кромки та структурними складовими матеріалу [3, 27, 28]. У мікомасштабі процес різання супроводжується не лише зрізанням матеріалу, а й значним пластичним витісненням матеріалу, пружним відновленням поверхневого шару та локалізацією деформацій у зоні контакту інструмента із заготовкою [3, 28, 29].

У сучасних дослідженнях встановлено, що при мікрорізанні існує мінімальна товщина зрізаного шару h_{min} , нижче якої стабільне стружкоутворення не відбувається. У такому випадку переважають процеси пластичного витіснення матеріалу, що супроводжується зростанням питомих сил різання, погіршенням якості поверхні та інтенсивним утворенням заусенців [29, 31, 32]. Схему впливу мінімальної товщини зрізаного шару на механізм мікрорізання наведено на рис. 1.9.

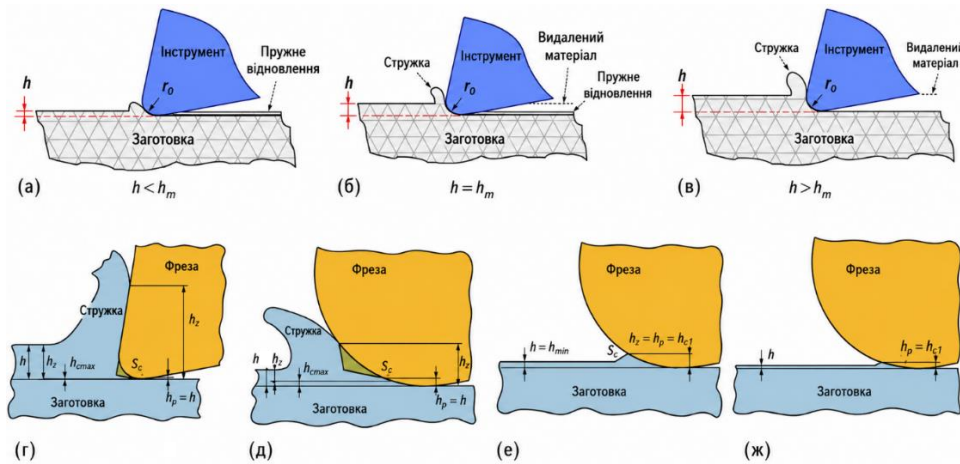


Рис. 1.9. – Схематичне зображення впливу мінімальної товщини стружки: а) $h < h_{\min}$, б) $h = h_m$, в) $h > h_m$ [27, 33]; різні випадки товщина зрізаного шару для випадків г) $h > r_e > h_{\min}$, д) $r_e > h > h_{\min}$, е) $h = h_{\min}$, ж) $h < h_{\min}$ [29, 34, 35]

На рис. 1.9 наведено схему взаємодії різальної кромки з матеріалом при мікрофрезеруванні залежно від співвідношення товщини незрізаного шару h та мінімальної товщини стружки h_m . Де r_o – радіус заокруглення різальної кромки інструмента; h – товщина незрізаного шару; h_m ($h_{\min}$) – мінімальна товщина стружки; h_c – критична товщина стружки; h_p – товщина шару, у якому переважає процес пластичного витіснення матеріалу; h_z – товщина зрізаного шару; S_c – зона контакту інструмента із заготовкою. Показано, що при $h < h_m$ процес супроводжується переважно пружно-пластичним деформуванням та пластичним витісненням матеріалу без стабільного стружкоутворення, тоді як при $h > h_m$ реалізується процес зрізання матеріалу з формуванням стружки [32].

У роботі [36] розроблено комплексну математичну модель процесу мікрофрезерування, яка включала визначення товщини стружки, як різниці між поточним положенням ріжучої кромки та поверхнею, сформованою попереднім проходом зуба. Особливістю моделі було врахування пружного відновлення матеріалу. Запропонований підхід дозволяв описати перехід від чисто пружної деформації матеріалу до процесу пластичного зрізання. Складові сил зсуву та пластичного витіснення матеріалу визначалися на основі теорії ліній ковзання з урахуванням ефективного переднього кута та наявності «мертвого металевого

ядра» (dead metal cap) – області деформованого матеріалу поблизу різальної кромки, що рухається разом з інструментом (рис. 1.10).

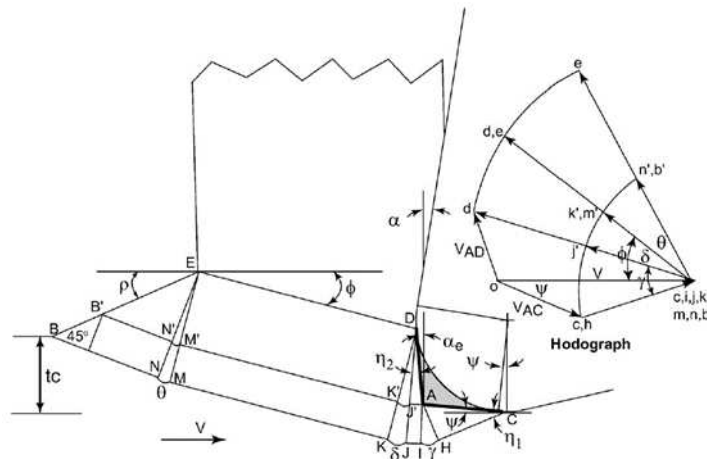


Рис. 1.10 – Запропоноване поле ліній ковзання для сил різання при утворенні стружки зі змінним розміром «мертвого металевого ядра» [36]

У випадку, коли товщина зрізу менша за мінімальну ($t_c < t_{cmin}$), процес різання відсутній, і сили формуються виключно за рахунок пластичного витіснення матеріалу, що призводило до різкого зростання питомих сил різання.

Таким чином, запропонована авторами [36] модель дозволила комплексно описати процес мікрофрезерування з урахуванням мінімальної товщини стружки, пружного відновлення матеріалу, пластичного витіснення матеріалу та утворення «мертвого металевого ядра» поблизу різальної кромки. Розроблений підхід показав, що при зменшенні товщини зрізуваного шару нижче мінімальної товщини стружки процес переходить від стабільного стружкоутворення до переважання пластичного витіснення матеріалу, що супроводжується різким зростанням питомих сил різання, погіршенням умов стружкоутворення та підвищенням динамічної нестабільності процесу.

Для сплавів NiTi механізм стружкоутворення ускладнюється високою пластичністю, псевдопружністю, схильністю до деформаційного зміцнення та низькою теплопровідністю матеріалу [1, 13, 23]. Значний вплив також мають локальні температурні зміни та фазові перетворення у зоні різання [24, 30].

Унаслідок цього процес відокремлення стружки супроводжується нестабільним пластичним деформуванням матеріалу, інтенсивним налипанням на різальну кромку та підвищеним тертям у зоні контакту інструмента із заготовкою.

У роботі Н. Shizuka [23] встановлено, що характер формування стружки при ортогональному точінні NiTi суттєво залежить від швидкості різання (рис. 1.11) та температурно-деформаційних умов у зоні контакту інструмента із матеріалом.

На рис. 1.11 наведено зміну форми стружки при різних швидкостях різання NiTi [23]. Аналіз результатів свідчить, що зі збільшенням швидкості різання форма стружки стає більш нестабільною, а процес її формування супроводжується інтенсивнішими пластичними деформаціями та локалізацією температури. Це призводить до збільшення динамічних навантажень на інструмент та погіршення стабільності процесу різання.

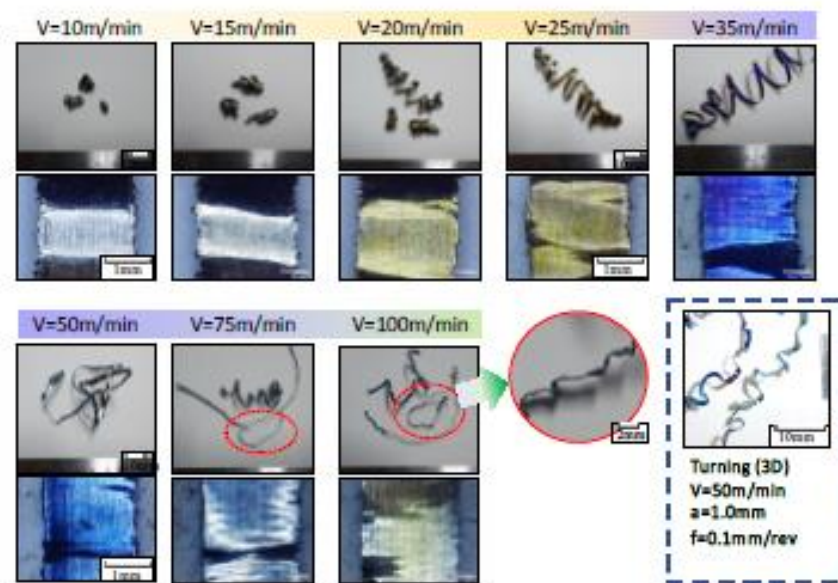


Рис. 1.11 – Зміна форми стружки при різних швидкостях різання NiTi [23]

Однією з найбільш характерних проблем при мікрофрезеруванні NiTi є інтенсивне утворення заусенців. Заусенці формуються внаслідок пластичного витіснення матеріалу поблизу різальної кромки та неповного руйнування шару матеріалу при виході інструмента із зони різання [22, 30, 37]. Через високу

пластичність і пружне відновлення сплавів NiTi процес утворення заусенців є значно інтенсивнішим порівняно з більшістю конструкційних матеріалів [30].

Дослідження, наведені у роботі [30], показують, що верхні заусенці при мікрофрезеруванні NiTi формуються переважно внаслідок пластичного витіснення матеріалу під дією заокругленої різальної кромки. При зустрічному фрезеруванні матеріал деформується у напрямку руху інструмента, що сприяє інтенсивнішому формуванню верхніх заусенців. Додатковий вплив має гвинтова геометрія мікрофрези, внаслідок чого стружка додатково деформує край обробленої поверхні та змінює характер формування заусенців [30].

Аналіз рис. 1.12 свідчить, що найбільші заусенці формуються на верхніх кромках пазу.

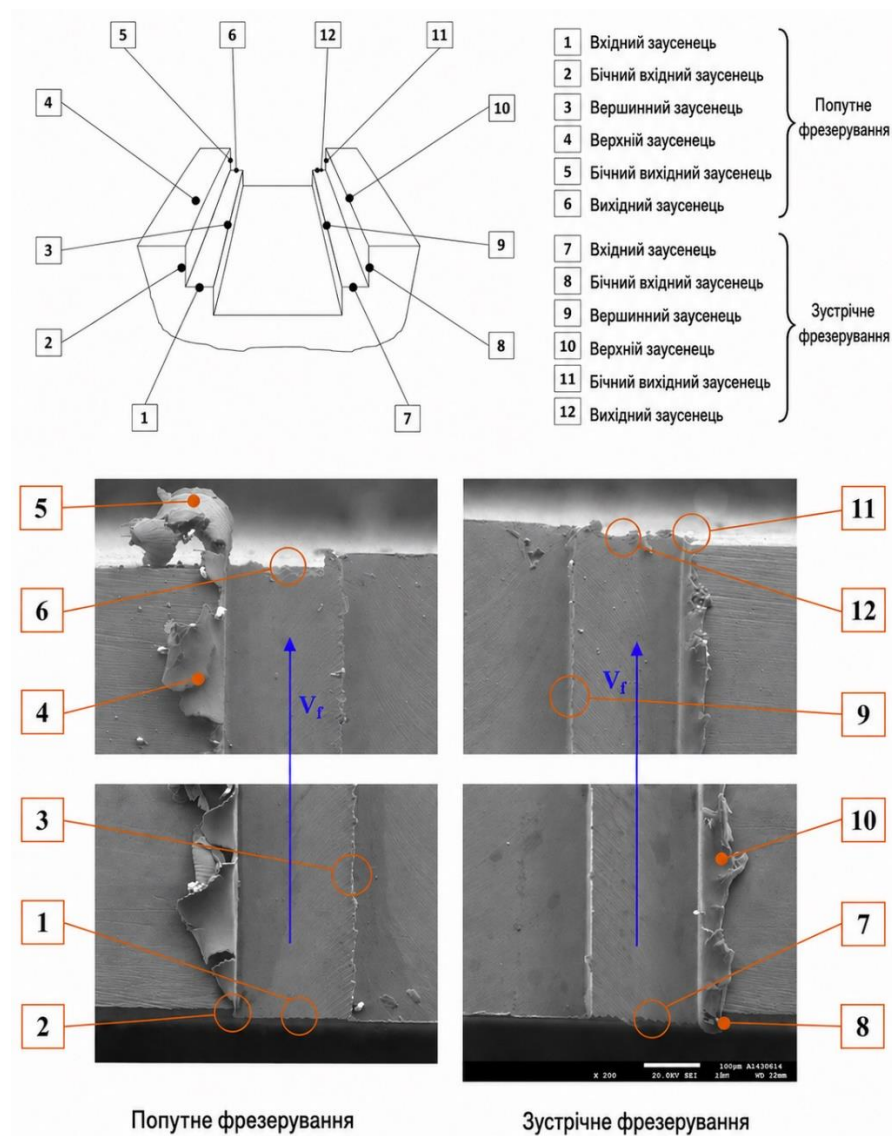


Рис. 1.12 – Приклади заусенців, сформованих при мікрофрезеруванні NiTi [30]

Це пояснюється значною пластичною деформацією матеріалу та пружним відновленням поверхневого шару після проходження різальної кромки. Крім того, при виході інструмента із зони різання частина матеріалу витягується у напрямку руху інструмента, що сприяє формуванню вихідних заусенців [30].

У роботах [22, 37] встановлено, що на інтенсивність утворення заусенців суттєво впливають режими різання та умови охолодження. При малих подачах на зуб посилюється вплив масштабного ефекту та зростає частка пластичного деформування, що призводить до збільшення ширини та висоти заусенців [22, 31]. Використання охолодженого повітря [38] та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ дозволяє знизити температуру у зоні різання, покращити умови відокремлення стружки та зменшити інтенсивність формування заусенців [22].

У роботі [32] також встановлено, що при малих подачах та низьких швидкостях різання на поверхні пазів виникають характерні дефекти у вигляді виривів та нерівномірного пластичного деформування матеріалу. Автори пов'язують це з тим, що при товщині зрізаного шару, меншій за радіус різальної кромки, інструмент не забезпечує стабільного зрізання матеріалу, а переважно деформує його [32]. На рис. 1.13 показано, що зі збільшенням швидкості різання ширина заусенців суттєво зростає.

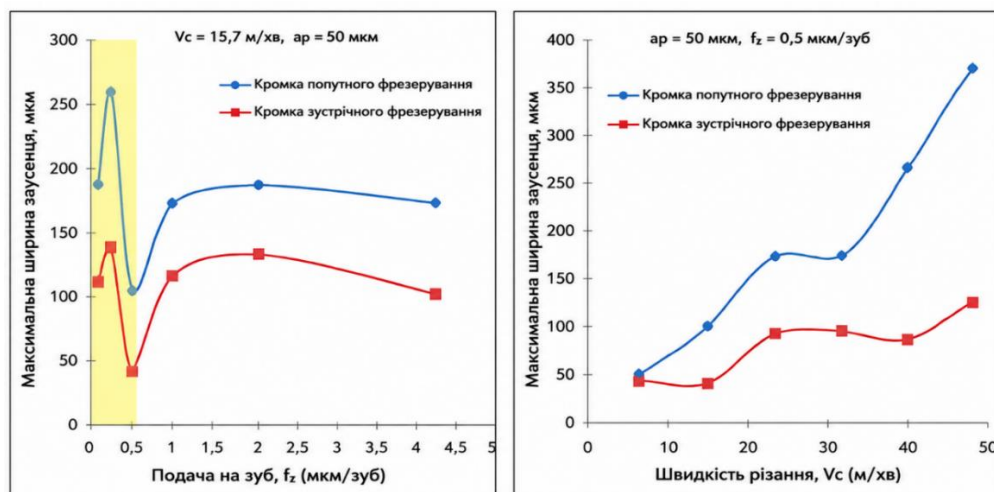


Рис. 1.13 – Зміна максимальної ширини заусенців залежно від параметрів різання [32]

Підвищення швидкості різання супроводжується збільшенням швидкості деформації та температури в зоні різання, що впливає на фазові перетворення в NiTi і сприяє формуванню більш пластичної структури матеріалу. У результаті це призводить до збільшення ширини заусенців, особливо на стороні попутного фрезерування.

Таким чином, механізм стружкоутворення при мікрофрезеруванні сплавів NiTi характеризується значним впливом пластичного витіснення матеріалу та пружного відновлення матеріалу. Особливості фізико-механічних властивостей NiTi сприяють нестабільності стружкоутворення, інтенсивному утворенню заусенців та погіршенню якості сформованих поверхонь, що необхідно враховувати при виборі режимів мікрофрезерування.

1.3.2. Масштабний ефект

Однією з основних особливостей процесу мікрофрезерування є прояв масштабного ефекту, який суттєво змінює механіку різання порівняно з традиційною макрообробкою [2, 3, 27, 28]. Масштабний ефект виникає у випадку, коли товщина зрізуваного шару стає співрозмірною з радіусом заокруглення різальної кромки інструмента [2, 3, 39]. У таких умовах класичний механізм стружкоутворення порушується, а процес різання супроводжується значним пластичним витісненням матеріалу та пружним відновленням поверхневого шару [27, 28].

При мікрофрезеруванні пазів, в момент, коли інструмент входить в зону обробки, товщина зрізу дорівнює нулю і стружка не утворюється до тих пір, поки інструмент не повернеться до значення переднього кута (рис. 1.14, блакитний колір). Коли товщина зрізуваного шару стане рівною мінімально необхідному значенню, то лише тоді почнеться зрізання матеріалу (рис. 1.14, жовтий колір) [26]. При фрезеруванні мікропазів менші значення подачі на зуб вимагають більших значень переднього кута для досягнення мінімальної товщини зрізу. В результаті при меншій подачі більша кількість матеріалу

стикається з ефектом пластичного деформування та спостерігається більше пружне відновлення оброблюваного шару після проходу інструменту, а це збільшує питоме зусилля різання [12].

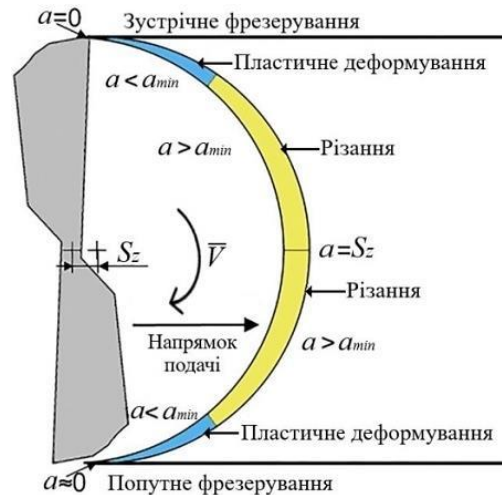


Рис. 1.14 – Зміна товщини зрізуваного шару при мікрофрезеруванні [12, 40]

На рисунку 1.15 проілюстровано зміну ефективного переднього кута γ_{eff} для різних значень товщини зрізу. Як було зазначено вище, на механізм видалення стружки при мікрообробці впливає ефект мінімальної товщини зрізу. Його причиною є від'ємний кінематичний передній кут різального інструменту γ_{eff} (рис. 1.15, а, б), спричинений відносно високим радіусом різальної кромки порівняно з товщиною зрізу. Від'ємний ефективний передній кут різальної кромки стискає верхню частину матеріалу, і тому він пластично деформується без різання [12, 33].

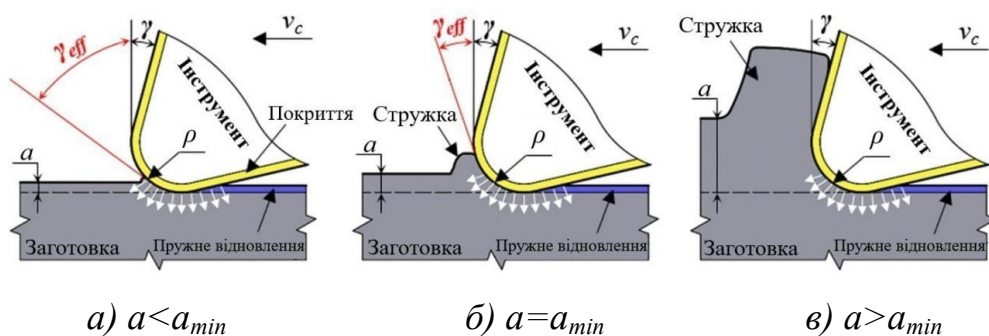


Рис. 1.15 – Механізм видалення стружки при мікрорізанні залежно від співвідношення товщини зрізуваного шару a та радіусу округлення різальної кромки ρ [12, 40]

Для сплавів NiTi масштабний ефект проявляється особливо інтенсивно через високу пластичність, псевдопружність, низьку теплопровідність та схильність матеріалу до деформаційного зміцнення [1, 4, 23].

При малих значеннях товщини зрізуваного шару переважають процеси пластичного витіснення матеріалу, внаслідок чого значно зростає частка енергії, що витрачається не на формування стружки, а на деформування поверхневого шару матеріалу.

Для оцінювання впливу масштабного ефекту при мікрофрезеруванні використовують масштабний коефіцієнт k_m , який характеризує співвідношення між товщиною зрізуваного шару та радіусом заокруглення різальної кромки інструмента.

$$k_m = a/r \quad (1.1)$$

де a – товщина зрізуваного шару,

r – радіус заокруглення різальної кромки.

При малих значеннях k_m процес різання характеризується переважанням пластичного витіснення матеріалу, тоді як зі збільшенням k_m умови формування стружки стабілізуються.

Одним із найбільш характерних проявів масштабного ефекту є різке зростання питомої сили різання K при зменшенні товщини зрізуваного шару. У роботі [27] показано, що при переході до мікромасштабу питома сила різання суттєво зростає через збільшення частки пластичного деформування та тертя в зоні контакту інструмента із заготовкою. Для процесу мікрофрезерування значна частина енергії витрачається не на безпосереднє формування стружки, а на пластичне витіснення поверхневого шару матеріалу, що особливо характерно при малих значеннях товщини зрізуваного шару.

$$a = P/A \quad (1.2)$$

де P – сила різання,

A – площа поперечного перерізу незрізаного шару.

Зі зменшенням товщини зрізуваного шару частка процесів тертя, пластичного витіснення матеріалу суттєво зростає, що призводить до різкого збільшення енергетичних витрат процесу.

Одним із головних наслідків масштабного ефекту є непропорційне зростання питомої сили різання K при зменшенні товщини зрізуваного шару [2, 27, 28]. Це пояснюється тим, що значна частина енергії витрачається не на формування стружки, а на пластичне деформування матеріалу та подолання сил тертя [27, 28]. Для сплавів NiTi цей ефект додатково посилюється через пружне відновлення поверхневого шару та можливі фазові перетворення у зоні різання [24].

У роботі K. Aslantaş та Y. Kaуnak встановлено, що при мікрофрезеруванні аустенітного NiTi критична товщина зрізуваного шару становить приблизно 0,5 мкм, що відповідає близько 33 % радіуса заокруглення різальної кромки інструмента [32]. При подачах, менших за критичну товщину стружки, процес характеризується переважанням пластичного витіснення матеріалу, що супроводжується різким зростанням сил різання, ширини заусенців і погіршенням якості поверхні [32].

Умови мікрофрезерування, за яких товщина зрізуваного шару є меншою за критичне значення, характеризуються нестабільністю процесу різання, підвищенням питомих навантажень на різальну кромку та погіршенням якості сформованої поверхні. Тому при призначенні режимів мікрофрезерування необхідно забезпечувати умови стабільного стружкоутворення та обмеження впливу масштабного ефекту.

Таким чином, масштабний ефект є однією з визначальних особливостей процесу мікрофрезерування сплавів NiTi. При малих значеннях товщини зрізуваного шару процес різання супроводжується переважанням пластичного витіснення матеріалу, що призводить до різкого зростання питомої сили різання та погіршення умов стружкоутворення. Урахування масштабного ефекту є

Для сплавів NiTi цей ефект додатково посилюється через пружне відновлення поверхневого шару та високу адгезійну активність матеріалу [19, 23].

У роботі [23] досліджено особливості сил різання при ортогональному точінні сплаву NiTi. Встановлено, що сили різання при обробці сплаву NiTi є приблизно вдвічі більшими порівняно зі сплавом Ti-6Al-4V. Також показано, що зі збільшенням швидкості різання спостерігається тенденція до зниження всіх складових сили різання (рис. 1.17).

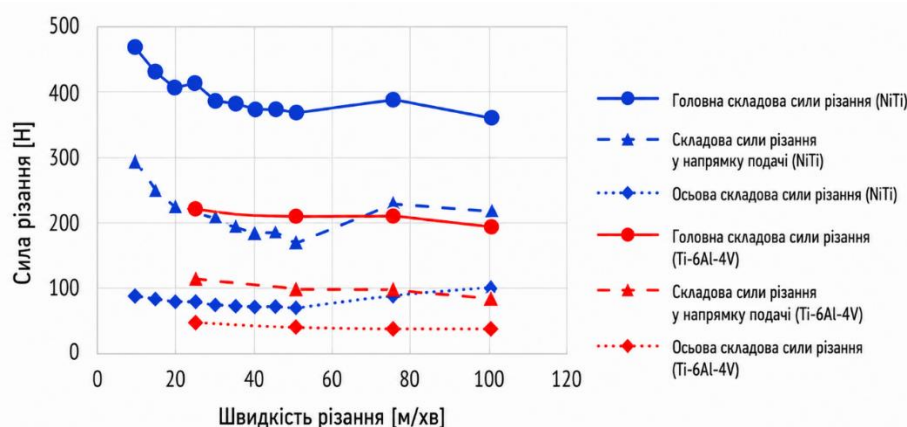


Рис. 1.17 – Залежність складових сили різання від швидкості різання при обробленні NiTi та Ti-6Al-4V [23]

Автори [23] пов'язують високий рівень силових навантажень з важкою оброблюваністю NiTi, яка супроводжується підвищеними температурами різання, інтенсивним зношуванням інструмента та його пластичною деформацією. Основною причиною підвищення сил різання визначено високий опір деформації, значне внутрішнє тертя та супереластичність сплаву NiTi, що ускладнює процес зсувної деформації матеріалу в зоні різання та призводить до зростання напружень і сил різання [23].

У роботі R. Kurpuswamy та A. Yui [37] досліджено залежність сили різання від швидкості різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi (рис. 1.18).

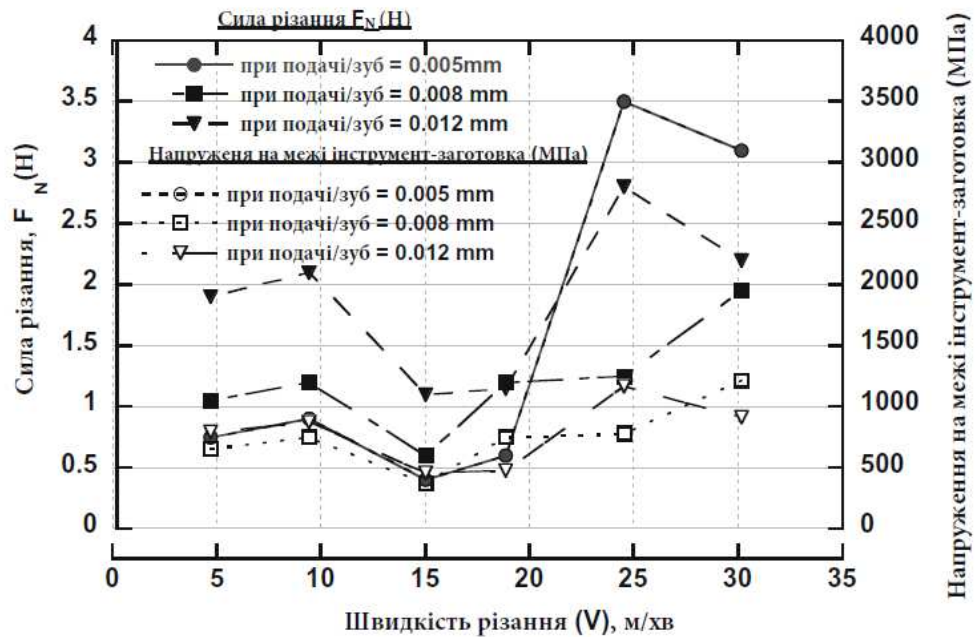


Рис. 1.18 – Залежність контактного напруження інструмент–заготовка від швидкості різання при мікрофрезеруванні NiTi [37]

На рис. 1.19 показано, що зі збільшенням швидкості різання до 15–20 м/хв сили різання зменшуються, однак при подальшому підвищенні швидкості вони різко зростають. Автори пов'язують це з особливостями фазового переходу сплаву NiTi з аустенітної фази B2 у мартенситну фазу B19, що впливає на характер деформації матеріалу в зоні різання. Встановлено, що в області швидкостей 15–20 м/хв спостерігаються мінімальні значення сил різання та контактних напружень, що відповідає найбільш сприятливим умовам мікрооброблення сплаву NiTi.

Аналіз результатів, наведених на рис. 1.19, показує, що при значеннях $F < 0,5$ мкм/зуб сили різання різко зростають, що пов'язано з переважанням процесів пластичного деформування матеріалу [32]. Автори відзначають, що у цьому діапазоні механізм різання суттєво відрізняється від традиційного фрезерування та характеризується нестабільним формуванням стружки [32].

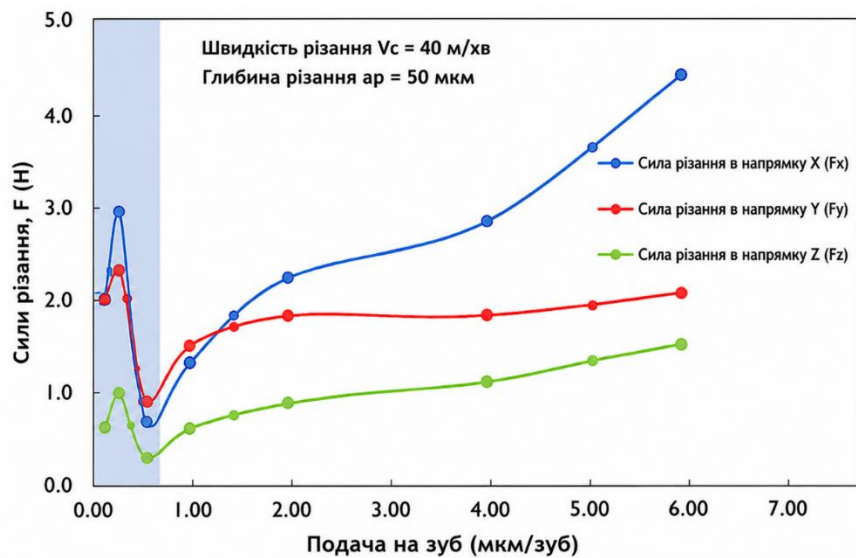


Рис. 1.19 – Зміна сил різання залежно від подачі на зуб при мікрофрезеруванні NiTi [32]

У роботі Н. Shizuka та ін. [23] показано, що навіть за низьких швидкостей різання сплав NiTi характеризується високими температурами в зоні контакту інструмента із заготовкою. Аналіз результатів, наведених на рис. 1.20, свідчить, що при швидкості різання 5 м/хв температура різання для NiTi становила близько 500 °С, а зі збільшенням швидкості різання температура різко зростала.

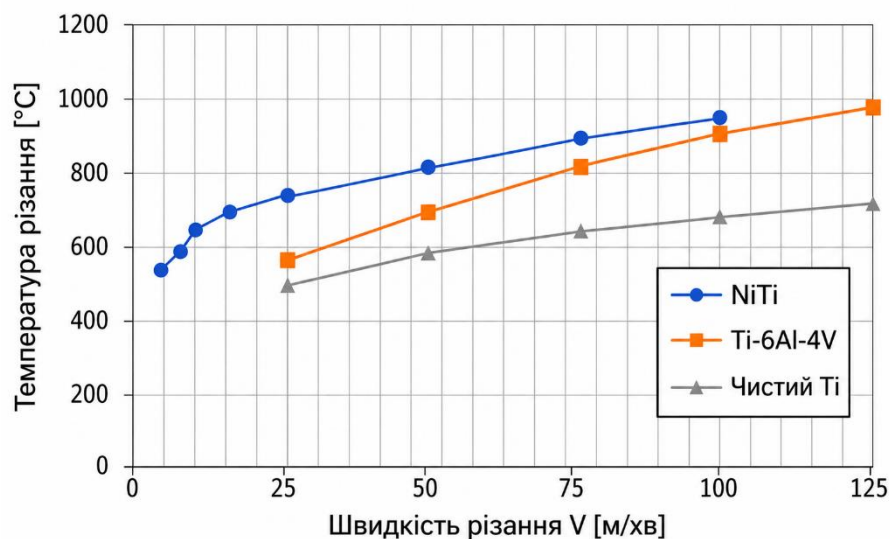


Рис. 1.20 – Температура різання при різних швидкостях різання для NiTi, Ti-6Al-4V та чистого титану [23]

Автори встановили, що при швидкості різання 25 м/хв температура різання для NiTi була приблизно на 200 °C вищою порівняно зі сплавом Ti-6Al-4V [23]. Такі результати пояснюються поєднанням високого опору пластичному деформуванню, низької теплопровідності та значного тертя в зоні контакту інструмента із матеріалом.

Локалізація теплоти поблизу різальної кромки є особливо небезпечною для сплавів NiTi, оскільки температурний вплив може змінювати фазовий стан поверхневого шару та впливати на функціональні властивості виробу [24, 43].

У роботах Y. Каунак та ін. [24, 43] показано, що температурно-деформаційний стан у зоні різання при обробленні NiTi суттєво впливає на стан поверхневого шару. Автори [24] встановили, що при високих температурах і значних пластичних деформаціях у зоні різання можуть виникати локальні фазові перетворення, які змінюють механічні властивості матеріалу безпосередньо під час процесу різання.

Крім того, високі температури сприяють розвитку адгезійних процесів, налипанню матеріалу на різальну кромку та прискореному зношуванню інструмента [13, 23].

Для сплавів NiTi суттєвий вплив на температурний режим процесу чинить масштабний ефект. Через низьку теплопровідність матеріалу тепло концентрується поблизу різальної кромки, що призводить до локального перегріву зони різання та прискореного зношування мікрофрез [1, 23]. У поєднанні з високими контактними напруженнями це сприяє розвитку адгезійних процесів, налипанню матеріалу на інструмент та погіршенню стабільності процесу різання [4, 13].

Таким чином, сили та температури різання є одними з ключових факторів, що визначають ефективність процесу мікрофрезерування сплавів NiTi та якість сформованих пазів. Особливості фізико-механічних властивостей матеріалу, прояв масштабного ефекту та можливість фазових перетворень обумовлюють високі температури, підвищені питомі сили різання та нестабільність процесу формування стружки. Для забезпечення стабільного

процесу мікрофрезерування та підвищення якості поверхні необхідно враховувати взаємозв'язок між режимами різання, масштабним ефектом, температурним режимом та силовими характеристиками процесу.

1.3.4. Вібраційні явища та динамічна стабільність процесу мікрофрезерування

Однією з характерних особливостей процесу мікрофрезерування є підвищена чутливість технологічної системи до динамічних явищ. Через малі геометричні розміри мікроінструмента, незначну жорсткість різальної частини та високі частоти обертання шпинделя навіть незначні коливання можуть суттєво впливати на стабільність процесу різання, точність формування пазів і якість обробленої поверхні [3].

На відміну від традиційного фрезерування, у процесі мікрофрезерування суттєво зростає вплив згинальної жорсткості інструмента. Зменшення діаметра мікрофрези призводить до зниження її жорсткості та підвищення чутливості до коливань і биття інструмента. У результаті навіть незначні динамічні навантаження можуть викликати зміну фактичної товщини зрізуваного шару та нестабільність процесу різання [27].

У роботі [36] розроблено комплексну математичну модель процесу мікрофрезерування. Розроблена модель забезпечила можливість аналізу коливань мікроінструмента, зміни миттєвої товщини стружки та впливу радіального биття інструмента на динамічні характеристики процесу мікрофрезерування. Це дало змогу оцінити умови виникнення вібрацій, нестабільного різання та їх вплив на якість оброблення.

У роботі Jin та Altintas [44] показано, що при мікрофрезеруванні суттєвий вплив на стабільність процесу мають регенеративні механізми виникнення коливань (chatter). Автори встановили, що через малу жорсткість мікроінструмента та змінну товщину зрізуваного шару процес

мікрофрезерування є значно більш чутливим до динамічної нестабільності порівняно з традиційним фрезеруванням.

У роботі L. Ма [45] досліджено особливості вібраційних явищ під час мікрофрезерування прямолінійних пазів. Автори зазначають, що через малу жорсткість мікроінструмента та високі швидкості обертання шпинделя процес мікрофрезерування характеризується підвищеною схильністю до виникнення динамічних коливань, які негативно впливають на точність оброблення, шорсткість поверхні та стійкість інструмента. Наведено часові форми сигналів вібрацій під час мікрофрезерування пазів та характерні стадії процесу різання: врізання інструмента, усталене різання та вихід інструмента із матеріалу (рис. 1.21).

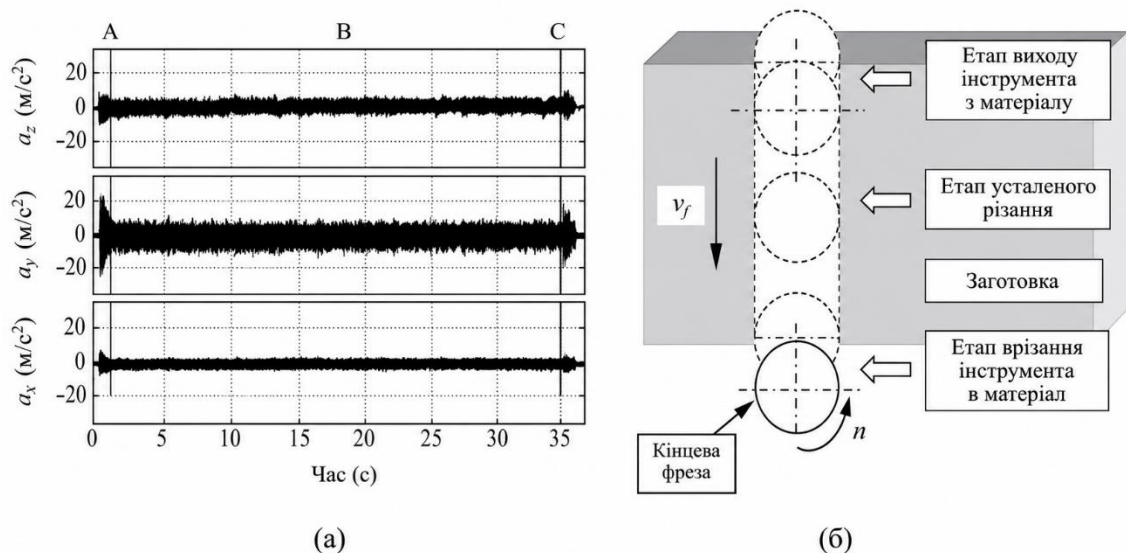


Рис. 1.21 – Вібраційні характеристики процесу мікрофрезерування: а) часова залежність вихідного сигналу; б) етапи фрезерування прямого паза [45]

Показано, що на етапах врізання та виходу інструмента спостерігаються перехідні режими з підвищеними амплітудами коливань, тоді як під час усталеного різання вібраційний сигнал має більш стабільний характер. Також встановлено, що найбільша амплітуда вібрацій виникає у напрямку, перпендикулярному до подачі, що автори пов'язують із меншою радіальною жорсткістю мікроінструмента [45].

Подальший частотний аналіз вібраційних сигналів (рис. 1.22) дозволив визначити основні гармоніки коливань, пов'язані з частотою обертання шпинделя та проходженням зубців фрези.

Автори [45] відзначають, що навіть за відсутності вираженого chatter-процесу спектр вібрацій містить значну кількість високочастотних складових, що свідчить про складний динамічний характер процесу мікрофрезерування. Встановлено, що параметри режиму різання суттєво впливають на рівень вібрацій, причому найбільший вплив має швидкість обертання шпинделя.

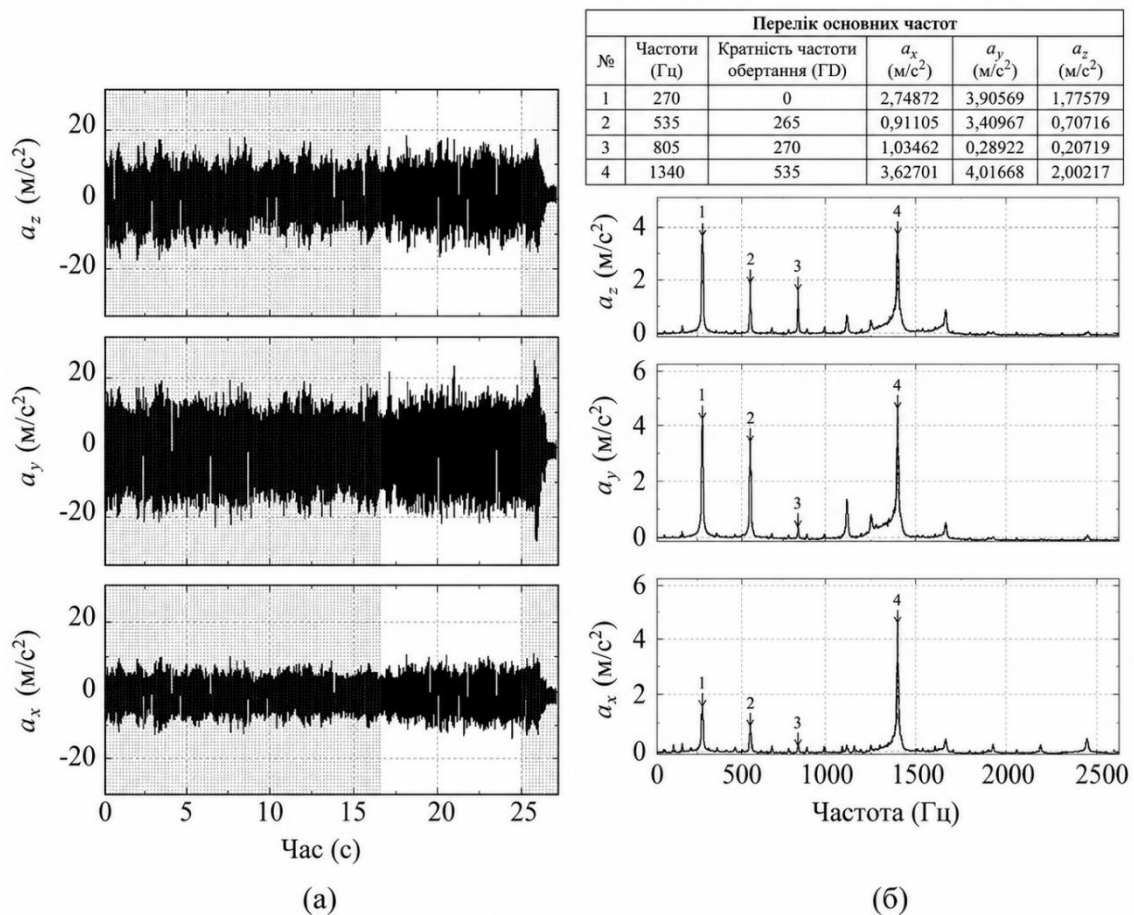


Рис. 1.22 – Вібраційні характеристики процесу мікрофрезерування: а) часова залежність вихідного сигналу; б) частотні спектри сигналу вібраційного прискорення [45]

Для оцінювання впливу режимів різання на рівень коливань авторами побудовано регресійні моделі залежності амплітуди вібрацій від технологічних параметрів процесу. Порівняння експериментальних та розрахункових даних

показало достатньо високу точність моделей прогнозування (рис. 1.23). Отримані результати підтверджують, що контроль вібраційних явищ є важливою умовою забезпечення стабільності процесу мікрофрезерування та підвищення якості сформованих пазів [45].

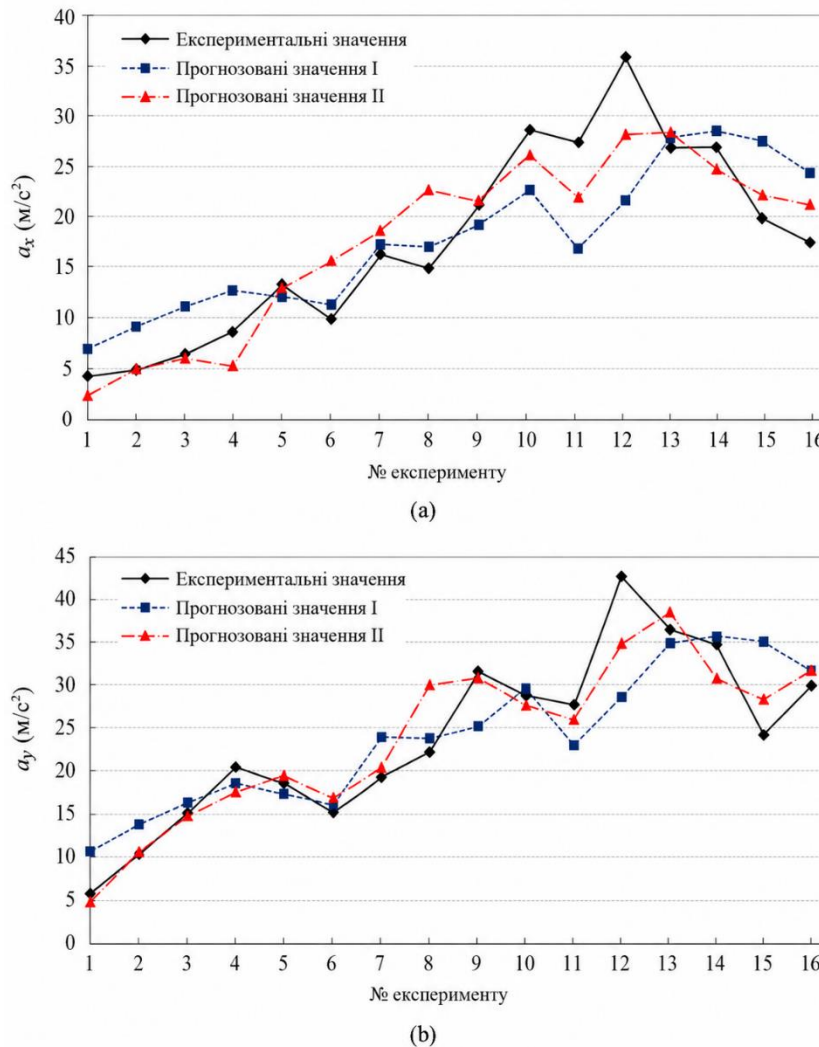


Рис. 1.23 – Порівняння розрахункових та вимірних значень: а) вібрація у напрямку осі X; б) вібрація у напрямку осі Y [45]

У роботі Li et al. [46] показано розвиток нестабільних коливань (chatter) під час мікрофрезерування, які супроводжуються різким зростанням амплітуди вібраційних сигналів та переходом процесу до нестабільного режиму різання (рис. 1.24).

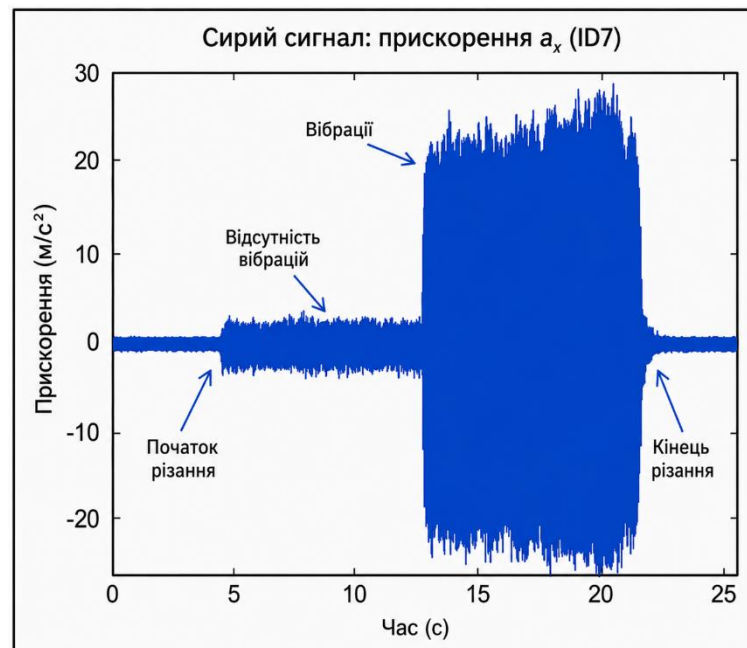


Рис. 1.24 – Сигнал прискорення з проявами вібрації.

Параметри різання: $S = 1$ мм/зуб, $t = 50$ мм, $V = 14\,000$ об/хв, фрезерування пазів [46]

Автори [46] зазначають, що виникнення chatter негативно впливає на якість обробленої поверхні, сприяє погіршенню геометричної точності та може призводити до формування хвилястого профілю поверхні.

Для оцінювання динамічної стабільності процесу мікрофрезерування автори [46] використовували аналіз вібраційних сигналів і частотних спектрів коливань. Одним із найбільш поширених параметрів було середньоквадратичне значення віброприскорення RMS, яке характеризувало інтенсивність динамічних коливань технологічної системи під час різання.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^2}, \quad (1.3)$$

де a_i – миттєві значення прискорення, м/с²;

N – кількість відліків у вибраному часовому інтервалі.

У роботі R. Kundiya та ін. [47] показано, що аналіз сигналів акустичної емісії та параметрів AE RMS може бути ефективним інструментом моніторингу

процесу високошвидкісного мікрофрезерування NiTi. Автори встановили, що зі збільшенням швидкості різання та подачі спостерігається зростання інтенсивності сигналів АЕ, що свідчить про підвищення динамічної нестабільності процесу та зношування мікроінструмента.

Таким чином, вібраційні явища є одним із визначальних чинників процесу мікрофрезерування сплавів NiTi. Недостатня жорсткість мікроінструмента, високі швидкості різання та нестабільність силових навантажень сприяють виникненню динамічних коливань, які негативно впливають на точність формування пазів, шорсткість поверхні та стійкість різального інструмента. Аналіз літературних джерел показав, що наявні дослідження переважно присвячені силам різання, механізмам стружкоутворення та зношуванню інструмента, тоді як питання експериментального дослідження вібраційних сигналів і динамічної стабільності при мікрофрезеруванні сплавів NiTi залишаються недостатньо вивченими. Урахування динамічної стабільності процесу є необхідною умовою забезпечення якості мікрофрезерування.

1.4. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрорізання сплаву NiTi

Скінченно-елементне моделювання є ефективним інструментом дослідження процесів мікрорізання, оскільки дозволяє аналізувати напружено-деформований стан матеріалу, температурні поля, сили різання та механізм формування стружки, які складно безпосередньо дослідити експериментально. Для сплавів NiTi застосування СЕМ є особливо важливим через складний термомеханічний характер процесу, низьку теплопровідність матеріалу та суттєвий вплив масштабного ефекту.

Експериментальні методи дозволяють визначати сили різання, вібраційні сигнали, зношування інструмента та показники якості поверхні, однак не дають змоги повною мірою оцінити локальні температурні та деформаційні процеси у зоні різання [24, 43]. У зв'язку з цим скінченно-елементне моделювання

використовується для прогнозування сил різання та температур, аналізу контактних явищ та дослідження механізму стружкоутворення.

Для опису термомеханічної поведінки матеріалу в умовах високих швидкостей деформації та температур при скінченно-елементному моделюванні процесів різання широко застосовується модель Джонсона–Кука:

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right) \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right) \quad (1.4)$$

де A – границя текучості;

B – коефіцієнт зміцнення;

n – показник деформаційного зміцнення;

C – коефіцієнт впливу швидкості;

$\dot{\varepsilon}$ – швидкість деформації;

T – температура матеріалу;

T_r – початкова температура;

T_m – температура плавлення матеріалу.

Використання моделі Джонсона–Кука [44] дозволяє враховувати вплив пластичних деформацій, швидкості деформування та температури на поведінку матеріалу в зоні різання, що є особливо важливим для моделювання процесів мікрообробки сплавів NiTi.

У сучасних дослідженнях СЕМ застосовується переважно для моделювання ортогонального мікрорізання та процесу мікрофрезерування. Ортогональне різання дозволяє спростити геометрію процесу та детально дослідити локальні термомеханічні явища у зоні різання [24, 43]. Для сплавів NiTi це особливо актуально через можливість фазових перетворень та значний вплив температури і пластичних деформацій на механізм формування стружки. Зокрема, у роботі У. Каунак та ін. [24] виконано скінченно-елементне моделювання ортогонального різання NiTi з урахуванням martensitic phase transformation у зоні різання.

У роботі Y. Kaupak та ін. [24] досліджено вплив фазових перетворень на процес формування стружки при ортогональному різанні сплаву NiTi. На рис. 1.25 наведено морфологію стружки, сформованої при різних швидкостях різання.

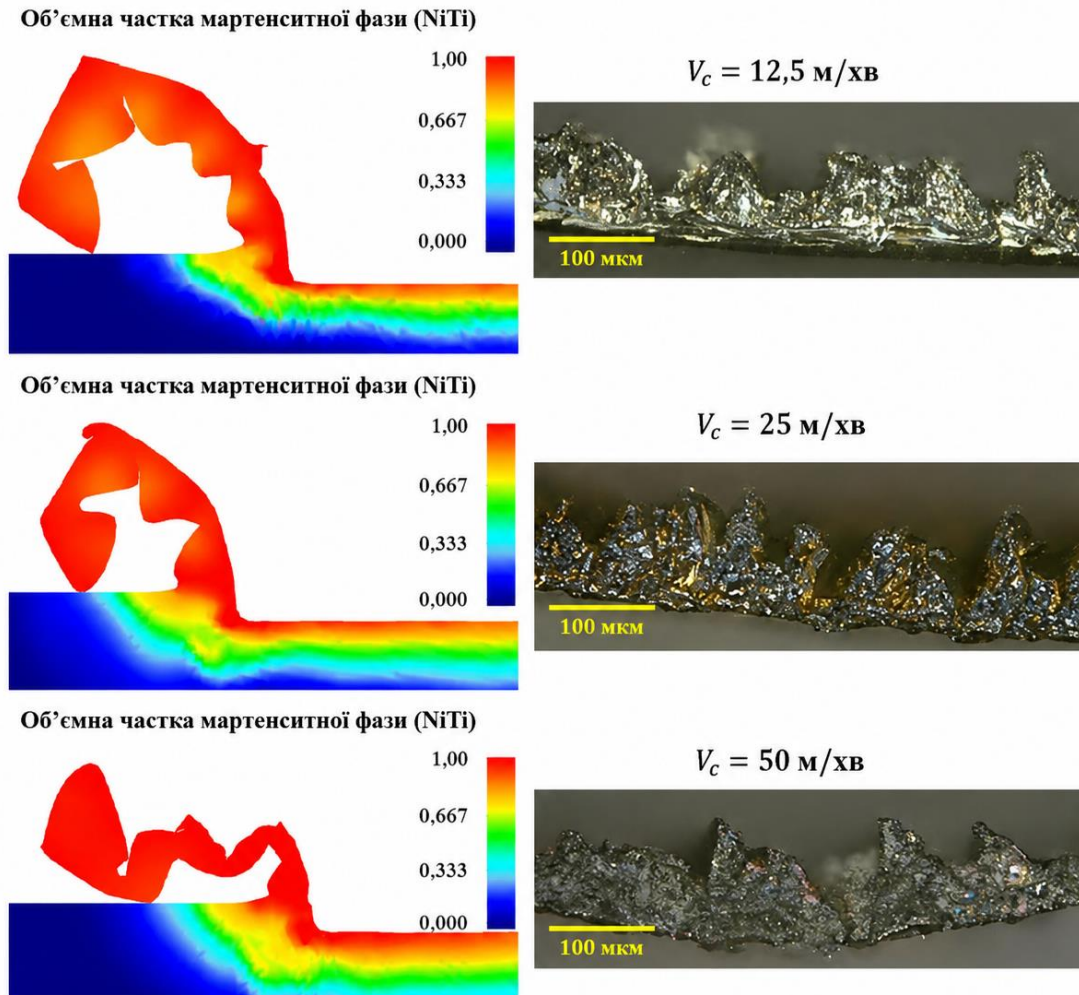


Рис. 1.25 – Формування стружки при фазових перетвореннях під час ортогонального різання NiTi при різних швидкостях різання [24]

Авторами [24] встановлено, що внаслідок високих температур і значних пластичних деформацій у зоні різання стружка характеризується нестабільною та нерівномірною формою, що пов'язано з перебігом фазових перетворень під час стружкоутворення. Показано, що морфологія, мікроструктура та фазовий стан стружки суттєво залежать від режимів різання та умов термомеханічного навантаження в зоні контакту інструмента з матеріалом.

У роботах [24, 43] також показано, що при ортогональному різанні сплаву NiTi спостерігається висока локалізація температури поблизу різальної кромки та у зоні контакту інструмента зі стружкою. Це пояснюється низькою теплопровідністю матеріалу, значними пластичними деформаціями та інтенсивним тертям у зоні різання. Встановлено, що температура в зоні різання може досягати 500–1000 °C залежно від швидкості різання. Зокрема, навіть при швидкості різання 5 м/хв температура становила близько 500 °C, а зі збільшенням швидкості різання до 100 м/хв перевищувала 1000 °C. Отримані результати підтверджують, що процес мікрорізання сплавів NiTi характеризується складною взаємодією механічних, температурних та структурно-фазових явищ, які необхідно враховувати при моделюванні процесів мікрофрезерування.

Окрім ортогонального різання, у сучасних дослідженнях скінченно-елементне моделювання також застосовується для аналізу процесу точіння сплавів NiTi. У роботі Mehrpoura [4] та ін. досліджено вплив параметрів різання на процес точіння сплавів NiTi із використанням програмного комплексу ANSYS/LS-DYNA. Автори виконали скінченно-елементне моделювання процесу різання для аналізу розподілу еквівалентних напружень von Mises, контактних напружень та температурного стану у зоні різання. Встановлено, що зі збільшенням швидкості різання зростають температури та інтенсивність пластичних деформацій у зоні контакту інструмента із матеріалом, що суттєво впливає на сили різання та умови формування стружки.

Результати скінченно-елементного моделювання, наведені у роботі Mehrpoura та ін., підтверджують, що процес оброблення сплавів NiTi супроводжується значною локалізацією напружень і температури у зоні різання, а термомеханічні явища мають визначальний вплив на стабільність процесу та стан поверхневого шару після оброблення. Отримані результати узгоджуються з дослідженнями Y. Kaupak та ін. [24] і підтверджують доцільність застосування скінченно-елементного моделювання для аналізу процесів мікрообробки сплавів NiTi.

Таким чином, моделювання ортогонального мікрорізання є ефективним підходом для дослідження локальних термомеханічних явищ у зоні різання та аналізу механізму формування стружки при мікрообробці сплавів NiTi. Використання скінченно-елементного моделювання дозволяє прогнозувати сили і температури різання, оцінювати напружено-деформований стан матеріалу та аналізувати вплив фазових перетворень на умови формоутворення.

На відміну від ортогонального мікрорізання, процес мікрофрезерування характеризується значно складнішою кінематикою взаємодії інструмента із матеріалом [48]. У процесі різання товщина зрізуваного шару безперервно змінюється, а навантаження на різальні кромки має переривчастий характер.

Аналіз літературних джерел показав, що роботи, присвячені скінченно-елементному моделюванню саме процесу мікрофрезерування сплавів NiTi, є обмеженими. Більшість досліджень стосується ортогонального різання, аналізу фазових перетворень або експериментального мікрофрезерування, тоді як комплексне СЕМ процесу мікрофрезерування NiTi представлено лише в окремих роботах.

1.5. Якість формування пазів, як комплексна характеристика процесу мікрофрезерування

У сучасному машинобудуванні та мікровиробництві якість формоутворення мікрогеометричних елементів, зокрема пазів, є одним із визначальних чинників надійності та функціональності виробів. Пази широко застосовуються у вузлах позиціонування, фіксації, напрямних елементах, а також у виробках біомедичного та приладобудівного призначення, де відхилення геометрії або погіршення стану поверхні (рис. 1.26) можуть призводити до зниження точності, передчасного зношування або відмови виробу [2, 3].

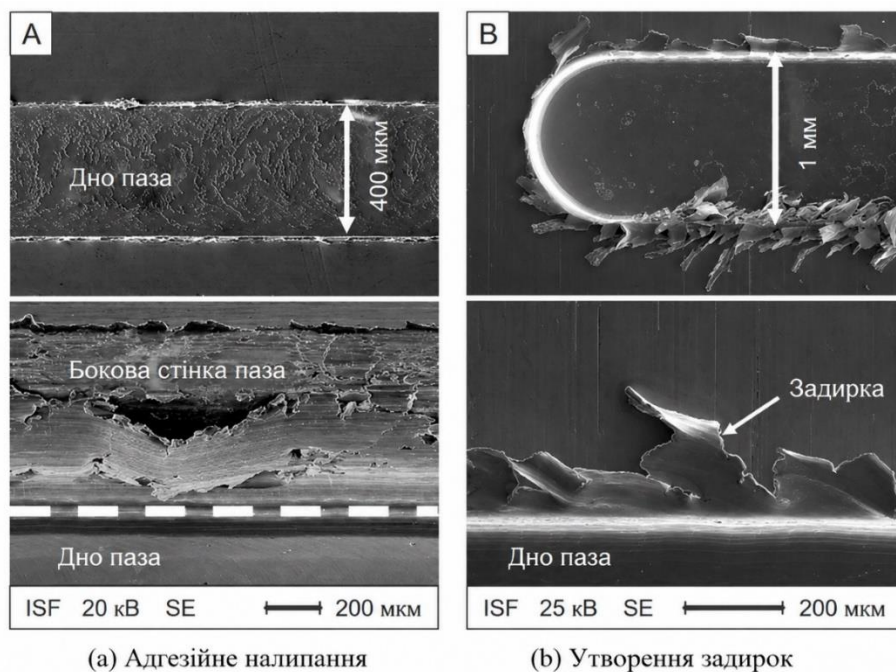


Рис. 1.26 – Типові дефекти поверхні при мікрофрезеруванні: а) адгезійне налипання; б) утворення заусенців [49]

Для процесу мікрофрезерування характерна зміна механізму різання порівняно з традиційним фрезеруванням (рис. 1.27), що обумовлює необхідність іншого підходу до оцінювання якості оброблених пазів.

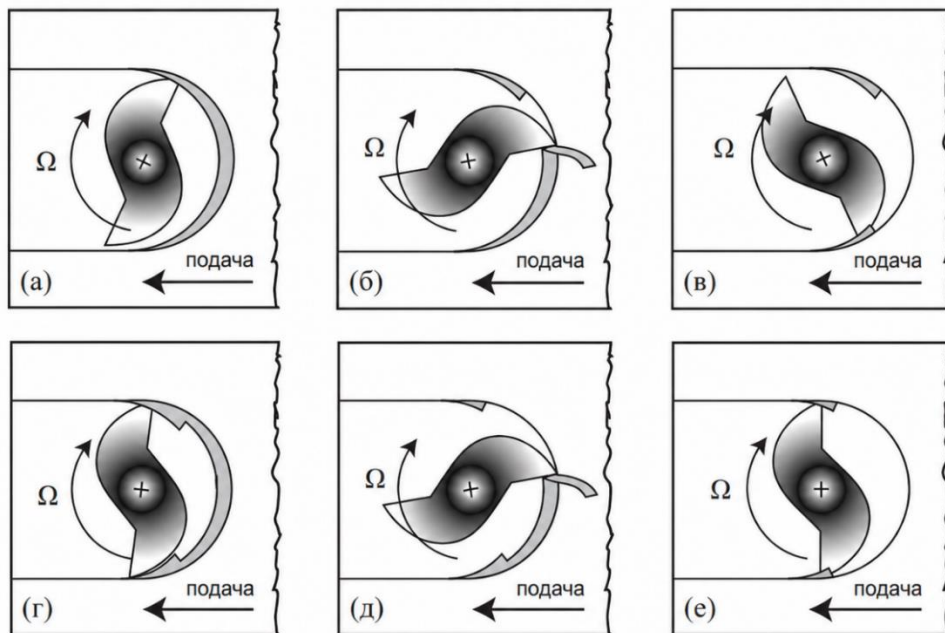


Рис. 1.27 – Мікрофрезерування з мінімальним впливом товщини стружки: а) – в) перший прохід; г) – е) наступний прохід. [50]

За таких умов процес різання супроводжується поєднанням різання та пластичним витісненням матеріалу, зростанням ролі пружних деформацій і нерівномірним стружкоутворенням, що безпосередньо впливає на точність формоутворення та параметри шорсткості поверхні пазів (рис. 1.28) [50].

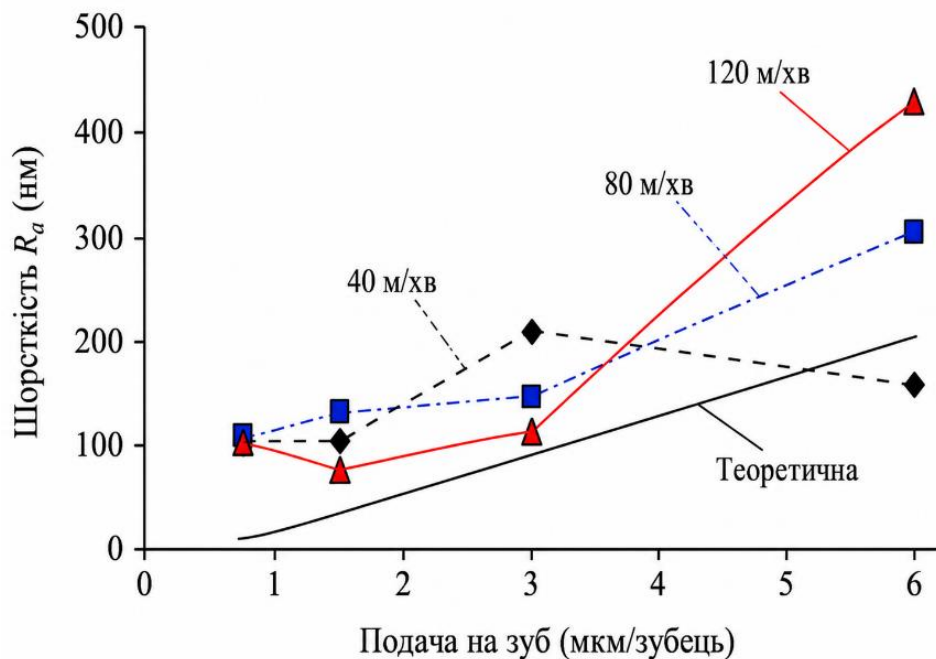


Рис. 1.28 – Середня шорсткість поверхні R_a в залежності від швидкості подачі та швидкості різання. [50]

У фундаментальних роботах з мікромеханіки різання встановлено, що геометрія інструмента та мінімальна товщина зрізу суттєво визначають характер взаємодії різальної кромки з матеріалом і формування поверхневого шару [29, 51].

При цьому класичні уявлення про сталість сил різання та лінійний зв'язок між режимами обробки і якістю поверхні, характерні для макрорізання, не завжди є коректними у мікрмасштабі [2, 3].

З позицій сучасної метрології якість пазів доцільно розглядати в рамках концепції геометричних специфікацій виробів (GPS), відповідно до якої якість визначається сукупністю параметрів геометричної точності, відхилень форми, взаємного розташування поверхонь та стану поверхневого шару [52, 53]. Такий

підхід дозволяє формалізувати вимоги до пазів і забезпечити їх об'єктивний контроль незалежно від застосованого технологічного процесу.

1.5.1. Основні показники якості пазів

Згідно з GPS-підходом, якість пазів включає, перш за все, шорсткість, точність геометричних розмірів (ширини, глибини), та форму його стінок. Для нормування і контролю цих характеристик застосовуються стандарти ISO 1101 та відповідні національні стандарти ДСТУ EN ISO 1101:2018, які регламентують допуски форми, орієнтації та розташування [53, 54].

Важливим складником якості пазів є стан обробленої поверхні, який зазвичай характеризується параметрами шорсткості.

Окрім параметрів шорсткості, якість пазів при мікрофрезеруванні оцінюється комплексом геометричних показників, що характеризують точність формування їх профілю. До таких показників належать ширина та глибина паза, кути нахилу лівої та правої бокових поверхонь, а також радіуси спряження дна паза з боковими поверхнями. Ширина та глибина паза визначають точність відтворення номінальних розмірів і використовуються для оцінювання розмірних похибок оброблення. Кути нахилу бокових поверхонь характеризують відхилення профілю паза від заданої геометрії та є чутливими до прогину інструмента, його биття та вібрацій технологічної системи. Радіуси заокруглення дна паза відображають особливості формування поверхні в зоні переходу між дном і стінками паза та залежать від геометрії різальної кромки, масштабного ефекту й умов стружкоутворення. Схему основних геометричних показників якості паза наведено на рис. 1.29.

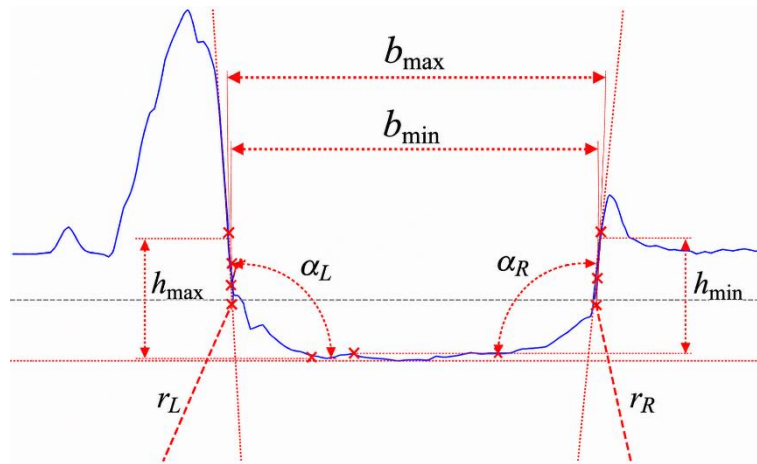


Рис. 1.29 – Схема основних геометричних показників якості паза

У традиційному профільному підході найбільш поширеними є параметри шорсткості поверхонь R_a , R_z та їх похідні, визначені у стандартах ISO 4287 та ISO 4288 [56, 57].

Окремою складовою якості пазів є стан крайок та наявність заусенців [30, 58].

У статті [30] присвяченій дослідженню процесу мікрофрезерування, встановлено, що формування заусенців має складний просторовий характер і може бути класифіковане за декількома характерними зонами їх виникнення. Зокрема, поряд із класичними типами заусенців, додатково виділяють заусенці, сформовані на торцевій частині інструмента, що локалізуються на нижній кромці уступу. Показано, що інтенсивність і морфологія заусенців суттєво залежать від схеми фрезерування. Так, при зустрічному фрезеруванні верхні заусенці характеризуються значною деформацією та розривами вздовж обробленої кромки, тоді як при попутному фрезеруванні вони мають більш стабільну форму, однак можуть містити мікротріщини. При цьому встановлено, що найбільш чутливими до зміни режимів різання є саме верхні заусенці, тоді як бокові заусенці визначаються переважно кінематикою процесу. Це обґрунтовує доцільність використання верхніх заусенців як основного критерію оцінки якості обробки при проведенні експериментальних досліджень [59, 60].

На рис. 1.30 наведено узагальнення отриманих результатів авторів [30].

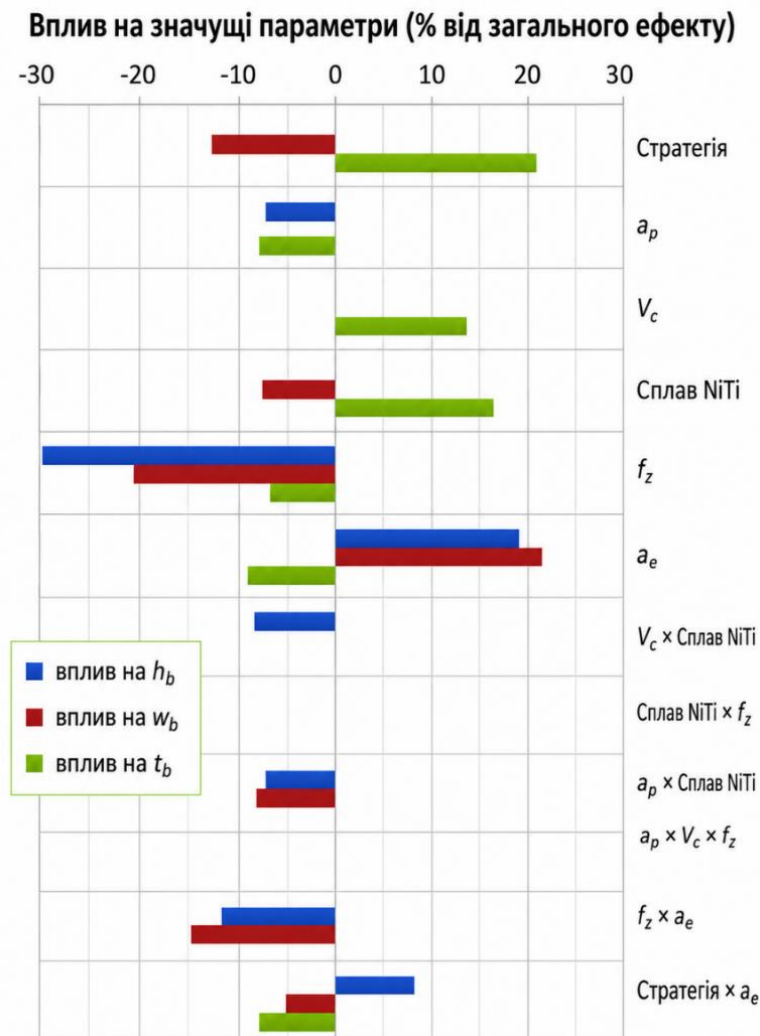


Рис. 1.30 – Зведення значущих впливів на висоту, ширину та товщину заусенців [30]

Встановлено, що три геометричні характеристики заусенців – висота, ширина та товщина – суттєво залежать від подачі на зуб (рис. 1.31) і ширини різання.

Таким чином, основними показниками якості пазів при мікрофрезеруванні сплавів NiTi є шорсткість поверхні, геометрична та розмірна точність, характер формування стружки, інтенсивність утворення заусенців та стан поверхневого шару після оброблення. Формування цих показників визначається складною взаємодією силових, температурних та динамічних явищ, а також особливостями механізму стружкоутворення у мікромасштабі.

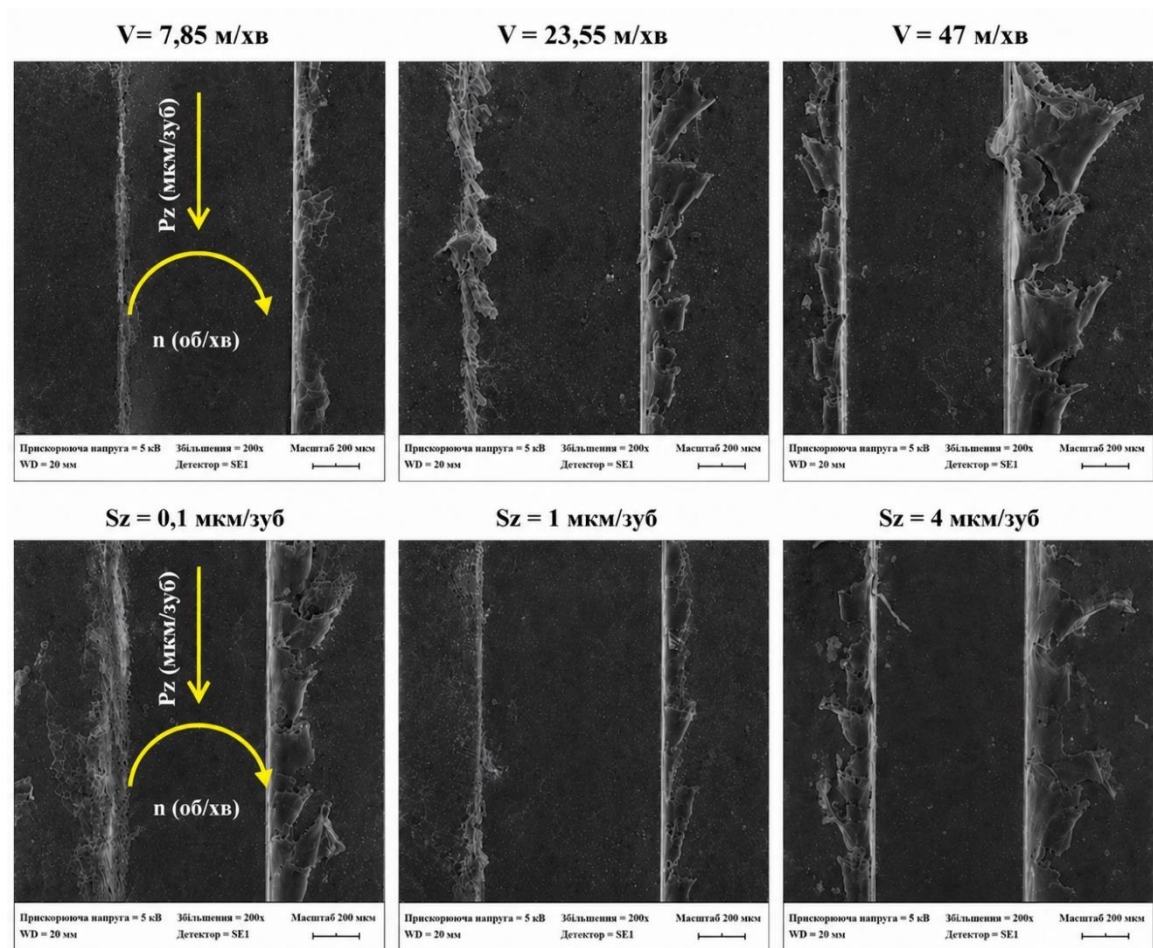


Рис. 1.31 – Вплив подачі на зуб і швидкості різання на ширину заусенців [32]

1.5.2. Методи оцінювання якості пазів

Оцінювання якості пазів, сформованих у процесі мікрофрезерування, є складною метрологічною задачею, що зумовлено мікромасштабом геометричних елементів, а також високою чутливістю процесу формоутворення до режимів різання, геометрії інструмента та динамічної поведінки технологічної системи. Аналіз літературних джерел свідчить, що для адекватної оцінки якості мікропазів необхідно застосовувати комплекс методів, які охоплюють контроль геометричної точності, параметрів поверхневого шару, стану крайок [2, 3, 27, 52].

Для вимірювання геометрії мікропазів широко застосовуються контактні та безконтактні методи. Контактні методи, реалізовані за допомогою

координатних вимірювальних машин та щупових систем, забезпечують високу точність і безпосередню відповідність вимогам стандартів GPS, проте їх застосування у мікрофрезеруванні обмежується можливим впливом сили контакту на результат вимірювання [52, 61].

У зв'язку з цим все більшого поширення набувають безконтактні оптичні методи контролю, які дозволяють досліджувати мікророзмірні елементи без механічної взаємодії з поверхнею. Одним із найбільш ефективних методів є оптична профілометрія, що ґрунтується на аналізі відбитого від поверхні світлового випромінювання та подальшій цифровій реконструкції її просторового рельєфу. Метод забезпечує отримання тривимірної топографії поверхні з високою роздільною здатністю та дозволяє визначати параметри шорсткості, хвилястості, геометричні розміри мікроелементів, а також оцінювати форму і взаємне розташування структурних особливостей поверхні. Основними перевагами оптичної профілометрії є безконтактність вимірювання, відсутність ризику пошкодження досліджуваної поверхні та можливість швидкого отримання великого обсягу просторових даних.

Для дослідження топографії мікрооброблених поверхонь у роботі [37] застосовувався оптичний профілометр KEYENCE VR-6000 (рис. 1.32), який забезпечує автоматизоване формування тривимірних моделей поверхні та дає змогу визначати параметри шорсткості, аналізувати геометричні характеристики мікропазів і оцінювати якість сформованої поверхні після мікрофрезерування.



Рис. 1.32 – 3D-оптичний профілометр KEYENCE VR-6000 для безконтактного вимірювання топографії поверхні [62]

Значна частина досліджень присвячена оцінюванню стану поверхні пазів за параметрами шорсткості. Традиційний профільний підхід, регламентований стандартами ISO 4287 та ISO 4288, передбачає використання параметрів R_a , R_z , R_q , R_t та інші, які широко застосовуються для порівняльної оцінки якості обробки [53, 54].

Важливим елементом методики оцінювання якості пазів є коректна фільтрація вимірних даних. Стандарти серії ISO 16610 регламентують процедури цифрової фільтрації, які дозволяють відокремити форму, хвилястість і шорсткість поверхні [63]. У роботах Raja, Mathia та Pawlus підкреслюється, що некоректний вибір фільтрів може призводити до суттєвих похибок у визначенні параметрів шорсткості, особливо для поверхонь, сформованих у процесі мікрообробки [52, 64].

Окрему групу методів оцінювання якості пазів становлять методи дослідження заусенців та якості формування кромek паза. У технічній документації стан крайок формалізується стандартом ISO 13715, який дозволяє

задавати допустимий рівень нерегламентованої геометрії крайок [66]. У наукових дослідженнях для кількісної оцінки заусенців застосовуються оптична та електронна мікроскопія, а також методи аналізу зображень [67].

1.5.3. Вплив режимів різання на показники якості пазів

У роботах Dornfeld та Chaе встановлено, що при мікрофрезеруванні формування поверхні визначається складною взаємодією між геометрією інструмента, режимами різання та властивостями оброблюваного матеріалу [2, 3]. Це призводить до того, що якість поверхні стає більш чутливою до змін технологічних параметрів, ніж у традиційних процесах обробки [68].

У наукових роботах, присвячених мікрофрезеруванню, наголошується, що оцінювання якості поверхні повинно здійснюватися з урахуванням взаємозв'язку між параметрами процесу різання та характеристиками сформованої поверхні [29].

При мікрофрезеруванні сплавів NiTi сили різання та температурні поля у зоні різання мають істотний вплив на формування поверхневого шару і, відповідно, на якість оброблених пазів (рис. 1.33) [12, 69, 70]. Отримані результати свідчать, що оптимізація режимів різання дозволяє знизити рівень сил різання та температури, що сприяє покращенню якості поверхні та стабільності процесу формоутворення.

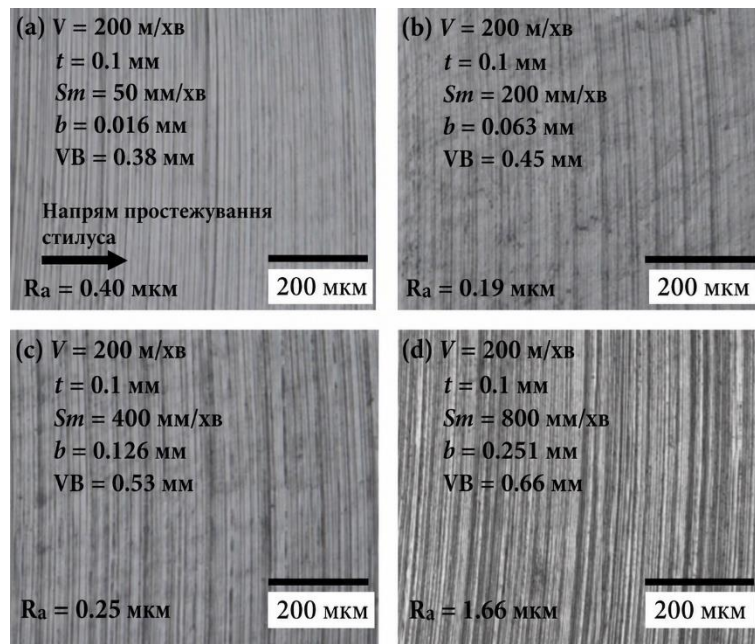


Рис. 1.33 – Вплив режимів фрезерування на параметр шорсткості R_a [70, 71]

Таким чином, аналіз літературних джерел свідчить, що якість пазів при мікрофрезеруванні є багатопараметричною характеристикою, яка формується під впливом геометричних, силових, температурних і динамічних чинників процесу різання. Для мікрофрезерування сплавів NiTi ця комплексність проявляється особливо яскраво, що зумовлює необхідність системного підходу до оцінювання якості пазів із використанням сучасних метрологічних стандартів, експериментальних методів і скінченно-елементних моделювань. Це визначає доцільність подальшого аналізу методів оцінювання якості пазів і обґрунтовує напрям наступних підрозділів дисертаційної роботи.

1.6 Схема дослідження

Аналіз літературних джерел, показує, що процес мікрофрезерування сплавів NiTi суттєво відрізняється від традиційного фрезерування конструкційних матеріалів. Особливості фізико-механічних властивостей нітинолу, зокрема низька теплопровідність, висока пластичність, схильність до деформаційного зміцнення та можливість фазових перетворень у зоні різання, у

поєднанні з малими геометричними розмірами мікроінструмента та співрозмірністю товщини зрізуваного шару з радіусом заокруглення різальної кромки суттєво ускладнюють процес формоутворення пазів.

Як показав аналіз літератури, основними особливостями процесу мікрофрезерування NiTi є прояв масштабного ефекту, нестабільність процесу стружкоутворення [72], підвищені сили різання, температури, схильність до утворення заусенців, а також висока чутливість процесу до динамічних явищ і коливань мікроінструмента. Усі зазначені фактори є взаємопов'язаними та комплексно впливають на умови формування поверхні пазів, геометричну точність, шорсткість поверхні, та стабільність процесу обробки.

Зменшення товщини зрізуваного шару до величин, співрозмірних із радіусом заокруглення різальної кромки, призводить до переходу від стабільного стружкоутворення до переважання пластичного деформування матеріалу, що супроводжується різким зростанням питомих сил різання [73] та локалізацією температури у зоні контакту інструмента із заготовкою. У свою чергу, підвищення силових і температурних навантажень сприяє розвитку адгезійних явищ, прискореному зношуванню мікроінструмента, зростанню рівня вібрацій [74] та погіршенню показників якості сформованих пазів [75].

У зв'язку з цим забезпечення стабільного процесу мікрофрезерування [76] сплавів NiTi потребує комплексного врахування взаємозв'язків між силами різання, температурними та динамічними характеристиками процесу, механізмом стружкоутворення, умовами формування заусенців і показниками якості поверхні (рис. 1. 34).



Рис. 1.34 Схема взаємозв'язку технологічних параметрів процесу мікрофрезерування сплаву NiTi з показниками якості сформованих пазів.

Виявлені особливості процесу мікрофрезерування сплавів NiTi обумовлюють необхідність проведення комплексних експериментальних та скінченно-елементних моделювань, спрямованих на встановлення закономірностей формування пазів при мікрофрезеруванні сплавів NiTi та визначення оптимальних режимів різання, які забезпечують підвищення якості обробки та стабільності процесу.

Для досягнення мети та виконання поставлених завдань у роботі проводяться комплексні експериментальні та скінченно-елементні дослідження процесу мікрофрезерування сплавів NiTi, спрямовані на вивчення закономірностей формування пазів, силових, температурних і динамічних характеристик процесу, а також оцінювання показників якості оброблених поверхонь. Скінченно-елементне моделювання використовувалося для отримання сили різання та температури стружки [77] що доповнювало експериментальні дослідження, забезпечуючи можливість дослідження впливу масштабного ефекту, формування температурних полів і розподілу сил різання. На рис. 1.35 наведено структурну схему взаємозв'язку технологічних параметрів процесу мікрофрезерування сплаву NiTi з показниками якості формування пазів.

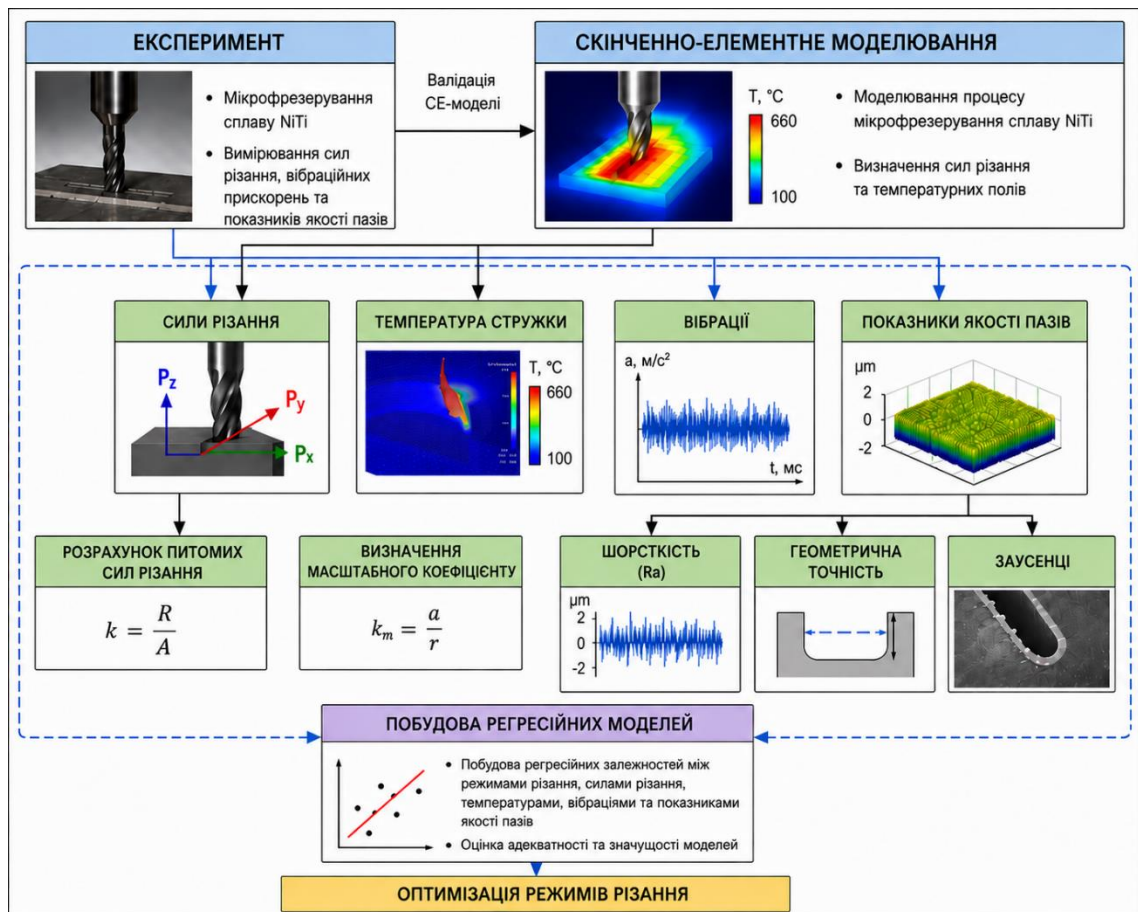


Рис. 1.35 – Структурна схема взаємозв'язку параметрів процесу мікрофрезерування сплаву NiTi та показників якості пазів

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1

1. Аналіз літературних джерел показав, що мікрофрезерування є перспективним методом формування пазів у виробах зі сплавів NiTi завдяки високій точності, гнучкості процесу, можливості формування складних мікропрофільних поверхонь та відносно малому тепловому впливу на поверхневий шар матеріалу.

2. Основними чинниками, які ускладнюють мікрофрезерування NiTi, є висока пластичність, псевдопружність, деформаційне зміцнення, низька теплопровідність та висока адгезійна активність матеріалу, що призводить до підвищених сили різання, температури, нестабільності стружкоутворення та інтенсивного утворення заусенців.

3. При мікрофрезеруванні суттєво проявляється масштабний ефект, внаслідок чого при малих товщинах зрізуваного шару зростає частка пластичного витіснення матеріалу, погіршуються умови стружкоутворення і якість сформованої поверхні.

4. Геометричні параметри заусенців суттєво залежать від подачі на зуб, швидкості різання, глибини різання та умов охолодження. Використання охолодженого повітря та мастильно-охолоджувальних технологічних середовищ дозволяє зменшити ширину заусенців і покращити якість сформованих пазів.

5. Якість пазів визначається комплексною взаємодією силових, температурних, динамічних та структурно-фазових явищ, які впливають на шорсткість поверхні, геометричну точність пазів та стан поверхневого шару.

6. Більшість сучасних досліджень присвячені окремим аспектам мікрофрезерування NiTi, тоді як комплексний взаємозв'язок між режимами різання, силами, температурами, вібраціями та показниками якості пазів залишається недостатньо дослідженим.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА СКІНЧЕННО-ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ СПЛАВУ NiTi

2.1. Оброблюваний матеріал та підготовка заготовок для мікрофрезерування

В дисертаційній роботі проведено експериментальні дослідження з оброблюваності аустенітного сплаву $\text{Ni}_{56,5}\text{Ti}_{43,5}$ (мас. %). Хімічний склад сплаву представлено в табл. 2.1 [69].

Таблиця 2.1

Хімічний склад сплаву NiTi

Елемент	Ni	Ti	O	C	Fe	N	Si	H
%	56,05	43,65	0,019	0,007	0,006	0,003	0,001	0,001

Зразки було отримано у вигляді кубічних заготовок розміром $30 \times 30 \times 30$ мм, що попередньо були оброблені торцевим фрезеруванням (рис. 2.1).

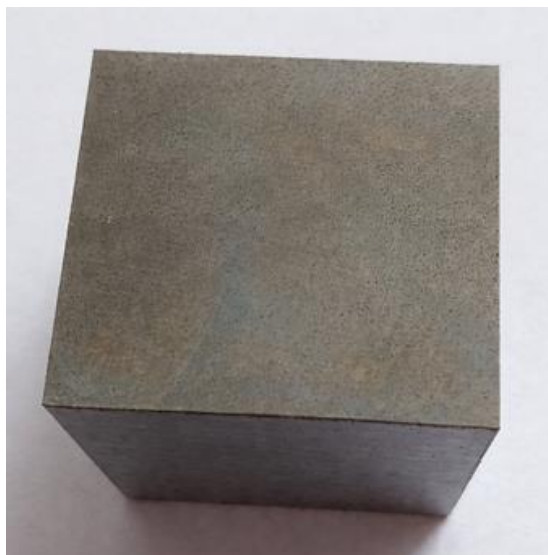


Рис. 2.1 – Заготовка із сплаву NiTi

Для проведення механічної обробки першим етапом обробки було чорнове шліфування поверхні за допомогою шліфувального круга $200 \times 40 \times 2$ A60K6V до шорсткості R_a 1,5 мкм. Другим етапом було мікрофрезерування

пазів, що здійснювалося твердосплавними мікрофрезами «GARANT Master Titan» з покриттям TiAlN діаметрами 0,2, 0,5 та 1 мм [78]. Обидві операції проводилися при одній установці заготовки.

Для досліджень з визначення вібраційного сигналу при мікрофрезеруванні сплаву NiTi було використано заготовку розміром 30x30x30 мм, в якій попередньо виконано допоміжні технологічні елементи (рис. 2.2): пази для проходу інструмента та різьбовий отвір для кріплення вібродатчика ДН-3. Підготовка поверхні здійснювалася аналогічно попередньому дослідженню з виміру сил різання.



Рис. 2.2 – Заготовка із сплаву NiTi для досліджень з визначення вібраційних сигналів під час мікрофрезерування

2.2. Обладнання, інструменти та вимірювальне обладнання

Верстати. Експериментальні дослідження виміру складових сил різання проводились з застосуванням 5-осьового вертикально-фрезерного верстата DMU 80 eVo Deckel Maho (рис. 2.3).



Рис. 2.3 – Вертикально-фрезерний верстат DMU 80 eVo Deckel Maho [79]

5-осьовий вертикально-фрезерний верстат DMU 80 eVo, забезпечує високу жорсткість технологічної системи, точність позиціонування та стабільність процесу різання при обробці мікроелементів. Завдяки високошвидкісному шпинделю та можливості одночасної багатовісної обробки верстат дозволяє реалізовувати високу точність обробки пазів. Основні технічні характеристики верстата наведено в табл.2.2.

Таблиця 2.2

Характеристики вертикально-фрезерного верстата DMU 80 eVo [79]

Характеристика	DMU 80 eVo
Тип	5-осьовий вертикально-фрезерний
Хід по осі X/Y/Z, мм	800/650/550
Градуси по осі С (оберт)	360°
Градуси по осі В(нахил)	-5° до +110°
Швидкість подачі, м/хв	80
Швидкість холостого ходу, м/хв	50
Розмір столу, мм	800 × 700
Макс. вага заготовки, кг	600
Тип шпинделя	HSK-A63
Оберти шпинделя, об/хв	20 – 18 000
Потужність приводу шпинделя, кВт	35/25 (40% / 100%)
Крутний момент шпинделя, Нм	130/87 (40%/100%)

Закінчення табл. 2.2

Охолоджувальний бак, бар	600
Тримач інструменту	BT-40
Кількість слотів у магазині інструментів	120
Макс. діаметр інструменту	130
Макс. довжина інструменту, мм	300
Макс. вага інструменту, кг	6
Номінальна потужність кВА	45
Обладнання	Поворотний стіл з ЧПУ, включаючи охолодження столу, системи прямого вимірювання; Конвеєр для стружки; Інфрачервоний сенсорний зонд HEIDENHAIN TS 649; Підготовка до використання 3D quickSET; Laser для вимірювання довжини та діаметра інструменту; Підготовка до системи обробки ; Інтерфейс EROWA через M65; Програмовані форсунки для охолоджувальної рідини; Промивний пістолет для промивання стружки; Електронний маховик.

Для проведення експериментальних досліджень оцінки вібраційної стабільності процесу мікрофрезерування сплаву NiTi було застосовано вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-2SSYT-NG (рис. 2.4), який характеризується високою жорсткістю конструкції, значною швидкістю переміщень та високошвидкісним шпинделем із прямим приводом.



Рис. 2.4 – Вертикально-фрезерний верстат HAAS VF-2SSYT-NG [80]

Конструктивні особливості верстата забезпечують стабільність процесу різання та точність формоутворення при виконанні операцій мікрофрезерування. Основні технічні характеристики обробного центру наведено в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Характеристики станка HAAS VF-2SSYT-NG [80]

Характеристика	HAAS VF-2SS
Тип	3-осьовий вертикально-фрезерний
Хід по осі X/Y/Z, мм	762/508/508
Відстань від верху шпинделя до столу (~ макс.), мм	610
Потужність приводу шпинделя, кВт	22,4
Оберти шпинделя, об/хв	12 000
Швидкість подачі, м/хв	21,2
Максимальний крутний момент	122,0 Нм при 2000 об/хв
Конусність	СТ40 BT40 HSK-A63
Розмір столу, мм	914 × 457
Макс. вага заготовки, кг	680
Швидкість холостого ходу, м/хв	35,6
Максимальна робоча подача, м/хв	21,2
Швидке переміщення по осі X/Y/Z, м/хв	35,6
Тип магазину інструменту	SMTC
Кількість інструментів у магазині	30+1
Максимальний діаметр інструмента (без пропуску комірок), мм	64
Максимальний діаметр інструмента (із пропуском сусідніх комірок), мм	127
Максимальна довжина інструмента, мм	279
Макс. вага інструменту, кг	5
Час зміни інструмента, с.	1,8
Вага, кг	3539

Різальний інструмент. Для виконання операцій мікрофрезерування застосовувалися кінцеві твердосплавні фрези GARANT Master Titan з покриттям TiAlN [78] діаметрами 1, 0,5 та 0,2 мм і радіусом заокруглення різальної кромки 0,01 мм (рис. 2.5).

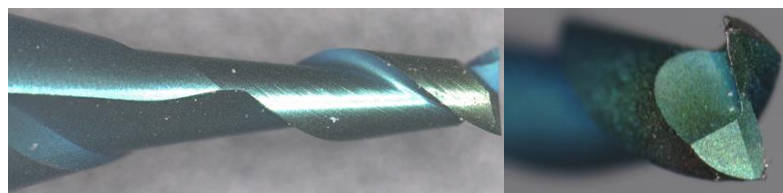


Рис. 2.5 – Кінцева твердосплавна фреза GARANT Master Titan з TiAlN покриттям діаметром 0,5 мм [81]

Підготовка зразка до експериментальних досліджень здійснювалася із застосуванням твердосплавного інструменту (рис. 2.6) промислової серії GARANT Master [78], призначеного для обробки титанових та нікелевих сплавів.



Рис. 2.6 – Твердосплавний інструмент: а) 3 мм кінцева фреза GARANT Master Titan HPC, TiAlN б) 4,2 мм свердло HPC DIN 6537K HA IC в) M5 фреза різьбова трьохпрофільна GARANT Master TM з покриттям AlTiN [78]

За допомогою інструменту (рис. 2.6) виконувалася обробка заготовки, для подальшого закріплення датчика та забезпечення стабільних умов реєстрації вібраційних сигналів. Вибір інструменту визначався необхідністю забезпечення стабільної геометрії поверхні та мінімізації дефектів, які могли б впливати на результати вібраційних вимірювань. За результатами аналізу літературних джерел, наведених у розділі 1, встановлено, що при мікрофрезеруванні сплавів NiTi рекомендовано обирати інструмент, для якого співвідношення мінімальної товщини зрізу до радіуса заокруглення різальної кромки мікрофрези становить не менше 10 %, а в окремих випадках - понад 50 % [69].

Вимірювальне обладнання. Для визначення силових характеристик процесу мікрофрезерування було проведено вимірювання складових сил різання із застосуванням багатокомпонентного динамометра Kistler 9257B (рис.

2.7), що забезпечує одночасну реєстрацію трьох взаємно перпендикулярних компонент сили різання (P_x , P_y , P_z) у реальному часі.

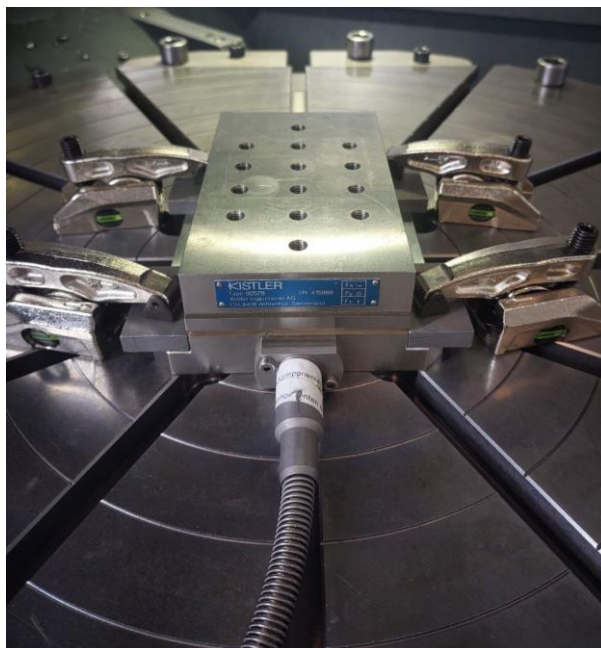


Рис. 2.7 – Динамометр KISTLER 9257B [82]

Аналогово вихідні сигнали з динамометра підсилювалися за допомогою підсилювача заряду Kistler 5070 та оцифровувалися цифровим аналоговим перетворювачем Goldammer USB-Basic G0S-1034-4 рис. 2.8. Подальша обробка, фільтрація та аналіз експериментальних даних здійснювався із застосуванням програмного пакета National Instruments DIAdem.



Рис. 2.8 – Вимірювальне обладнання: а) підсилювач аналогового вихідного сигналу Kistler 5070 [83]; б) аналого-цифровий перетворювач Goldammer USB-Basic G0S-1034-4 [84]

Дослідження вібраційних сигналів виконувалося із застосуванням п'єзоелектричного віброперетворювача ДН-3 (рис. 2.9, а), встановленого за напрямком дії складової сили R_x . Реєстрація та обробка вібраційних сигналів здійснювалися за допомогою аналого-цифрового перетворювача E20-10 L-Card (рис. 2.9, б) із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення LGraph, що дозволило виконувати спектральний та часовий аналіз сигналів і оцінювати вібраційну стабільність процесу різання.



Рис. 2.9 – Вимірювальне обладнання: а) аналого-цифровий перетворювач E20-10 L-Card [85]; б) п'єзоелектричний віброперетворювач ДН-3 [86]

Оцінювання якості обробленої поверхні та геометричних параметрів сформованих пазів здійснювалося із застосуванням безконтактного оптичного профілометра Keyence VR-6000 (рис. 2.10), за допомогою якого було, визначено параметри шорсткості (R_a) дна паза, а також вимірювання геометрії паза та заусенців.



Рис. 2.10 –3D-профілометр Keyence VR-6000 [62]

Таким чином, застосування зазначеного вимірювального обладнання дозволило забезпечити достовірну реєстрацію силових, вібраційних даних та визначити геометрію паза при мікрофрезеруванні сплаву NiTi і встановити взаємозв'язок між режимами різання та показниками якості оброблених поверхонь.

2.3. Методики експериментальних досліджень

Планування експерименту для процесу мікрофрезерування включає вибір змінних, порядок проведення експерименту, аналіз даних та обробку результатів. Це дозволяє оптимізувати процес для досягнення максимальної точності та якості обробки.

Планування експерименту для процесу мікрофрезерування включає вибір змінних, порядок проведення експерименту, аналіз даних та інтерпретацію результатів. Це дозволяє оптимізувати процес для досягнення максимальної точності та якості обробки.

Для дослідження впливу технологічних параметрів на процес мікрофрезерування пазів у сплаві NiTi було застосовано метод планування

експерименту в програмі JMP. Використання даної програми дозволяє при мінімальній кількості дослідів отримати адекватні регресійні моделі другого порядку та оцінити як основні ефекти факторів, так і їх взаємодію. У якості незалежних змінних (факторів) обрано основні параметри процесу мікрофрезерування, що наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4.

Рівні варіювання факторів експерименту

Рівень факторів	t, мм	Sz, мм/зуб	V, м/хв
Нижній (-1)	0,03	0,001	10
Середній (0)	-	0,002	14
Верхній (+1)	0,1	0,003	18

На основі обраних факторів та рівнів було сформовано матрицю експерименту з 18 дослідів. Формування плану експерименту та подальша обробка результатів здійснювались у програмному середовищі JMP.

Експериментальні дослідження процесу мікрофрезерування проводились для сплаву NiTi при обробці пазів мікрофрезами. У процесі досліджень визначалися складові сили різання (P_x , P_y , P_z), параметри вібрацій (зокрема середньоквадратичне прискорення RMS), параметри шорсткості R_a дна паза та геометрії паза. Для більш глибокого аналізу процесу було використано скінченно-елементне моделювання, що дозволило отримати сили різання та температури.

На основі отриманих експериментальних та результатів скінченно-елементного моделювання були побудовані рівняння множинної регресії, які описують залежність вихідних параметрів процесу (сили різання, температури, вібрації, шорсткість поверхні, геометрії паза) від вхідних технологічних факторів. Такі моделі враховують лінійні та взаємодійні ефекти факторів, що дозволяє адекватно описати складний нелінійний характер процесу мікрофрезерування. Математична модель залежності вихідної величини Y (наприклад, сили різання, параметра шорсткості R_a) від незалежних змінних будується у вигляді рівняння:

$$Y=b_0+b_1x_1+b_2x_2+b_3x_3+b_4x_1x_2+b_5x_1x_3+b_6x_2x_3+b_7x_1^2+b_8x_2^2+b_9x_3^2 \quad (2.1)$$

де Y – прогнозоване значення відгуку;

x_1, x_2, x_3 – нормалізовані значення незалежних змінних;

b_0 – вільний член;

$b_1...b_9$ – коефіцієнти регресії, що характеризують лінійний, парний та квадратичний впливи факторів.

Оцінка адекватності побудованих моделей здійснювалась із використанням методів дисперсійного аналізу. Основними критеріями адекватності моделей були коефіцієнт детермінації R^2 , який характеризує ступінь відповідності моделі експериментальним даним, та F - критерій Фішера, що дозволяє оцінити статистичну значущість моделі. Моделі вважалися адекватними за умови $R^2 > 0,75$ і статистично значущого значення F -критерію Фішера ($p < 0,05$).

2.3.1.Методика вимірювання сил різання

Для дослідження впливу режимів різання на силові характеристики процесу мікрофрезерування сплаву NiTi з застосуванням фрез діаметра (0,2, 0,5, 1 мм) було сформовано план експерименту табл. 2.5, що передбачав варіювання основних технологічних параметрів обробки. Обробка здійснювалась без застосування мастильно-охолоджувальної рідини. З метою забезпечення сталості умов експерименту та виключення впливу зносу інструменту для кожного випробування застосовувалася нова фреза. Планування експерименту передбачало отримання залежності складових сили різання від режимів різання (подачі, швидкості та глибини різання) при мікрофрезеруванні сплаву NiTi.

Таблиця 2.5

Режими різання для планування експерименту

Діаметр фрези d , мм	Глибина різання t , мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Швидкість різання V , м/хв
1	0,2	0,003	20
1	0,1	0,003	20
0,5	0,1	0,001	20
0,2	0,1	0,00002	11,3

Сили різання фіксувалися за допомогою спеціального апаратного комплексу (рис. 2.11), який складається з динамометру, АЦП та персонального комп'ютера для обробки даних. Частота по кожному із трьох каналів складала 1000 Гц. Схема проведення досліджень з фіксування складових сили різання зображено на рис. 2.12.



Рис. 2.11 – Спеціальний апаратний комплекс для вимірювання складових сили різання

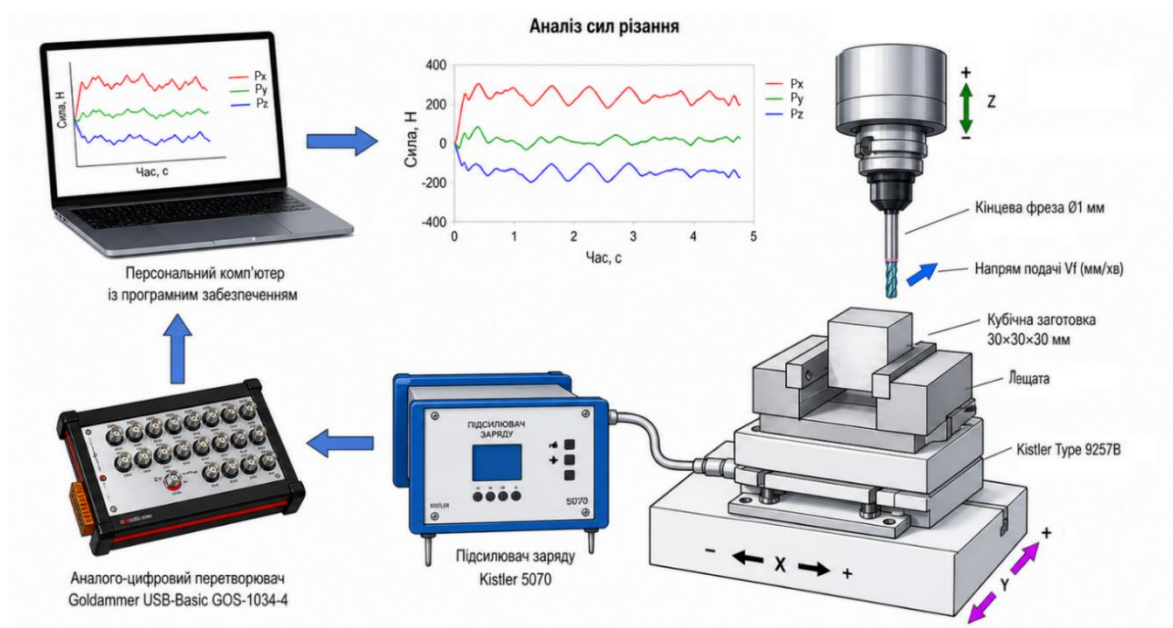


Рис. 2.12 – Схема фіксування сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi

Заготовка розміром 30х30х30 фіксувалася у лещатах які механічно кріпилися на вимірювальний блок динамометру марки KISTLER 9257B (рис. 2.13).



Рис. 2.13 – Механічне закріплення заготовки на вимірювальний блок динамометру KISTLER 9257B

Результати вимірювання сили різання фіксувалися на моніторі персонального комп'ютера (рис. 2.14) і були збережені після кожного експерименту.

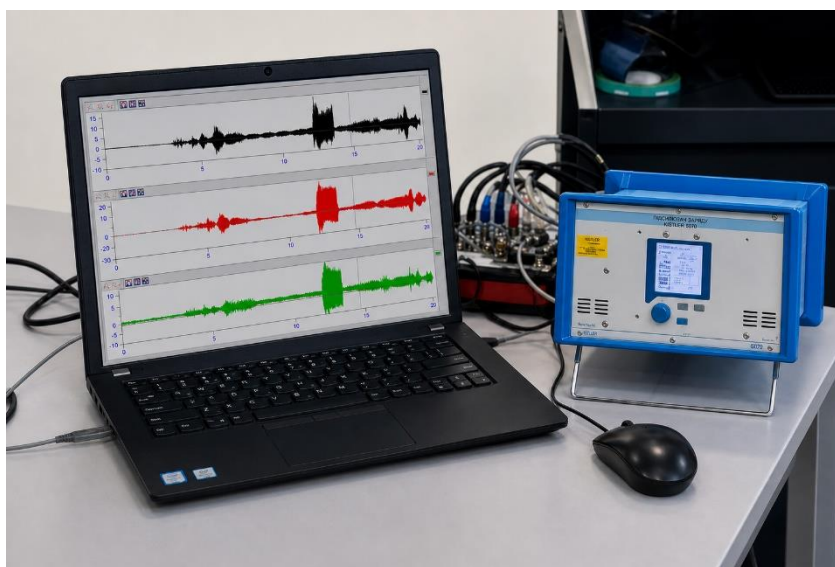


Рис. 2.14 – Фіксування результатів з вимірювання сил різання

2.3.2. Методика дослідження вібраційних сигналів

Експериментальні дослідження вібраційних сигналів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi проводилися з метою оцінки вібраційної стабільності процесу обробки та визначені впливу режимів різання на вібраційні сигнали при мікрофрезеруванні. Дослідження виконувалися на вертикально-фрезерному верстаті HAAS VF-2SSYT-NG із застосуванням твердосплавних двозубих фрез GARANT Master Titan з TiAlN покриттям діаметром 1 та 0,5 мм [78]. Обробка здійснювалася без застосування мастильно-охолоджувальної рідини. З метою забезпечення сталості умов експерименту та виключення впливу зносу інструменту для кожного випробування застосовувалася нова фреза. Для зчитування, обробки та запису даних застосовувався п'єзоелектричний віброперетворювач ДН-3 (табл. 2.6), встановлений за напрямком складової сили різання P_x , аналого-цифровий перетворювач E20-10 L-Card, персональний комп'ютер з спеціалізованим програмним забезпеченням LGraph. Схема експериментальної установки показана на рисунку 2.15

Таблиця 2.6

Технічні характеристики віброперетворювача ДН-3

Робочий діапазон частот, Гц	до 4000
Дійсне значення коефіцієнта перетворення віброперетворювача на частоті 160 Гц, мВ·С ² /м	±10%
Відносний коефіцієнт поперечного перетворення, %	<5

Експериментальні дослідження виконувалися в діапазоні режимів різання (табл.2.7), при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезами діаметром 0,5 та 1 мм. Реєстрація сигналів здійснювалася протягом усього циклу обробки пазу, включаючи холостий хід шпинделя, стадію врізання інструмента в заготовку та стадію стабільного різання. Подальший аналіз проводили лише для ділянок

сигналу, що відповідали режиму повного радіального врізання мікрофрези, з метою усунення впливу перехідних процесів.

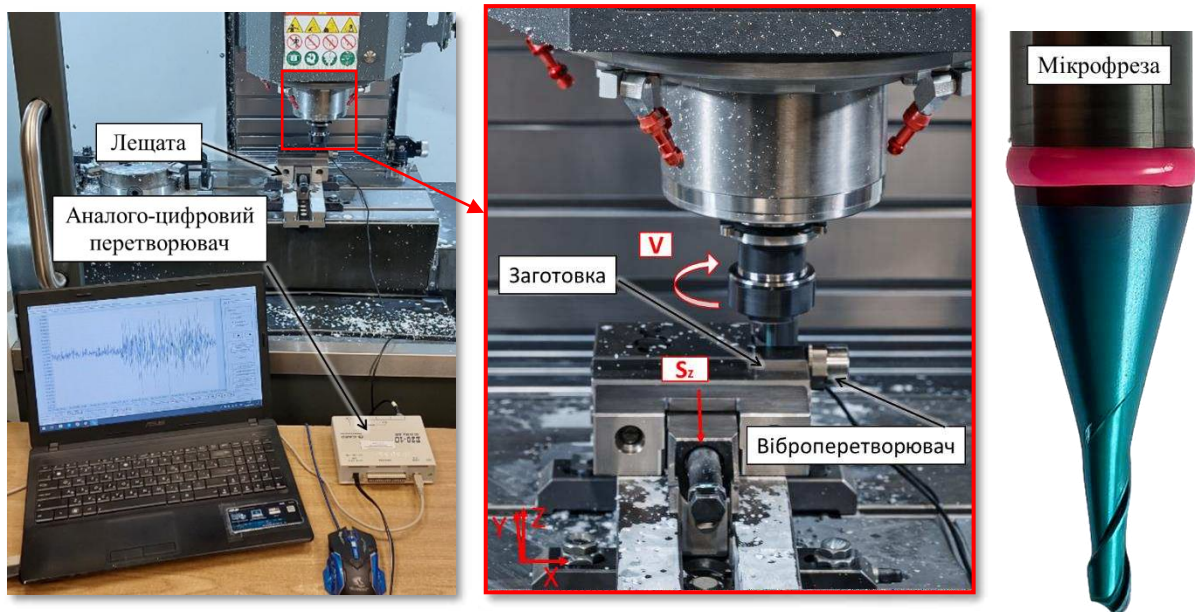


Рис. 2.15 – Експериментальна установка виміру вібраційних сигналів

Таблиця 2.7

Режими різання

№	Глибина різання t , мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Швидкість різання V , м/хв
1	0,03	0,001	10
2	0,1		
3	0,03	0,002	
4	0,1		
5	0,03	0,003	
6	0,1		
7	0,03	0,001	14
8	0,1		
9	0,03	0,002	
10	0,1		
11	0,03	0,003	
12	0,1		
13	0,03	0,001	18
14	0,1		
15	0,03	0,002	
16	0,1		
17	0,03	0,003	
18	0,1		

Первинні експериментальні дані реєструвалися у вигляді часових реалізацій вібраційного прискорення (рис. 2.16).



а)



б)

Рис. 2.16 – Часова залежність вихідного сигналу датчика вібрацій при мікрофрезеруванні фрезою: а) 0,5 мм; б) 1 мм
 $(S_z=0,003 \text{ мм/зуб}, t=0,03 \text{ мм}, V=14 \text{ м/хв})$

Для кількісної оцінки рівня вібрацій застосовувалося середньоквадратичне значення вібраційного прискорення (RMS), яке визначали за виразом.

Первинні дані реєструвалися у вигляді сигналу напруги з віброперетворювача, як функції часу. Для кожного експерименту сигнал розділявся на характерні стадії процесу: холостий хід, врізання інструмента в заготовку та стадію різання з повним радіальним врізанням фрези. Упродовж холостого ходу реєструються низькоамплітудні коливання. Починаючи з

моменту врізання фрези в заготовку, амплітуда коливань різко зростає, а форма сигналу набуває нерегулярного та хаотичного характеру.

Для аналізу частотного складу вібраційних сигналів застосовувалося швидке перетворення Фур'є (FFT), яке забезпечує перехід від часової області сигналу до частотної. Застосування FFT дозволяє визначити домінуючі частоти коливань, оцінити амплітудний склад сигналу та виявити характерні гармоніки, пов'язані з обертанням шпинделя, проходженням зубців фрези та можливими проявами автоколивань технологічної системи. Частота проходження зубців f_3 (Гц) визначається як:

$$f_3 = \frac{n \cdot z}{60}, \quad (2.2)$$

де n – швидкість різання, об/хв; z – кількість зубців фрези.

Подальший аналіз даних ґрунтувався на спектральному аналізі вібраційних сигналів, отриманих в обраному часовому інтервалі 0,3 с. (рис. 2.17)

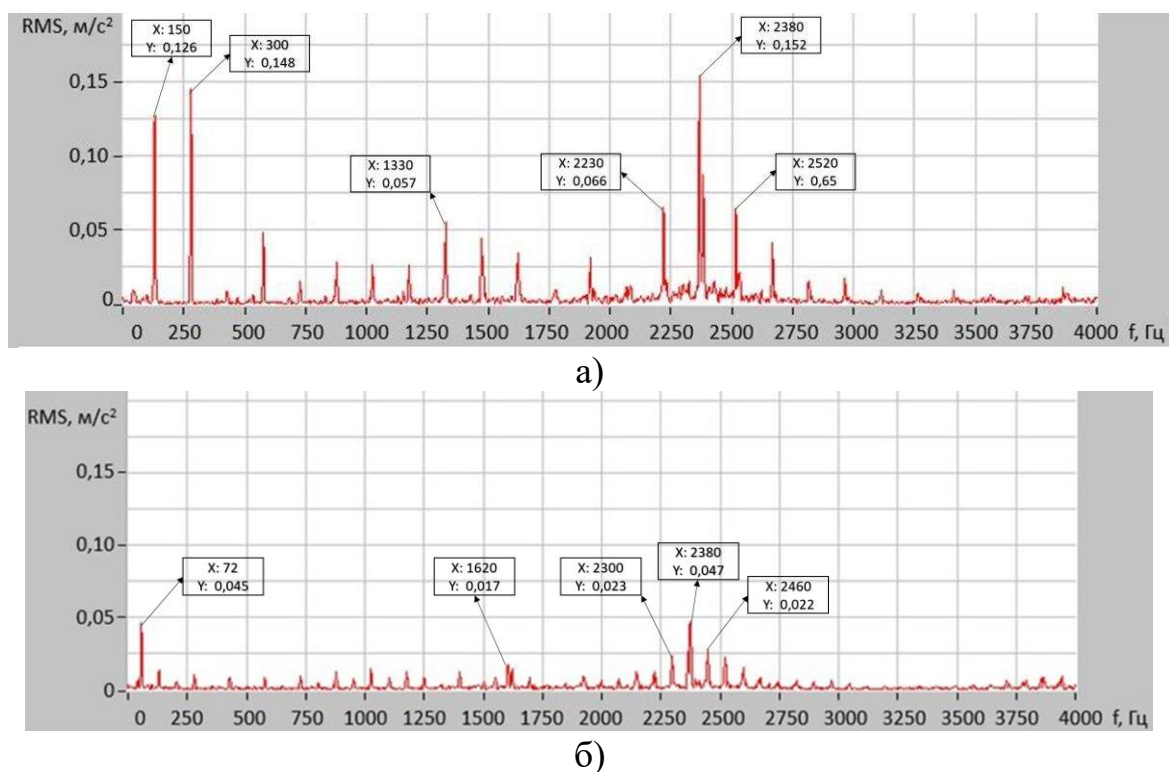


Рис. 2.17 – Частотні спектри сигналу вібраційного прискорення, отриманих в обраному часовому інтервалі 0,3 с: а) 0,5 мм (1,3 с); б) 1мм (4,6 с);

Розрахунок RMS здійснювався для кожного експерименту за сигналами, що відповідали стадії різання з повним радіальним врізанням фрези. Ділянки холостого ходу та врізання інструмента в заготовку з аналізу виключалися з метою усунення впливу перехідних явищ та фонових коливань. Для кожного режиму різання RMS визначалося для п'яти часових інтервалів 0,3 с. із максимальною амплітудою вібраційного прискорення, що дозволило отримати узагальнену оцінку рівня вібрацій.

2.3.3. Методика визначення показників якості пазів

Вимірювання показників шорсткості обробленої поверхні сплаву NiTi при кінцевому мікрофрезеруванні є важливою задачею для визначення ефективності процесів різання та забезпечення якості обриманих пазів.

Для дослідження геометричних параметрів та якості поверхні оброблених пазів для режимів табл. 2.7 застосовувався 3D-профілометр KEYENCE VR-6000 (рис. 2.18), який забезпечує високоточні безконтактні вимірювання топографії поверхні.

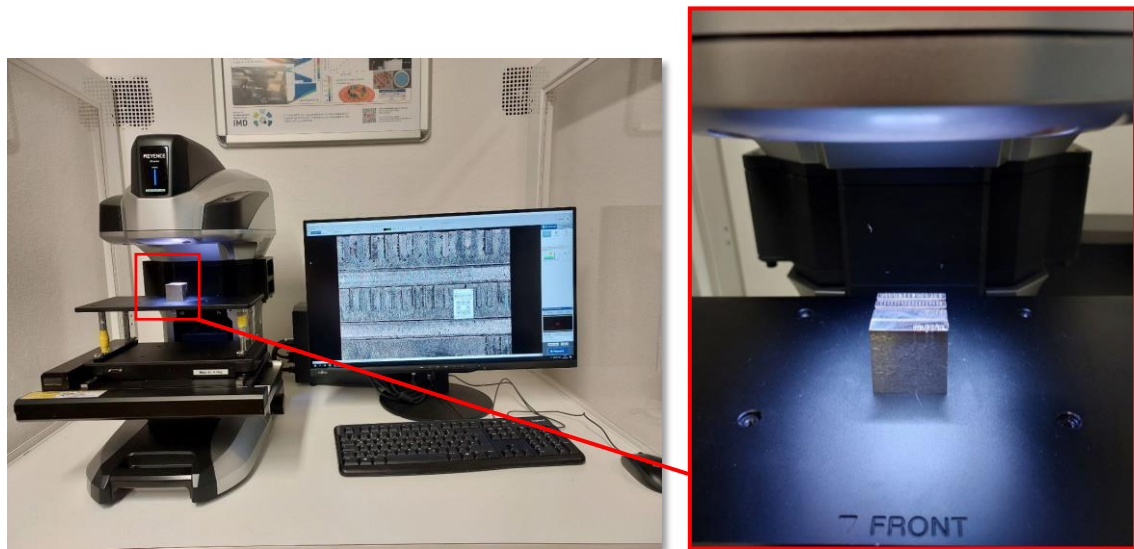


Рис. 2.18 – Експериментальне дослідження пазів за допомогою 3D-профілометра KEYENCE VR-6000

За результатами вимірювань визначено параметри шорсткості поверхні пазів, а також їх основні геометричні характеристики, зокрема ширину, глибину, кути нахилу лівої (вихід зуба) та правої (вхід зуба) бокових поверхонь, а також радіуси заокруглення в зоні переходу дна паза до бокових стінок. Отримані тривимірні моделі поверхні дозволили детально проаналізувати мікрогеометрію оброблених пазів.

Окрім цього, за допомогою профілометра проведено оцінку наявності та розмірів заусенців, сформованих у процесі мікрофрезерування. Це дало змогу визначити їх висоту, форму та локалізацію відносно країв пазу, а також оцінити вплив режимів різання на інтенсивність утворення заусенців.

Було проведено дослідження впливу зносу мікрофрез на формування якості дна паза при обробці сплаву NiTi. Метою дослідження було встановлення закономірностей зміни параметрів якості поверхні залежно від ступеня зносу інструмента та оцінка впливу кількості проходів на шорсткість пазу. Режими різання та умови проведення експерименту наведено в табл. 2.8

Таблиця 2.8

Режими різання

№	Глибина різання, t мм	Подача, S мм/хв	Частота обертання n, об/хв	Кількість проходів	Діаметр фрези d, мм
1	0,1	34,37	5729	1	1
2	0,1	34,37	5729	2	
3	0,1	34,37	5729	5	
4	0,1	34,37	5729	10	
5	0,05	68,75	11459	1	0,5
6	0,05	68,75	11459	2	
7	0,05	68,75	11459	5	
8	0,05	68,75	11459	10	

2.4. Методика скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування

Для симуляції процесу мікрофрезерування застосовувалося спеціалізоване програмне забезпечення на основі методу скінченних елементів,

яке забезпечує можливість дослідження процесів пластичної деформації та різання матеріалів.

У роботі виконано скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування сплаву NiTi з метою визначення сил різання та температури у зоні різання, що слугувало базою для подальших теоретичних та експериментальних досліджень. Для забезпечення однакових умов порівняння результати моделювання аналізувалися після однакової кількості повних обертів фрези. Оцінювання силових характеристик здійснювалося за максимальними значеннями сил різання P_x , P_y , P_z , а температура фіксувалася за максимальним значенням температури стружки.

В SolidWorks розроблено спрощену 3D-модель кінцевої твердосплавної фрези GARANT Master Titan (рис. 2.19).

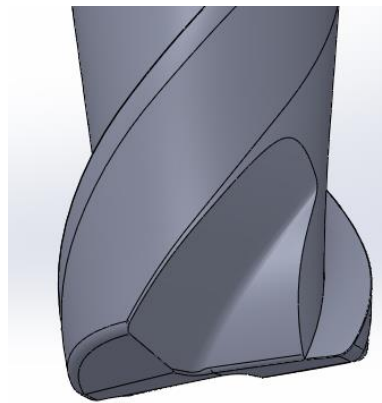


Рис. 2.19 – Спрощена 3D-модель кінцевої твердосплавної фрези GARANT Master Titan

Моделювання всього часу оброблення пазу довжиною 5 мм потребував значного часу та комп'ютерних ресурсів. Враховуючи це, з метою економії розрахункових ресурсів в програмі SolidWorks було розроблено спрощену 3D-модель заготовки з попереднім вирізом (рис. 2.20) для фіксування сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi і подальшого порівняння з експериментальними дослідженнями.

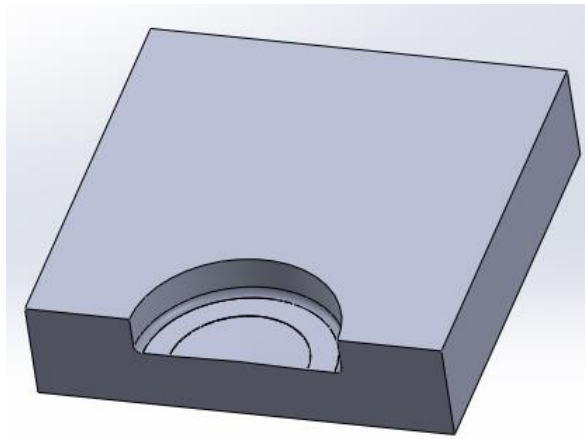


Рис. 2.20 – Спрощена 3D-модель заготовки з попереднім вирізом

Вибір матеріалу заготовки здійснювався методом підбору з бази даних вбудованих матеріалів в програмному продукті та відповідних статей [4, 43, 87] для подальшого налаштування моделі. При наявності опису параметрів моделі деформаційної поведінки матеріалу в програмному пакеті є можливість порівнювати матеріальні властивості та налаштовувати параметри моделі відповідно до характеристики фактичного матеріалу заготовки.

Для пришвидшення розрахунків передбачалося застосування спрощеної моделі мікрофрези – застосовувалася різальна частина мікрофрези без залучення хвостовика (лише робоча різальна частина мікрофрези).

Інструмент та заготовка імпортувалися в програму для налаштування дослідження і перший крок в створенні проекту це написання назви проекту, визначення операції і встановлення системи вимірювань. Тип обробки для фрезерування обиралася операція Milling і встановлювалися параметри різання швидкість різання – 20 м/хв, подача на зуб – 0,003 мм та глибина різання – 0,2 мм, діаметр фрези – 1 мм. Для розрахунку застосовувалися такі параметри: метод – Лагранжа; режим – деформація та теплообмін; кількість кроків моделювання – 2000; температура середовища – постійна і рівна 20 °С; коефіцієнт конвекції – постійний і рівний 0,02 Н/с/мм/ °С; типи об'єктів: заготовка – пластична, інструмент – жорсткий - цей стан визначає об'єкт як недеформований і зберігає задану йому початкову геометрію. При цьому час розрахунку скорочується, порівняно з пружно-пластичним типом.

За допомогою вбудованого інструменту «Object positioning» задавалося коректне розташування інструмента. Результат позиціонування інструмента відносно заготовки показано на рис. 2.21.

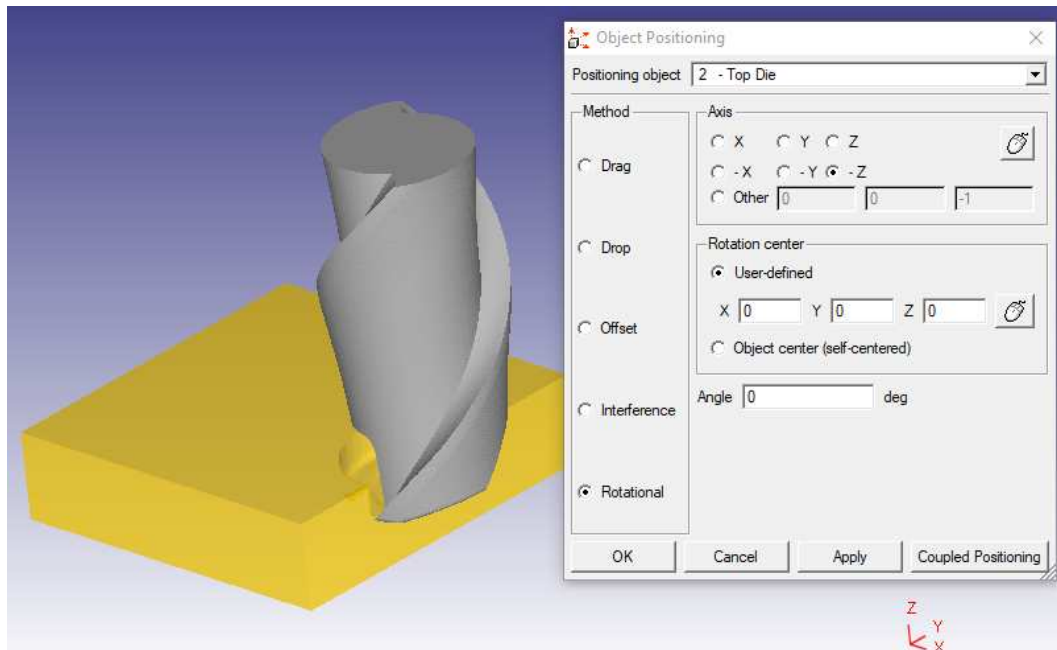


Рис. 2.21 – Налаштування розташування інструмента відносно заготовки

Передбачалося додавання матеріалу різального інструменту рис. 2.22.

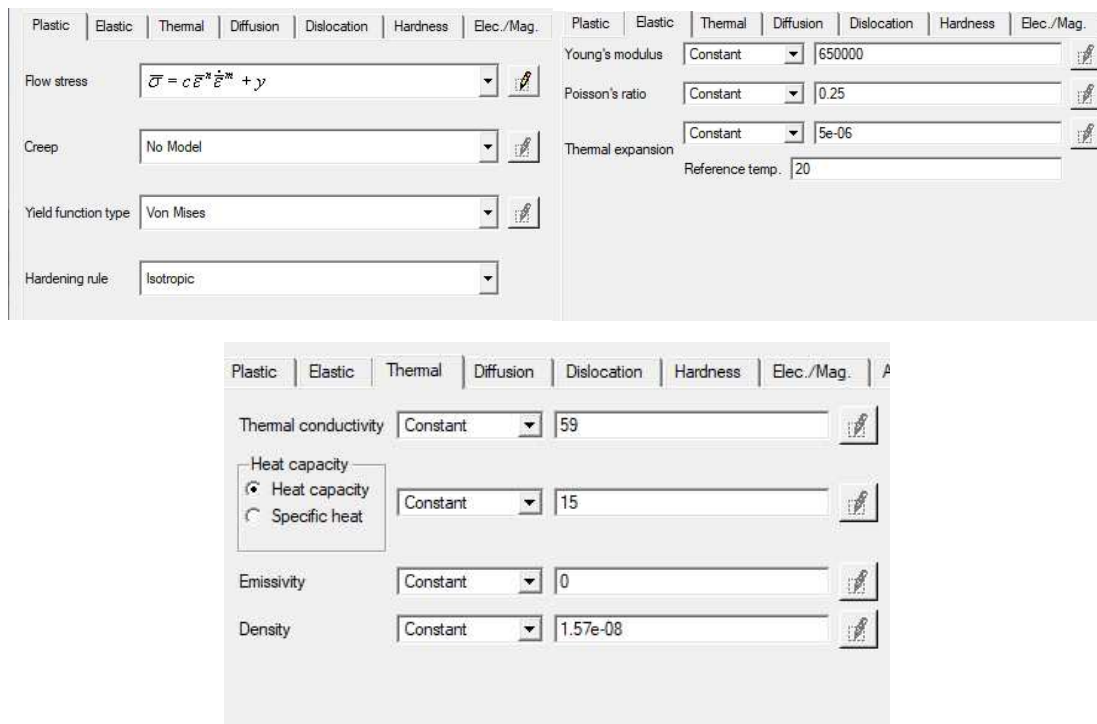


Рис. 2.22 – Параметри моделі матеріалу та теплофізичних властивостей різального інструменту

Характеристики оброблюваного матеріалу (рис. 2.23). Для опису поведінки сплаву NiTi під час мікрофрезерування використовувалася пластична модель матеріалу з критерієм текучості фон Мізеса та ізотропним зміцненням. Залежність напруження текучості від деформації, швидкості деформації та температури задавалася рівнянням Джонсона–Кука. Руйнування матеріалу описувалося критерієм Cockcroft–Latham. Для врахування теплофізичних властивостей використовувалися такі параметри: теплопровідність 18 Вт/(м·К), питома теплоємність 0,837 кДж/(кг·К), густина (6,45e-9) кг/мм³, коефіцієнт випромінювання 0,7. Пружні властивості матеріалу задавалися модулем пружності 83 ГПа та коефіцієнтом Пуассона 0,3.

Граничні умови моделі передбачали жорстке закріплення заготовки та задання руху інструмента відповідно до досліджуваних режимів різання. Фреза розглядалася як абсолютно жорстке тіло. Теплообмін із навколишнім середовищем задавався коефіцієнтом конвекції 0,02 Н/(с·мм·°С), а теплообмін у зоні контакту інструмент–заготовка – коефіцієнтом теплопередачі 11 Н/(с·мм·°С). Для опису контактної взаємодії використовувалася модель тертя з коефіцієнтом тертя ($m = 0,6$).

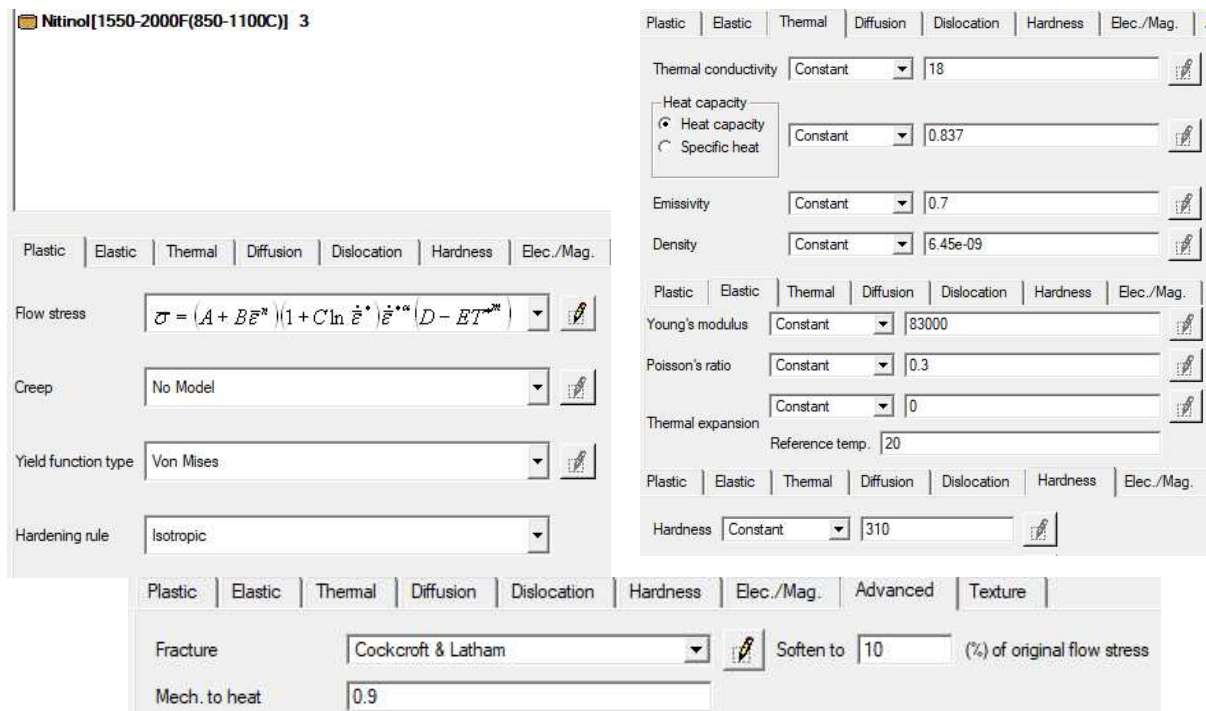
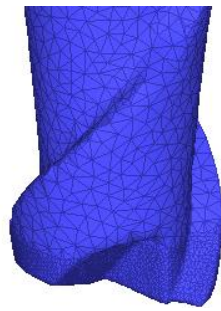
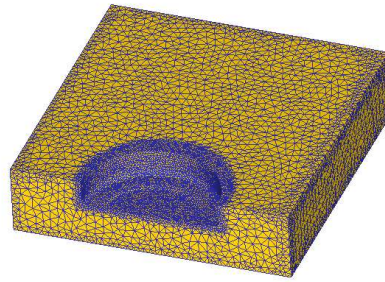


Рис. 2.23 – Налаштування фізико-механічних і теплофізичних властивостей матеріалу заготовки

Наступним кроком була генерація сітки інструменту (рис. 2.24, а) і заготовки (рис. 2.24, б).



а)



б)

Рис. 2.24 – Генерація сітки: а) інструменту, б) заготовки

Для генерації скінченно-елементної сітки використовувався режим User Defined з налаштуванням щільності за схемою Absolute, що забезпечувало необхідну деталізацію зони різання.

Сітки скінченних елементів були адаптивними і періодично реконструювалися для мінімізації спотворення елементів під час деформації (метод глобального пересічення). Сітка різального інструменту містила 32000 скінченних елементів з ущільненням на різальній частині (рис. 2.25).

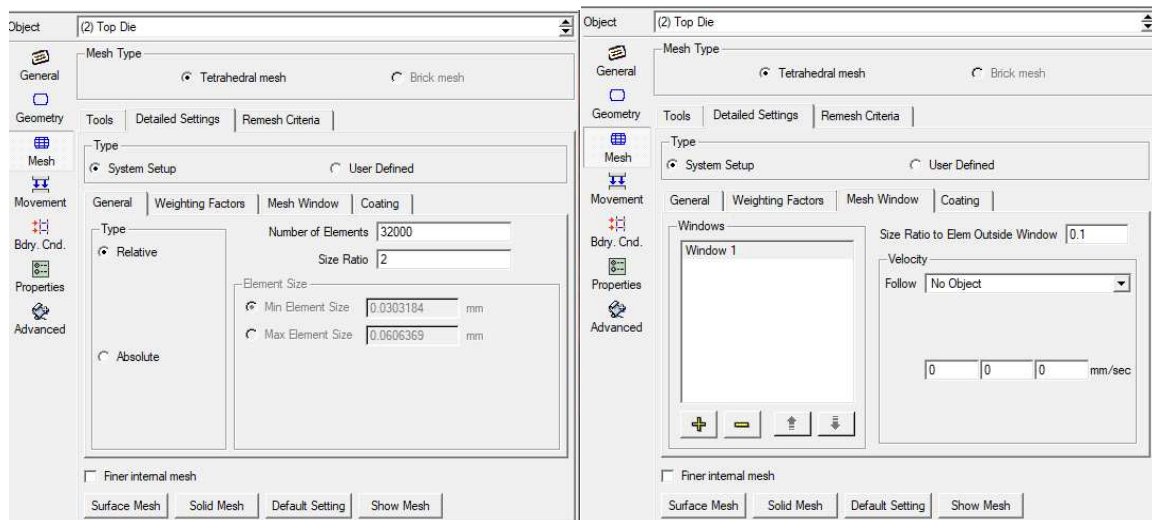


Рис. 2.25 – Генерація сітки для інструменту

Сітка заготовки містила 190000 скінченних елементів з локальним ущільненням в області взаємодії з інструментом, мінімальний розмір елемента складав 0,033 мм, а максимальний 0,067 мм. (рис. 2.26).

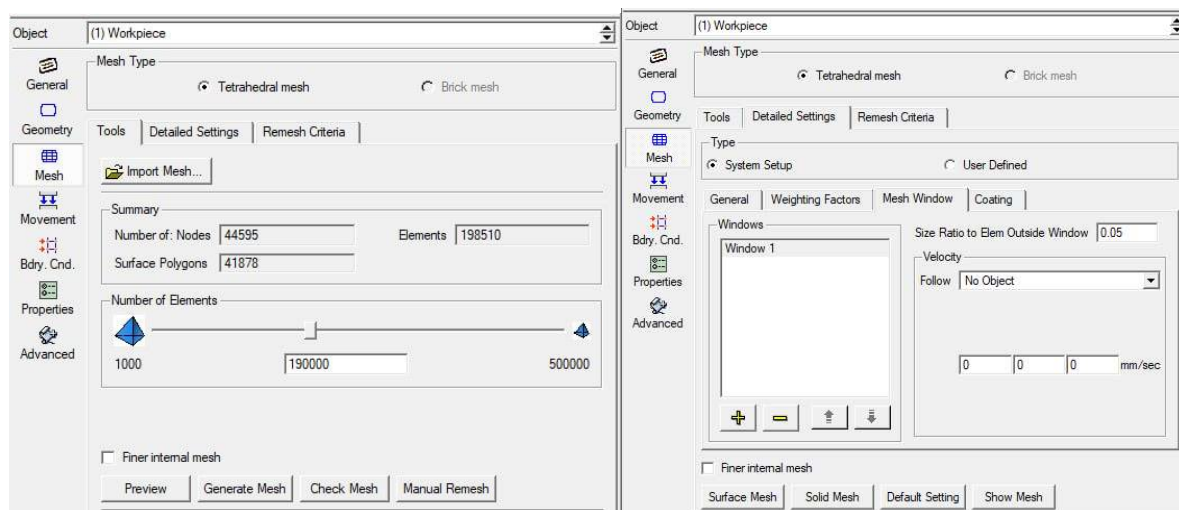


Рис. 2.26 – Генерація сітки для заготовки

У вкладці «Переміщення» для інструменту були задані частота обертання фрези 6366 об/хв та лінійна швидкість подачі 0,63 мм/с (рис. 2.27).

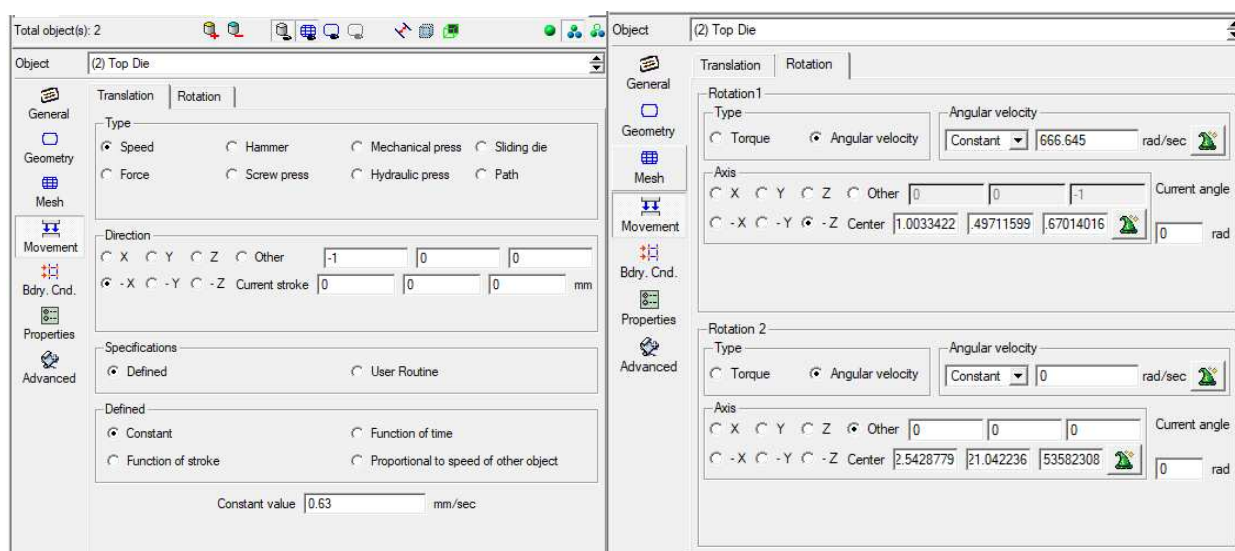
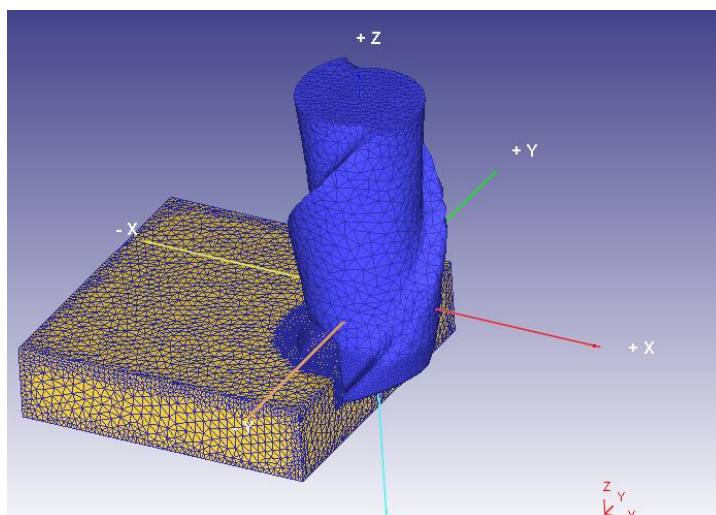


Рис. 2.27 – Переміщення інструмента

У вкладці «Граничні умови об'єкта» (рис. 2.28) було зафіксовано заготовку: для цього обиралися нижня плоскість і задавалося нульове переміщення по осях X, Y та Z, що забезпечує повне закріплення деталі.

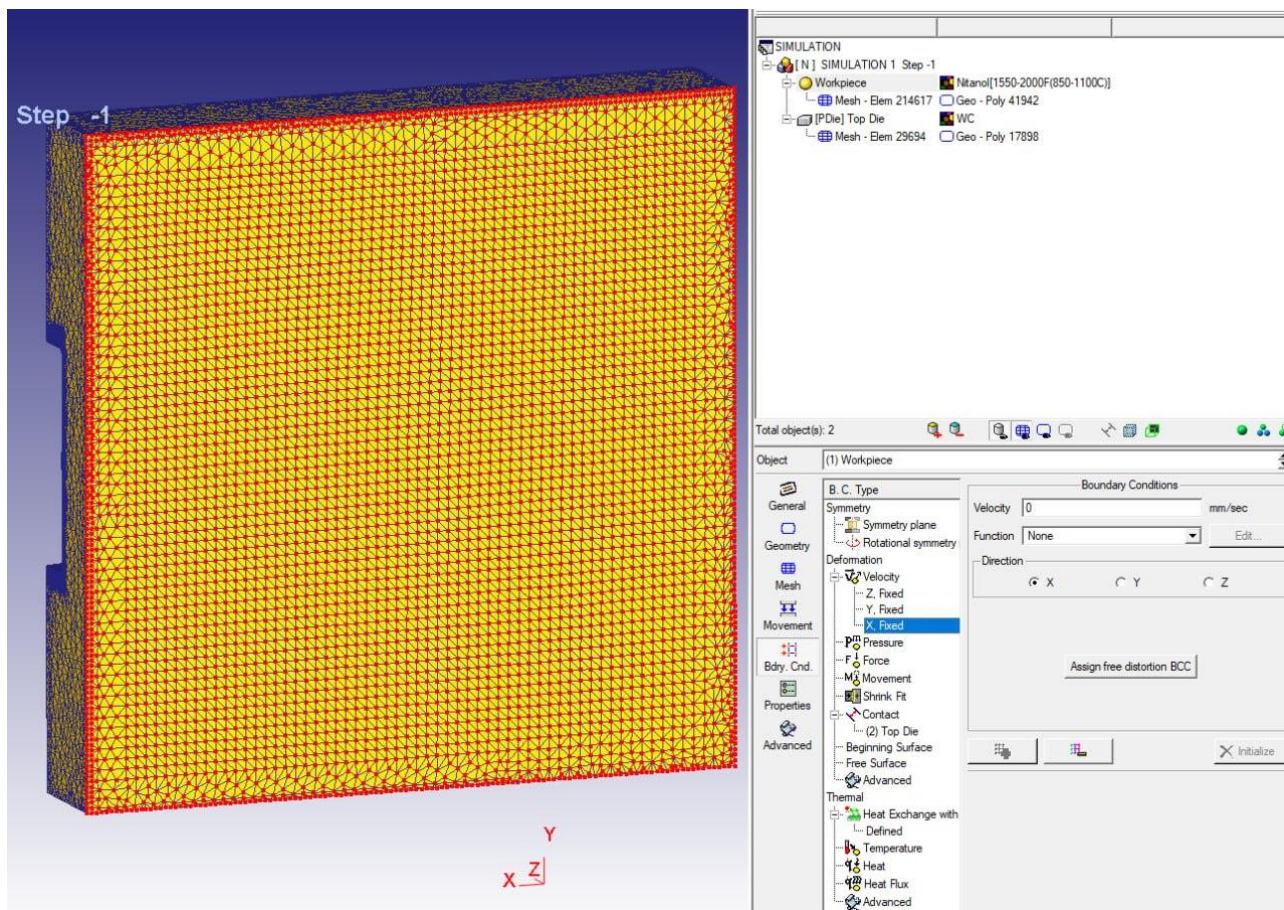


Рис. 2.28 – Вкладка «Граничні умови об'єкта»

При встановленні умов контакту (рис. 2.29) ролі об'єктів були визначені наступним чином: Master призначений інструментом, а Slave - заготовкою. Тип тертя визначений як зсув, з постійним коефіцієнтом тертя 0,6. Коефіцієнт теплопередачі встановлений на рівні 11 Н/с/мм/°C

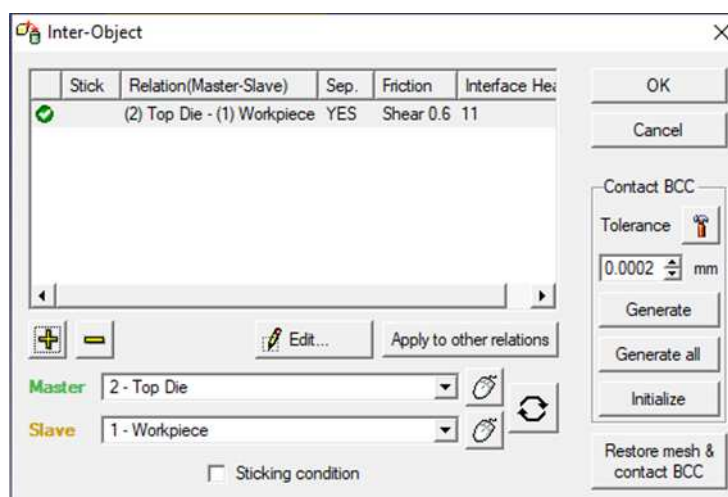


Рис. 2.29 – Умови контакту

Останній крок полягав в генерації бази даних для завершення налаштувань і переходу до запуску рішення, після чого була можливість графічно відобразити результати силових навантажень і температурних характеристик під час моделювання, напруження в зоні різання рис. 2.30.

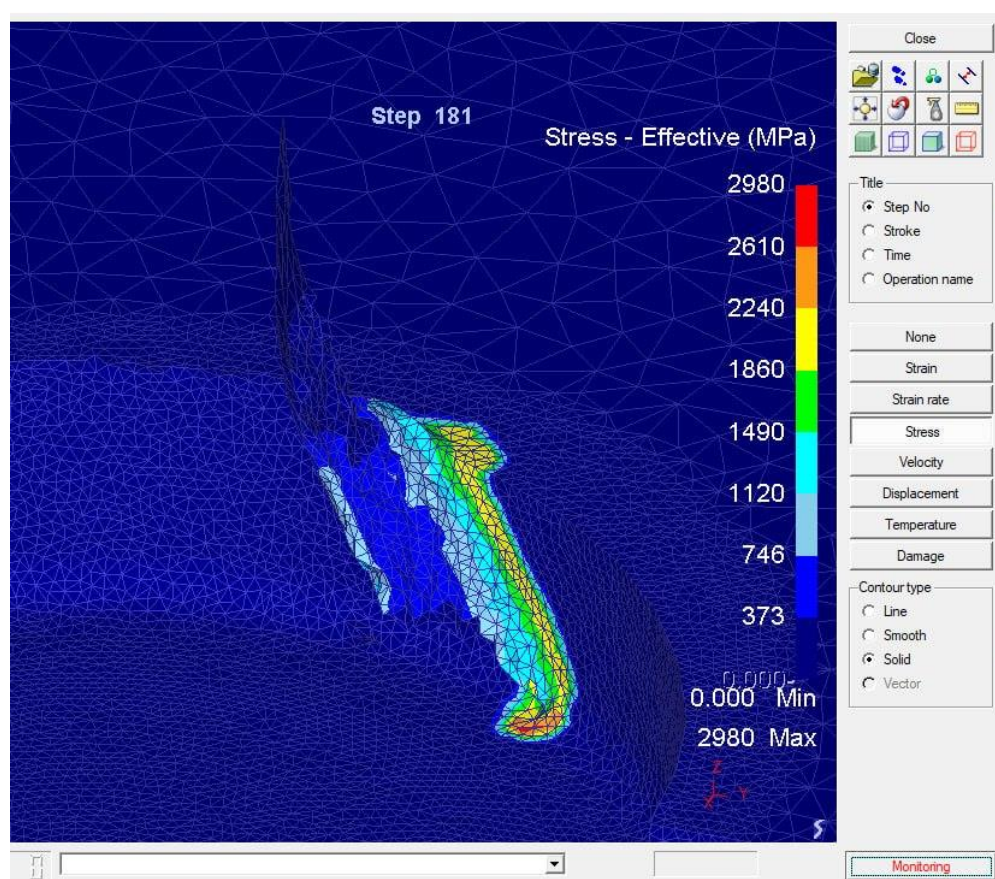


Рис. 2.30 – Симуляція обробки

Адекватність розробленої скінченно-елементної моделі підтверджується результатами порівняння значень сил різання, визначених експериментально і в результаті моделювання [81].

За аналогічною методикою проводилося моделювання для усіх експериментів, наведених в таблиці 2.5 та 2.7, у тому числі і завищених подач, які практично неможливо реалізувати експериментально (табл. 2.8), для визначення сил і температур стружки та дослідження залежності питомої сили різання від масштабного коефіцієнта

Режими різання

Діаметр фрези 0,2 мм				Діаметр фрези 0,5 мм			
Глибина різання 0,1 мм	Глибина різання 0,03 мм	Подача, мм/зуб	Швидкість різання м/хв	Глибина різання 0,1 мм	Глибина різання 0,03 мм	Подача, мм/зуб	Швидкість різання м/хв
№				№			
1.1	1.7	0,000022	18000	2.1	2.7	0,000022	12700
1.2	1.8	0,001		2.2	2.8	0,001	
1.3	1.9	0,005		2.3	2.9	0,005	
1.4	1.10	0,01		2.4	2.10	0,01	
1.5	1.11	0,015		2.5	2.11	0,015	
1.6	1.12	0,02		2.6	2.12	0,02	

2.5.Методика оптимізації режимів різання

Методика оптимізації режимів різання при мікрофрезеруванні пазів ґрунтувалася на застосуванні експериментально отриманих залежностей між параметрами режиму різання та показниками якості сформованого паза. Як критерії оптимізації застосовувалися відхилення ширини паза Δb , відхилення глибини паза Δh , геометричні параметри α та r (рис. 1.29), а також шорсткість R_a , які характеризують форму сформованого паза. Оптимізація виконувалась окремо для фрез діаметром 0,5 мм та 1 мм, що дозволило врахувати вплив

діаметра інструмента на стабільність процесу мікрофрезерування та точність формування пазів.

На першому етапі за результатами експериментальних досліджень було сформовано матрицю вихідних даних, у якій кожному поєднанню режимів різання відповідали значення досліджуваних відгукових параметрів. Далі для кожного показника було побудовано регресійні моделі, які описують залежність відгуку від факторів t , S_z та V . Отримані моделі застосовувалися як цільові функції для подальшої багатокритеріальної оптимізації.

Оскільки досліджувані показники мали різну фізичну природу та різні одиниці вимірювання, їх безпосереднє порівняння є некоректним. Тому для приведення відгуків до єдиної безрозмірної шкали було застосовано функцію бажаності. Для параметрів Δb , Δh , α , r та R_a задавалася умова мінімізації, оскільки зменшення цих величин відповідає підвищенню точності та якості формування паза, а для кількісної оцінки продуктивності застосовувався показник швидкості видалення матеріалу, якому задавалася умова максимізації.

Швидкість видалення матеріалу (MRR) визначається як об'єм матеріалу, що видаляється із заготовки за одиницю часу. Її можна оцінити за об'ємом знятого матеріалу або за різницею маси деталі до та після різання. Показник MRR є основною характеристикою продуктивності процесу мікрофрезерування та застосовується для оцінювання ефективності різання. Водночас підвищення продуктивності процесу не повинно призводити до погіршення точності пазів і якості обробленої поверхні.

Для умов мікрофрезерування швидкість видалення матеріалу розраховується за залежністю:

$$MRR = B \cdot t \cdot S_{xb}, \text{ мм/хв} \quad (2.3)$$

де B - ширина різання, яка рівна діаметру фрези, мм;

t - глибина різання, мм;

S_{xb} - подача, мм/хв;

Для комплексної оцінки ефективності процесу мікрофрезерування застосовувалася функція бажаності Харрінгтона, яка дозволила визначити оптимальні режими різання з урахуванням сукупності критеріїв оптимізації. Для показників, що мають односторонні обмеження, значення функції бажаності розраховується відповідно до залежності [88]:

$$d = e^{-(e^{-Y'})} \quad (2.4)$$

де e - логарифмічна константа, яка приблизно дорівнює 2,71828...;

Y' - нормалізоване значення, яке дозволяє порівнювати різні параметри на єдиній шкалі.

Інтегральний показник бажаності для сукупності критеріїв визначався як геометричне середнє окремих часткових функцій бажаності, що відповідають кожному з розглянутих показників [88]:

$$D = \sqrt[n]{d_1 d_2 \dots d_n} \quad (2.5)$$

де $d_1, d_2, \dots, d_n$ - бажаності кожного окремого критерію;

n - кількість критеріїв

Кожне прогнозоване значення відгуку перетворювалося в часткову функцію бажаності D , значення якої змінюється в межах від 0 до 1: значення $D = 0$ відповідає неприйнятному результату, а $D = 1$ - найкращому досягненню цільового критерію.

Для комплексного оцінювання режиму різання часткові функції бажаності об'єднувалися в інтегральний показник бажаності D . Це дозволило одночасно врахувати всі критерії оптимізації та визначити такий режим, за якого забезпечується найкращий компроміс між відхиленням ширини, відхиленням глибини та геометричними параметрами паза. Максимальне

значення D приймалося як ознака найбільш оптимального поєднання режимів різання в межах досліджуваного факторного простору.

Оптимізація проводилася шляхом варіювання факторів t , S_z та V у межах прийнятих діапазонів експерименту. Для кожної комбінації факторів за регресійними моделями визначалися прогнозовані значення відгуків, після чого обчислювалися відповідні часткові та інтегральні функції бажаності. Оптимальним вважався режим, для якого інтегральний показник бажаності набував максимального значення при одночасному забезпеченні мінімальних відхилень досліджуваних параметрів паза.

Застосування такої методики дозволило не лише визначити оптимальні режими різання для фрез діаметром 0,5 мм та 1 мм, але й оцінити чутливість кожного відгукового параметра до зміни глибини різання, подачі на зуб і швидкості різання. Це дало змогу обґрунтувати вибір оптимальних режимів мікрофрезерування з урахуванням точності формування пазів та стабільності процесу різання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2

1. На основі аналізу особливостей процесу мікрофрезерування сплавів NiTi обґрунтовано вибір матеріалу заготовок, різального інструменту та технологічного обладнання для проведення експериментальних досліджень.

2. Сформовано план повного факторного експерименту для дослідження впливу глибини різання $t = 0,03\text{--}0,10$ мм, подачі на зуб $S_z = 0,001\text{--}0,003$ мм/зуб та швидкості різання $V = 10\text{--}18$ м/хв на показники процесу мікрофрезерування пазів.

3. Розроблено методику визначення сил різання із застосуванням динамометра Kistler 9257B, підсилювача заряду Kistler 5070A та системи збору даних, що забезпечує реєстрацію сил різання в процесі оброблення.

4. Розроблено методику дослідження вібраційних характеристик процесу мікрофрезерування із використанням віброперетворювача ДН-3 та відповідного програмно-апаратного комплексу обробки сигналів.

5. Розроблено методику оцінювання якості пазів із використанням оптичного профілометра KEYENCE VR-6000, яка забезпечує визначення параметрів шорсткості, геометричної точності та характеристик заусенців.

6. Розроблено скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування сплавів NiTi та обґрунтовано основні параметри моделювання, граничні умови й характеристики контактної взаємодії.

7. Обґрунтовано методику визначення оптимальних режимів різання із використанням узагальненої функції бажаності Харрінгтона, що забезпечує можливість одночасного врахування декількох критеріїв якості та продуктивності процесу.

РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ ПРОЦЕСУ МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ ПАЗІВ У СПЛАВІВ NiTi

3.1. Складові та питомі сили різання

На основі експериментальних даних було визначено складові сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi інструментами фрезами діаметром 0,2 0.5, 1 мм та при змінних режимах різання. Графіки сил різання P_x , P_y , P_z , що отримані при мікрофрезеруванні сплаву NiTi (табл. 2.5) зображено на відповідних рис. 3.1-3.4.

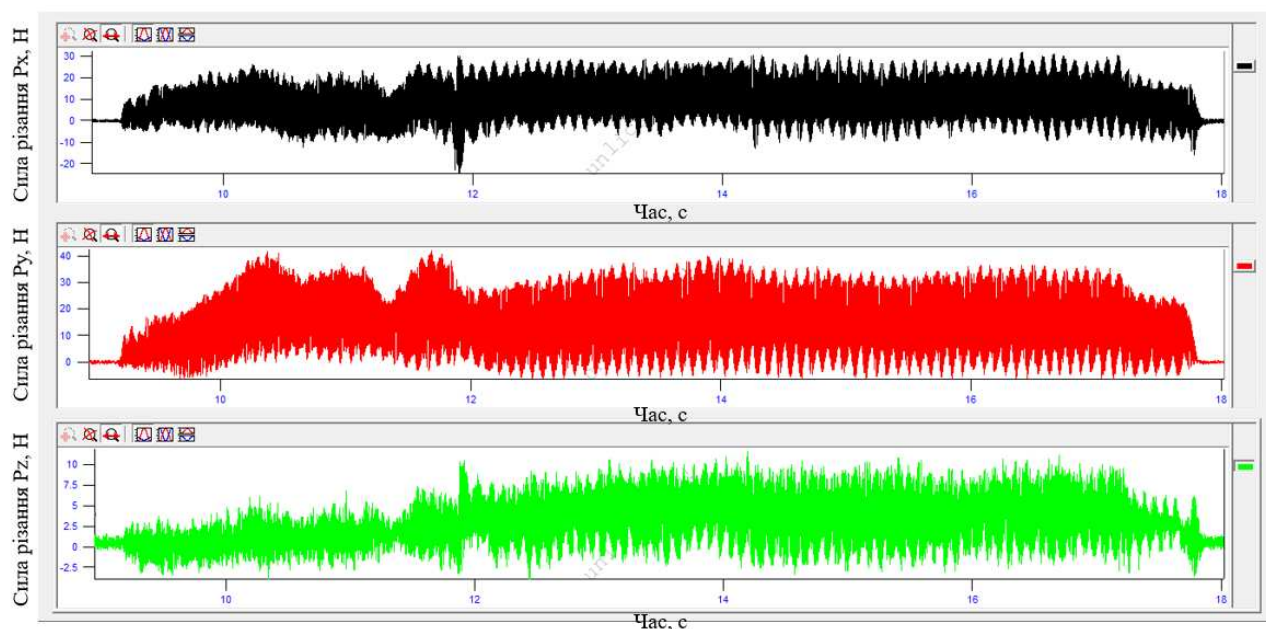


Рис. 3.1 – Сили різання, що отримані при мікрофрезеруванні інструментом $\varnothing 1$ мм ($S_z=0,003$ мм/зуб, $t=0,2$ мм, $V=20$ м/хв)

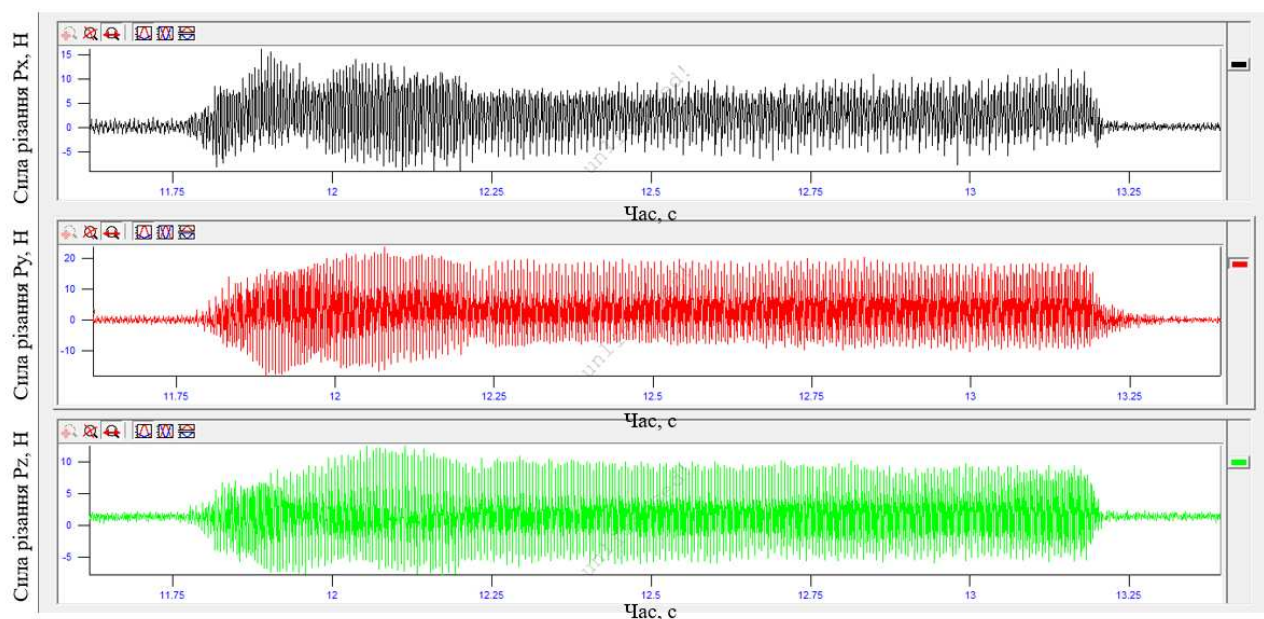


Рис. 3.2 – Сили різання, що отримані при мікрофрезеруванні інструментом $\varnothing 1$ мм ($S_z=0,003$ мм/зуб, $t=0,1$ мм, $V=20$ м/хв)

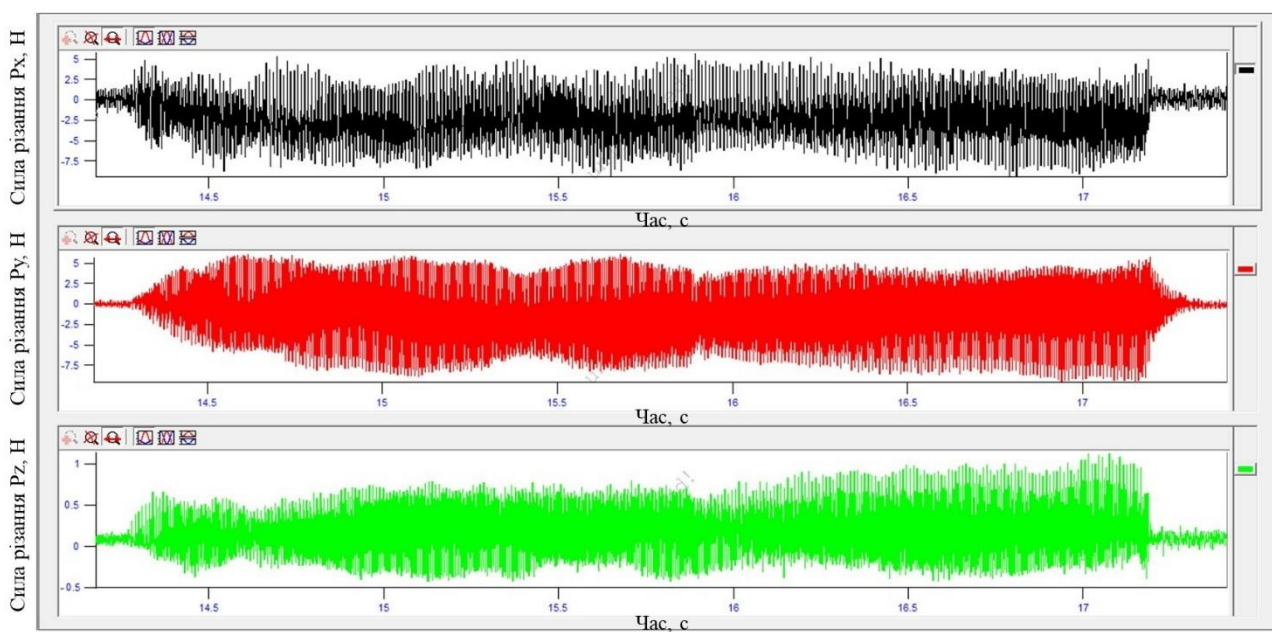


Рис. 3.3 – Сили різання, що отримані при мікрофрезеруванні інструментом $\varnothing 0.5$ мм ($S_z=0,001$ мм/зуб, $t=0,1$ мм, $V=20$ м/хв)

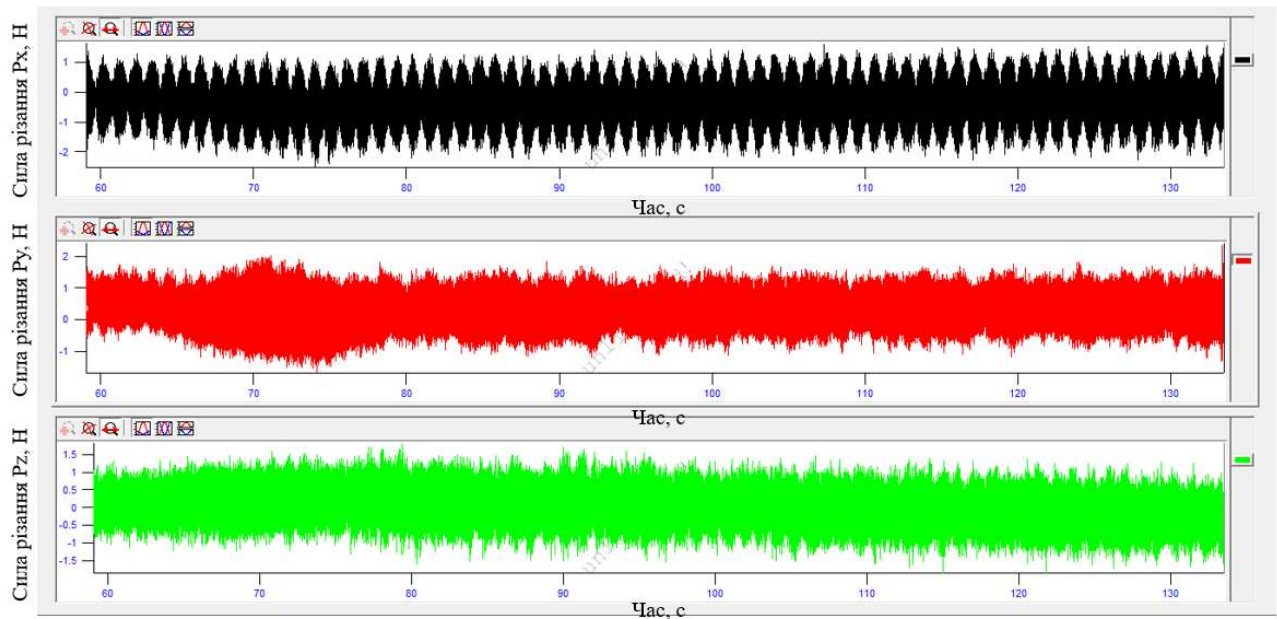


Рис. 3.4 – Сили різання, що отримані при мікрофрезеруванні інструментом Ø 0.2 мм ($S_z=0,00002$ мм/зуб, $t=0,1$ мм, $V=11,3$ м/хв)

У таблиці 3.1 представлено максимальні значення складових сил різання, та рівнодійна сила різання R :

$$R = \sqrt{P_x^2 + P_y^2 + P_z^2}, \quad (3.1)$$

де P_x , P_y , P_z – складові сили різання, Н.

Таблиця 3.1

Максимальні значення сил різання отримані при експериментальних дослідженнях

Діаметр фрези d , мм	Глибина різання t , мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Швидкість різання V , м/хв	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	R , Н
1	0,2	0,003	20	33,8	41,4	12	54,8
1	0,1	0,003	20	11,5	15,2	7,5	20,5
0,5	0,1	0,001	20	5	5,5	1,16	7,52
0,2	0,1	0,00002	11,3	0,8	1,5	1	1,97

Результати розрахунку показали, що максимальне значення рівнодійної сили різання становить 54,8 Н при застосуванні фрези діаметром 1 мм та глибині різання 0,2 мм. При зменшенні глибини різання до 0,1 мм рівнодійна

сила різання зменшується до 20,5 Н. Подальше зменшення діаметра інструмента до 0,5 мм та подачі на зуб до 0,001 мм/зуб призводить до зниження сили різання до 7,52 Н. Найменші значення сил різання отримані при мікрофрезеруванні інструментом діаметром 0,2 мм, де рівнодійна сила становить лише 1,97 Н.

Аналіз складових сили різання показав, що найбільше значення має складова R_y , яка у більшості випадків перевищує інші сили. Це пояснюється тим, що під час мікрофрезерування основна частина навантаження формується у напрямку, перпендикулярному подачі, внаслідок інтенсивної взаємодії задньої поверхні та радіуса заокруглення ріжучої кромки із боковими поверхнями паза.

Після експериментальної перевірки адекватності моделі подальший аналіз процесу мікрофрезерування сплаву NiTi було виконано із застосуванням скінченно-елементного моделювання. Використання скінченно-елементної моделі дозволило одержати не лише значення складових сил різання, а й температур стружки, що складно або неможливо безпосередньо визначити експериментально. У зв'язку з цим у даній роботі проведено оцінку сил різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi на основі скінченно-елементного моделювання згідно методики, описаної в п.2.4. та виконано порівняння отриманих результатів з експериментальними даними.

Аналіз часових залежностей складових сил різання, отриманих у результаті скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплаву NiTi, показав нерівномірний характер зміни силового навантаження в зоні контакту інструмента із заготовкою. Найбільші значення спостерігаються для складової R_y , що свідчить про домінування радіальної складової навантаження в процесі формування паза. На рис. 3.5 максимальне значення сили R_x досягає 13,6 Н, R_y – 18 Н, і R_z – 8,4 Н.

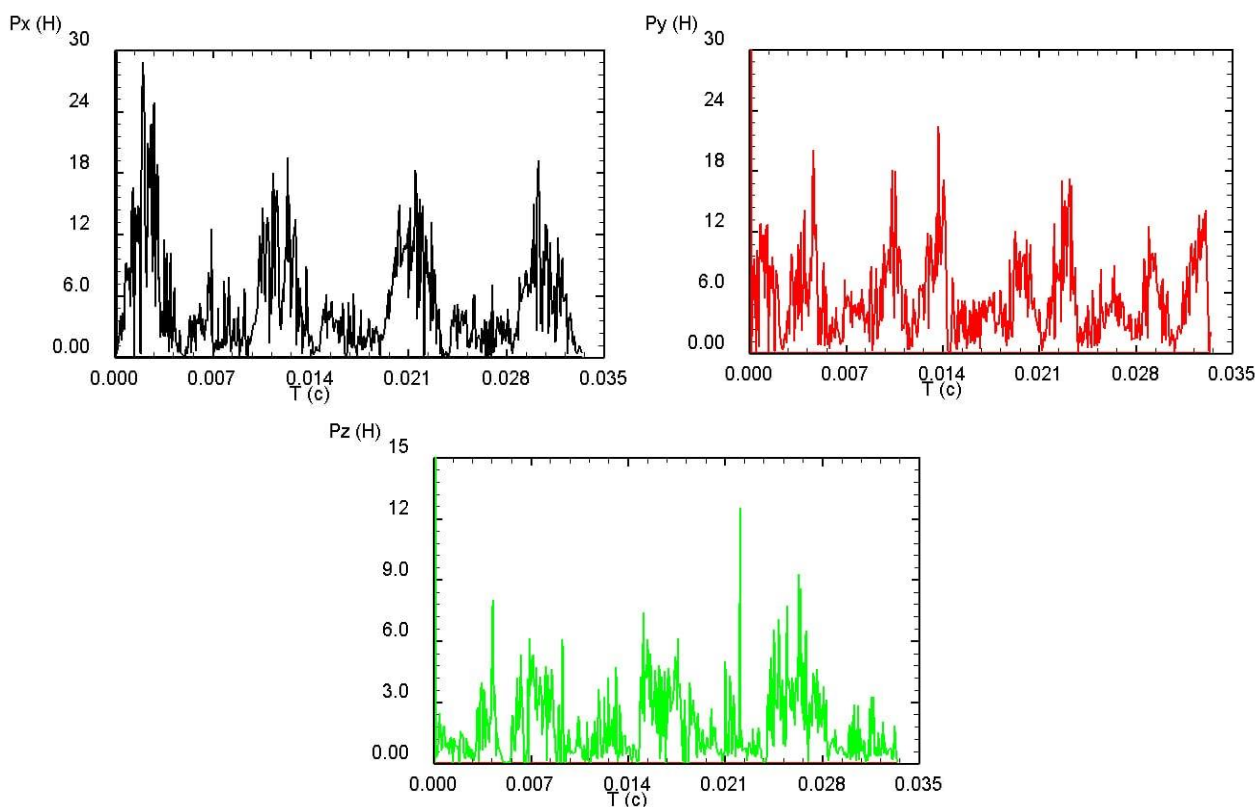


Рис. 3.5 – Складові сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi на основі скінченно-елементного моделювання інструментом $\varnothing 1$ мм ($S_z=0,003$ мм/зуб, $t=0,1$ мм, $V=20$ м/хв)

Оскільки скінченно-елементна модель процесу мікрофрезерування не враховує усіх факторів, які впливають на значення сил різання, наприклад вібрації технологічної системи, похибки установки і закріплення інструменту та заготовки, вплив покриття фрези, похибки розмірів елементів системи, знос інструменту тощо, то цілком логічним є відмінність в отриманих значеннях сил різання від експериментальних. При оцінці відносної похибки значень сил різання за максимальними (піковими) значеннями отримано наступні результати: P_x – 18,26%, P_y – 18,42% та P_z – 12%. Отже, розраховані відносні похибки між результатами експерименту і моделювання знаходяться в межах допустимих значень і таким чином, розроблену скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування сплаву NiTi можна вважати адекватною.

Аналогічно були визначені складові сили різання для решти експериментів табл.3.2.

Таблиця 3.2

Максимальні значення сил різання отримані при скінченно-елементному моделюванні

Діаметр фрези d, мм	Глибина різання t, мм	Подача на зуб Sz, мм/зуб	Швидкість різання V, м/хв	P _x , Н	P _y , Н	P _z , Н	R, Н
1	0,2	0,003	20	34	47	12	59,2
1	0,1	0,003	20	13,6	18	8,4	24,1
0,5	0,1	0,001	20	4,6	5,3	1,3	7,14
0,2	0,1	0,00002	11,3	1,1	1,36	0,74	1,8

Графік порівняння складових сили різання (рис. 3.6), отриманих при скінченно-елементному моделюванні та при експериментальних дослідженнях.

Отримані при скінченно-елементному моделюванні результати були підтверджені експериментальними дослідженнями, за результатами яких встановлено, що середня похибка становила 13,17 %, а максимальна – 37,5 %.

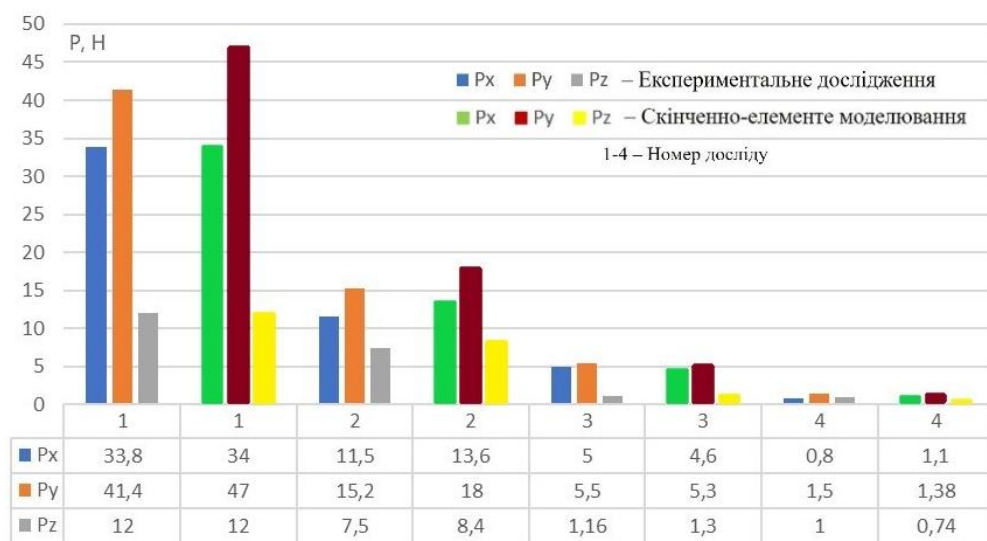


Рис. 3.6 – Порівняння складових сили різання при скінченно-елементному моделюванні та експериментальних дослідженнях процесу мікрофрезерування сплаву NiTi

За допомогою скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування пазу зі сплаву NiTi було досліджено залежність складових сил різання P_x, P_y, P_z від величини подачі у тому числі і завищених подач, які практично неможливо реалізувати експериментально для фрез Ø 0,2 мм та 0,5

мм. Проведене моделювання спрямоване на визначення закономірностей зміни силового навантаження на інструмент при зміні товщини зрізуваного шару, а також на оцінку впливу діаметра мікрофрези на силові параметри процесу різання. Отримані результати дозволяють проаналізувати характер формування сил різання в умовах мікрообробки.

Як видно з рисунка 3.7 та 3.8 для фрез діаметром $\varnothing 0,2$ мм та $\varnothing 0,5$ мм P_y є домінуючою серед складових сил різання. Всі складові сили різання демонструють зростання при збільшенні подачі, глибини і ширини різання, що є цілком очікуваним і добре узгоджується із даними [22]. Вплив глибини різання на сили різання є значним.

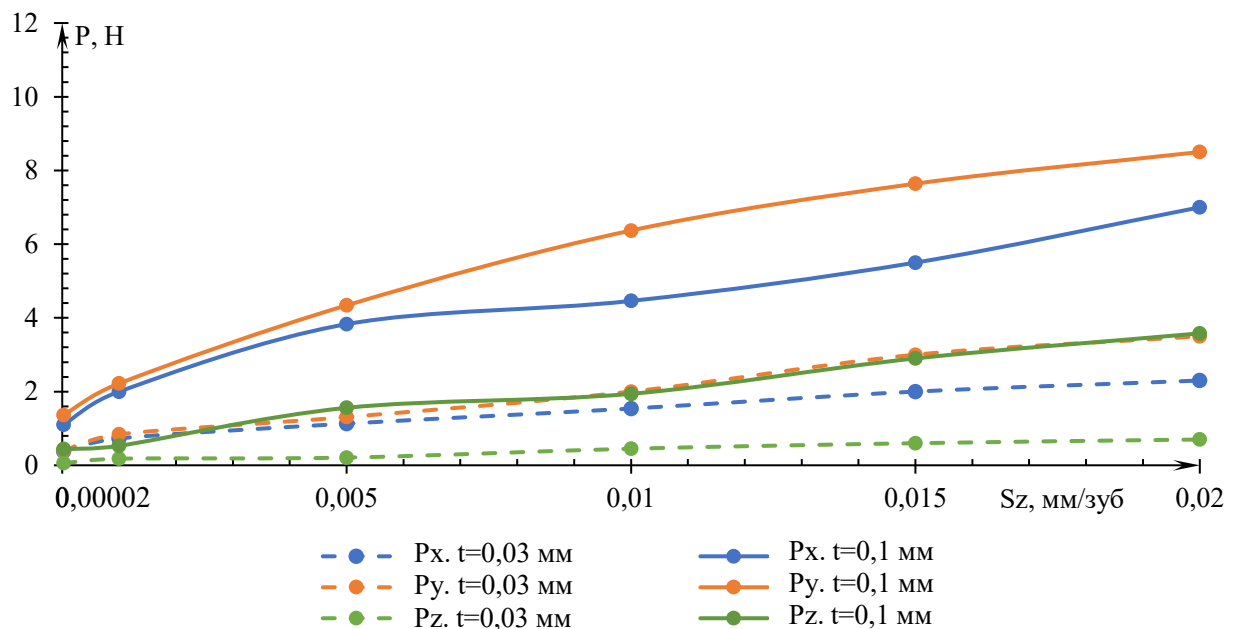


Рис. 3.7 – Залежність складових сил різання від подачі на зуб для фрези $\varnothing 0,2$ мм при $V = 11,3$ м/хв

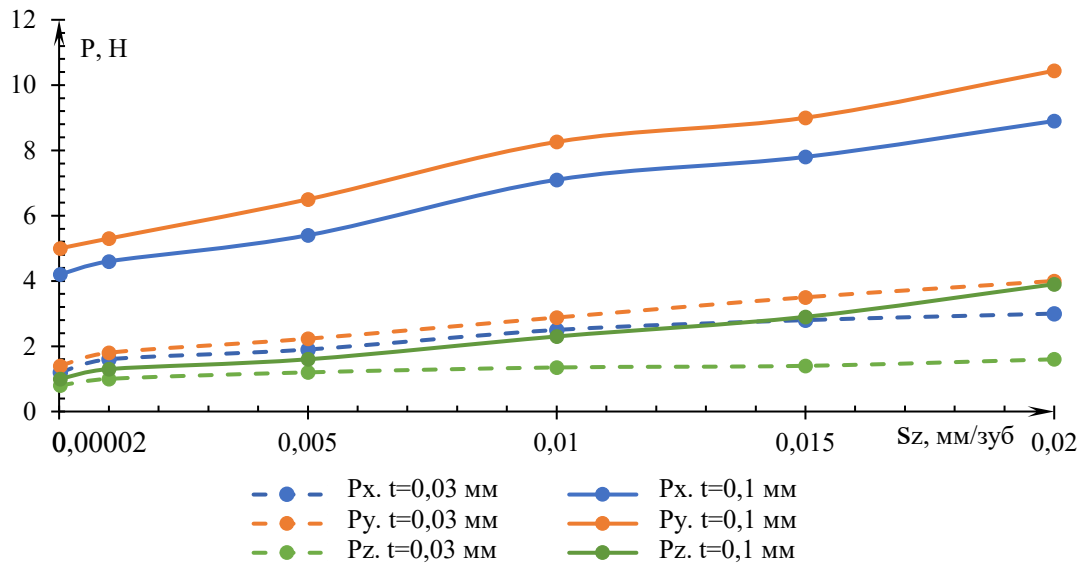


Рис. 3.8 – Залежність складових сил різання від подачі на зуб для фрези Ø0,5 мм при $V = 20$ м/хв

Скінченно-елементне моделювання сил різання дозволило визначити питомі сили різання для різних значень масштабного коефіцієнта. Питома сила різання визначалася за виразом:

$$K = \frac{R}{A}, \quad (3.2)$$

де R – рівнодійна сила різання,
 A – площа зрізу.

$$A = t \cdot S_z, \quad (3.3)$$

де t – глибина різання,
 S_z – подача на зуб.

Відношення товщини зрізу до радіуса різальної кромки називається масштабним коефіцієнтом:

$$k_m = \frac{a}{r}, \quad (3.3)$$

де a – товщина зрізу. Для випадку мікрофрезерування можна прийняти $a = S_z$.

На рисунку 3.9 представлено залежність питомої сили різання K від масштабного коефіцієнта k_m , (0.01 мм для обох фрез).

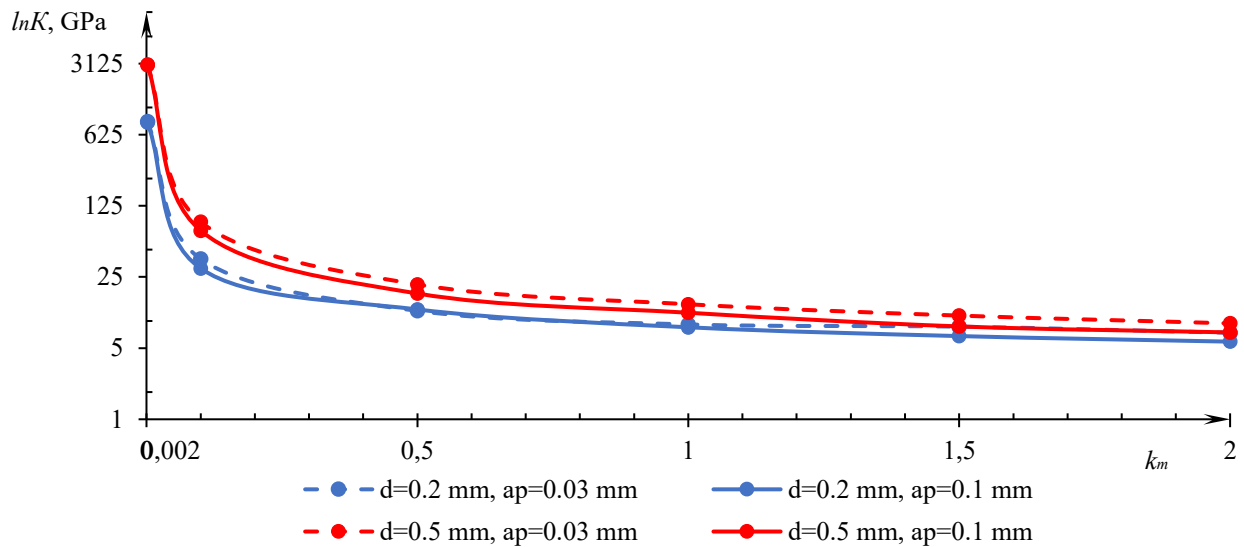


Рис. 3.9 – Залежність питомої сили різання від масштабного коефіцієнта

Аналіз отриманих даних свідчить, що при низьких значеннях k_m питомі сили різання значно зростають, досягаючи пікових значень (до 3100 ГПа). Це зумовлено тим, що за низького k_m (коли подача на зуб менша за радіус різальної кромки) основним механізмом взаємодії інструмента з матеріалом стає пластична деформація без повноцінного зрізання. У цьому випадку питома сила різання збільшується нелінійно, що призводить до значного навантаження на інструмент.

Результати змодельованих значень питомих сил різання (рис. 3.9) демонструють схожі тенденції із результатами, отриманими в [22]. Але разом із тим спостерігаються кардинальні відмінності щодо значення питомих сил різання для різних масштабних коефіцієнтів, що може бути пояснено різним радіусом заокруглення різальної кромки мікрофрез (0.99 [22] і 10 мкм), а також різною швидкістю різання (36 [22] і 20 м/хв). Зміна радіуса ріжучої кромки мікрофрези визначає масштаб геометрії контактної взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом, що впливає на механізм стружкоутворення.

Отримані значення питомих сил різання свідчать, що при мікрофрезеруванні нітинолу подачу слід призначати із забезпеченням масштабного коефіцієнта $k_m \geq 0,1$, тоді як для зменшення впливу масштабного ефекту та забезпечення стійкого стружкоутворення доцільним є $k_m > 0,5$. За таких умов мінімальна товщина зрізу повинна становити не менше 10 %, а оптимально – понад 50 % радіуса заокруглення різальної кромки мікрофрези.

Отримані результати узгоджуються з даними роботи [4], де рекомендовано забезпечувати мінімальну товщину зрізу на рівні не менше 30 % радіуса заокруглення різальної кромки інструмента. Проте автори згаданої роботи отримали такі висновки без визначення питомих сил різання і дослідження масштабного ефекту при мікрофрезеруванні, а на основі вимірних значень складових сил різання і оцінки шорсткості обробленої поверхні.

Отримання значень сил різання при мікрофрезеруванні пазів фрезами $\varnothing$ 0,5 мм та 1 мм (табл.3.3-4) проводилися з метою визначення закономірності зміни сил різання при різних режимах обробки (табл.2.6).

Таблиця 3.3

Значення складових сил різання, що отримані при скінченно-елементному моделюванні процесу мікрофрезерування паза фрезою 0,5 мм

№	t, мм	Sz, мм/зуб	V, м/хв	Px, Н	Py, Н	Pz, Н	R, Н	K, ГПа
1	0,03	0,001	10	1,87	2,03	1,03	2,95	98,2
2	0,1	0,001	10	4,23	4,69	1,18	6,43	64,25
3	0,03	0,002	10	2,05	2,19	1,13	3,21	53,43
4	0,1	0,002	10	4,54	4,99	1,33	6,88	34,38
5	0,03	0,003	10	2,19	2,38	1,2	3,45	38,33
6	0,1	0,003	10	4,81	5,16	1,5	7,21	24,04
7	0,03	0,001	14	1,92	2,15	1,08	3,08	102,61
8	0,1	0,001	14	4,51	4,9	1,21	6,77	67,69
9	0,03	0,002	14	2	2,22	1,18	3,21	53,54
10	0,1	0,002	14	4,63	5,07	1,36	7	35
11	0,03	0,003	14	2,4	2,51	1,24	3,69	40,97

Закінчення табл. 3.4

12	0,1	0,003	14	5,09	5,26	1,52	7,48	24,92
13	0,03	0,001	18	1,94	2,14	1,27	3,16	105,18
14	0,1	0,001	18	4,58	4,79	1,28	6,75	67,5
15	0,03	0,002	18	2,23	2,46	1,31	3,57	59,49
16	0,1	0,002	18	4,95	5,21	1,41	7,32	36,62
17	0,03	0,003	18	2,44	2,66	1,45	3,89	43,22
18	0,1	0,003	18	5,5	5,67	1,59	8,06	26,86

Визначення сил різання було необхідним для подальшого аналізу їх взаємозв'язку з вібраційними характеристиками процесу мікрофрезерування, оскільки зміна силового навантаження на інструмент безпосередньо впливає на рівень коливань технологічної системи.

Аналіз результатів скінченно-елементного моделювання показав, що найбільший вплив на силові характеристики процесу мікрофрезерування сплаву NiTi має глибина різання. Збільшення глибини різання з $t=0,03$ до $t=0,1$ мм супроводжувалася суттєвим зростанням усіх складових сил різання та рівнодійної сили R .

Таблиця 3.4

Значення складових сил різання, що отримані при скінченно-елементному моделюванні процесу мікрофрезерування паза фрезою 1 мм

№	t , мм	S_z , мм/зуб	V , м/хв	P_x , Н	P_y , Н	P_z , Н	R , Н	K , ГПа
1	0,03	0,001	10	2,68	4,15	1,4	5,13	171,16
2	0,1	0,001	10	11,57	14,62	5,61	19,47	194,7
3	0,03	0,002	10	2,97	4,32	1,44	5,44	90,61
4	0,1	0,002	10	12	15,13	5,91	20,2	100,98
5	0,03	0,003	10	3,18	4,93	1,47	6,05	67,2
6	0,1	0,003	10	12,14	15,7	6,07	20,75	69,18
7	0,03	0,001	14	2,71	4,57	1,28	5,47	182,17
8	0,1	0,001	14	12	14,71	5,96	19,9	198,97
9	0,03	0,002	14	3,14	4,95	1,46	6,04	100,68
10	0,1	0,002	14	12,25	15,76	6,1	20,87	104,36

Закінчення табл. 3.4

11	0,03	0,003	14	3,31	5,5	1,48	6,59	73,2
12	0,1	0,003	14	12,27	16,4	6,37	21,45	71,5
13	0,03	0,001	18	2,97	4,91	1,53	5,94	197,96
14	0,1	0,001	18	12,14	15,35	6,3	20,56	205,59
15	0,03	0,002	18	3,23	5,2	1,73	6,36	106,02
16	0,1	0,002	18	12,84	16,2	6,54	21,68	108,41
17	0,03	0,003	18	3,51	5,43	1,76	6,7	74,45
18	0,1	0,003	18	13,47	18	6,76	23,48	78,25

Для фрези діаметром $\varnothing 1$ мм при $S_z=0,001$ мм/зуб і $V=10$ м/хв значення рівнодійної сили збільшується з 5,13 Н до 19,47 Н (3,8 рази). За максимальних режимів різання зростання становить від 6,7 Н до 23,48 Н, що відповідає приблизно 3,5-кратному підвищенню. Для фрези $\varnothing 0,5$ мм вплив глибини різання є менш вираженим, однак збільшувалася рівнодійна сила різання (2,1 рази). Отримані результати свідчать, що саме глибина різання визначає основний приріст площі зрізуваного шару та навантаження на різальну кромку, що безпосередньо призводить до підвищення сил різання.

Встановлено, що збільшення подачі на зуб у діапазоні $S_z=0,001\text{--}0,003$ мм/зуб також спричиняє зростання сил різання, проте інтенсивність цього впливу є нижчою порівняно з глибиною різання. Для фрези $\varnothing 1$ мм при $t=0,03$ мм і $V=10$ м/хв рівнодійна сила R збільшується з 5,13 Н до 6,05 Н, що становить близько 18 %, тоді як при $t=0,1$ мм приріст складає лише 6–7 %. Для фрези $\varnothing 0,5$ мм вплив подачі є більш помітним, особливо при більших глибинах різання. Так, при $t=0,1$ мм і $V=18$ м/хв значення R зростає з 6,75 Н до 8,06 Н (19 %), а складова P_z збільшується з 1,03 Н до 1,59 Н. Це пояснюється зростанням товщини незрізаного шару та посиленням впливу масштабного ефекту при мікрофрезеруванні фрезами малого діаметра.

Зміна швидкості різання у досліджуваному діапазоні $V=10\text{--}18$ м/хв характеризується відносно незначним впливом на силові параметри процесу. Для фрези $\varnothing 1$ мм при $t=0,03$ мм і $S_z=0,001$ мм/зуб рівнодійна сила зростає з

5,13 Н до 5,94 Н (16 %), тоді як при $t=0,1$ мм приріст не перевищує 5–6 %. Для фрези $\varnothing 0,5$ мм відповідні зміни складають близько 5–7 %. Незначний вплив швидкості різання пов'язаний із тим, що у досліджуваному діапазоні зміна швидкості не призводить до суттєвого зменшення деформаційного опору матеріалу, а основний внесок у формування сил різання визначається геометричними параметрами зрізуваного шару.

Таким чином, результати аналізу даних, свідчать, що основним фактором, який визначає рівень сил різання при мікрофрезеруванні пазів, є глибина різання t , тоді як подача на зуб S_z набуває критичного значення для формування осьової складової сили P_z при малих діаметрах інструмента, а швидкість різання V відіграє другорядну роль. Зростання сил різання (до 3,5–3,8 разів для $\varnothing 1$ мм і понад 2 рази для $\varnothing 0,5$ мм при збільшенні глибини різання) призводить до відповідного підвищення силового навантаження на технологічну систему, що безпосередньо впливає на рівень вібраційних коливань. При цьому встановлено, що саме режими з високими значеннями t та S_z , які відповідають максимальним значенням рівнодійної сили R , формують зони підвищеної динамічної нестабільності процесу, що проявляється у зростанні амплітуди коливань і погіршенні якості обробленої поверхні. Водночас зменшення товщини зрізу до значень, співрозмірних із радіусом заокруглення ріжучої кромки, призводить до домінування пластичного витіснення матеріалу, підвищення питомих сил різання та також може спричинити нестабільність процесу.

Вплив режимів різання на питому силу різання. Зі збільшенням подачі з $S_z=0,001$ до $S_z=0,003$ мм/зуб спостерігалось різке зниження питомої сили різання. Так, для $\varnothing 0,5$ мм при $t=0,03$ мм і $V=10$ м/хв значення K зменшувалося з 98,2 до 38,33 (61 %), а при $t=0,1$ мм – з 64,25 до 24,04 (63 %). Для фрези $\varnothing 1$ мм аналогічна тенденція є ще більш вираженою: при $t=0,03$ мм K знижується з 171,16 до 67,2 (61 %), а при $t=0,1$ мм – з 194,7 до 69,18 (64 %). Такий характер зміни обумовлений проявом масштабного ефекту.

Зі збільшенням глибини різання спостерігається зниження K : наприклад, для $\varnothing 0,5$ мм при $S_z=0,001$ мм/зуб і $V=10$ м/хв значення K зменшується з 98,2 до 64,25 (35 %), що пов'язано зі зменшенням відносного впливу пластичного витіснення матеріалу та переходом до більш стабільного процесу стружкоутворення.

Зміна швидкості від 10 до 18 м/хв призводить до незначних коливань K (у межах 5–10 %), що пов'язано з другорядним впливом температурних ефектів. Отже, питома сила різання при мікрофрезеруванні визначається насамперед товщиною зрізу, а її зниження при зростанні подачі є характерною ознакою масштабного ефекту, що необхідно враховувати при виборі оптимальних режимів обробки сплаву NiTi.

Отже, забезпечення стабільності мікрофрезерування безпосередньо пов'язане з вибором оптимального поєднання параметрів різання, при якому досягається баланс між рівнем сил різання, мінімізацією вібрацій та забезпеченням високої якості формування мікропазів.

3.2. Температура стружки

Поряд із визначенням складових сил різання при скінченно-елементному моделюванні процесу мікрофрезерування сплаву NiTi для заданих режимів різання (табл.2.6) також визначалася температура стружки. Аналіз температурних полів дозволив оцінити теплові умови процесу різання, які суттєво впливають на механічні властивості матеріалу, умови стружкоутворення та величину сил різання.

В результаті скінченно-елементного моделювання було отримано дані температури при мікрофрезеруванні фрезами $\varnothing 0,5$ та 1 мм відповідно (табл. 3.5), на основі чого було досліджено залежність максимальної температури від подачі на зуб, діаметра інструмента та глибини різання (рис. 3.10).

Таблиця 3.5

Температури стружки, що отримані при скінченно-елементному моделюванні процесу мікрофрезерування пазів фрезою $\varnothing 0,5$ та 1 мм

№	t, мм	Sz, мм/зуб	V, м/хв	T _{0,5} , °C	T ₁ , °C
1	0,03	0,001	10	101,39	172,9
2	0,1	0,001	10	169,19	205,67
3	0,03	0,002	10	124,81	184,4
4	0,1	0,002	10	205,88	239,63
5	0,03	0,003	10	147,79	193,06
6	0,1	0,003	10	248,69	272,88
7	0,03	0,001	14	140,09	200,41
8	0,1	0,001	14	203	273,39
9	0,03	0,002	14	162,71	204,39
10	0,1	0,002	14	254,49	306,11
11	0,03	0,003	14	183,31	209,9
12	0,1	0,003	14	277,84	321,95
13	0,03	0,001	18	164	216
14	0,1	0,001	18	221,34	329
15	0,03	0,002	18	188,24	230
16	0,1	0,002	18	274,16	350
17	0,03	0,003	18	216,15	246,08
18	0,1	0,003	18	315,75	374,82

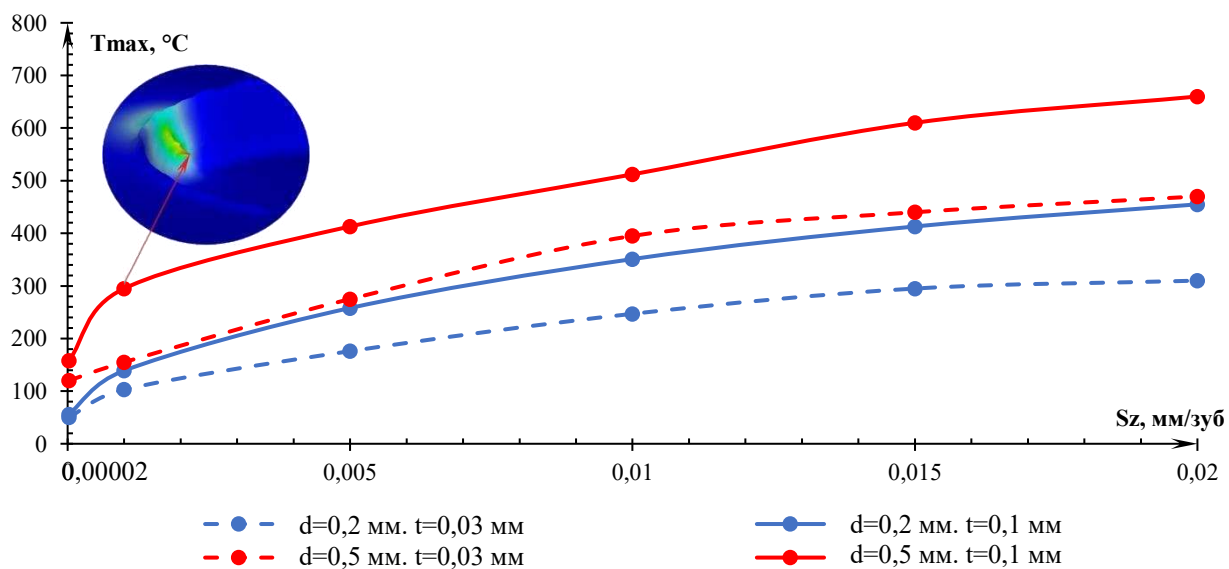


Рис. 3.10 – Залежність температури від подачі на зуб

Аналіз результатів показує, що максимальна температура стружки інтенсивно зростає зі збільшенням подачі. Це пов'язано із збільшенням об'єму матеріалу, що підлягає пластичній деформації, а також зі зниженням ефективності тепловідведення через зміну площі контакту між інструментом і заготовкою. Такі ефекти призводять до збільшення термічних та механічних навантажень на інструмент, що сприяє його передчасному зношуванню, а також може негативно вплинути на якість обробленої поверхні.

Не виявляється можливим порівняти отримані результати температур стружки при мікрофрезеруванні нітинолу з даними інших авторів через їх відсутність. Разом з тим виявлено узгодженість отриманих даних з результатами для ортогонального різання [23].

Згідно отриманих даних температура зростає зі збільшенням глибини різання, подачі на зуб та швидкості різання. Найбільший вплив на температурний стан процесу має глибина різання, збільшення якої з $t=0,03$ до $t=0,1$ мм призводить до підвищення температури T_1 до 52 % для фрези $\varnothing 1$ мм та $T_{0,5}$ до 67 % для фрези $\varnothing 0,5$ мм. Менший діаметр інструмента характеризується вищою чутливістю до зміни режимів різання, що пов'язано зі зниженням жорсткості інструмента та меншою площею тепловідведення.

Підвищення подачі на зуб і швидкості різання також супроводжується зростанням температури внаслідок збільшення інтенсивності пластичної деформації та тертя в зоні контакту інструмента із заготовкою. При цьому найбільш високі температури спостерігаються за поєднання великих значень t , S_z та V , що свідчить про суттєве зростання теплового навантаження на різальний інструмент при інтенсифікації режимів оброблення.

Отже, температура стружки визначається комплексним впливом параметрів режиму, при якому глибина різання формує основний рівень тепловиділення, швидкість різання визначає інтенсивність теплових процесів, а подача на зуб відіграє особливо важливу роль у мікромасштабі, впливаючи на механізм стружкоутворення та локалізацію теплових потоків.

3.3. Вібрації

Для оцінювання динамічної стабільності процесу мікрофрезерування сплаву NiTi виконано аналіз рівня вібраційних коливань за середньоквадратичним значенням RMS залежно від діаметра фрези та режимів різання. Як показано в табл. 3.6, рівень вібрацій, оцінений за RMS, істотно змінюється залежно від діаметра фрези та режимів різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi.

Таблиця 3.6

Амплітуда вібраційного прискорення аналізованої ділянки (м/с²)

Різання з повним радіальним врізанням мікрофрези Ø 1мм							Різання з повним радіальним врізанням мікрофрези Ø 0,5мм						
№	Максимальні амплітуди					RMS	№	Максимальні амплітуди					RMS
	1	2	3	4	5			1	2	3	4	5	
1	0,041	0,045	0,0437	0,045	0,0512	0,0452	1	0,03	0,057	0,059	0,05	0,045	0,0482
2	0,055	0,02	0,029	0,028	0,039	0,0342	2	0,035	0,043	0,054	0,062	0,05	0,0488
3	0,02	0,0137	0,0137	0,0187	0,0175	0,0167	3	0,027	0,033	0,035	0,027	0,019	0,0282
4	0,011	0,0125	0,0162	0,0175	0,02	0,0154	4	0,024	0,026	0,021	0,029	0,023	0,0246
5	0,0275	0,0275	0,033	0,032	0,037	0,0314	5	0,025	0,028	0,037	0,041	0,042	0,0346
6	0,04	0,0438	0,035	0,028	0,049	0,0392	6	0,056	0,047	0,065	0,068	0,06	0,0592
7	0,052	0,075	0,095	0,077	0,098	0,0794	7	0,072	0,091	0,098	0,069	0,115	0,0890
8	0,06	0,07	0,055	0,057	0,073	0,0630	8	0,087	0,142	0,0117	0,125	0,12	0,0971
9	0,098	0,089	0,087	0,095	0,09	0,0918	9	0,088	0,082	0,053	0,07	0,072	0,0730
10	0,08	0,098	0,06	0,07	0,076	0,0768	10	0,079	0,078	0,077	0,076	0,086	0,0792
11	0,037	0,047	0,05	0,059	0,047	0,0480	11	0,124	0,152	0,162	0,19	0,2	0,1656
12	0,056	0,038	0,037	0,042	0,055	0,0456	12	0,161	0,16	0,148	0,15	0,154	0,1546
13	0,082	0,063	0,051	0,1	0,07	0,0732	13	0,126	0,12	0,095	0,11	0,138	0,1178
14	0,077	0,074	0,078	0,08	0,073	0,0764	14	0,084	0,089	0,1	0,1	0,1	0,0946
15	0,082	0,075	0,081	0,08	0,081	0,0798	15	0,1	0,072	0,078	0,076	0,066	0,0784
16	0,062	0,078	0,071	0,088	0,081	0,0760	16	0,09	0,095	0,11	0,1	0,138	0,1066
17	0,042	0,062	0,036	0,064	0,048	0,0504	17	0,071	0,082	0,09	0,077	0,1	0,0840
18	0,078	0,081	0,075	0,079	0,094	0,0814	18	0,07	0,1	0,105	0,093	0,096	0,0928

У результаті експериментальних досліджень визначено середньоквадратичне значення віброприскорення RMS для 18 режимів (рис. 3.11) мікрофрезерування сплавів NiTi інструментами діаметром 1 мм і 0,5 мм.

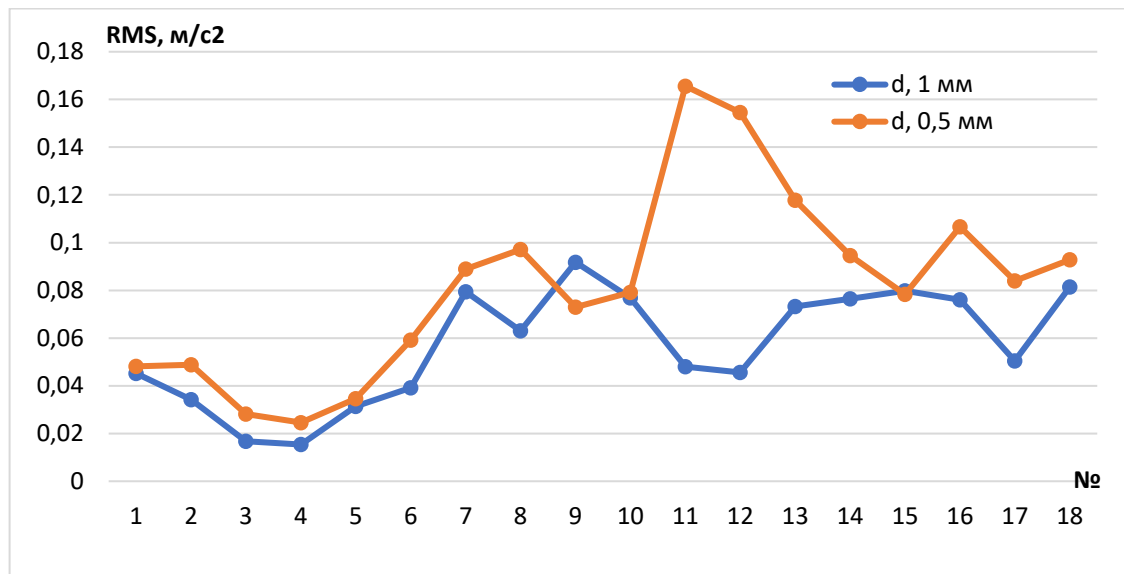


Рис. 3.11 – Порівняння RMS при мікрофрезеруванні сплавів NiTi фрезами Ø1 та 0,5 мм

Порівняльний аналіз результатів показує суттєву різницю у рівні вібраційної активності процесу залежно від діаметра інструмента. Для NiTi при застосуванні фрези Ø1 мм значення RMS змінюються в межах 0,0154–0,0918 м/с², а в окремих режимах спостерігається істотне перевищення рівня вібрацій. Так, у режимах №7, №9 та №15 значення RMS для NiTi становлять відповідно 0,0794, 0,0918 та 0,0798 м/с².

Найбільш виражене зростання коливальної складової спостерігалися у 11 та 12 експериментах для фрези Ø0,5 мм яка мала локальний характер і пов'язаний із реалізацією найбільш несприятливого поєднання режимів різання з точки зору динамічної стабільності процесу. При $S_z=0,003$ мм/зуб та $V=14$ м/хв спостерігається суттєве зростання сил різання і пружних відхилень інструмента малого діаметра, що призводить до підсилення вібраційних коливань. Подальше збільшення швидкості різання супроводжується більш плавною зміною RMS, що може бути пов'язано зі зміною характеру стружкоутворення та частковою стабілізацією процесу різання.

Подібний характер зміни RMS спостерігається і в роботі Li et al. [46], де при мікрофрезеруванні фрезою діаметром 0,6 мм за малих значеннях подачі на зуб (1 мкм) та різних швидкостях різання (10000-14000 об/хв), було зафіксовано різке підвищення рівня вібрацій унаслідок виникнення нестабільного режиму різання. Автори пов'язують це з проявом масштабного ефекту, мінімальної товщини стружки та посиленням ефекту пластичного витіснення матеріалу. Отримані у даній роботі результати узгоджуються з наведеними закономірностями та свідчать, що для інструментів малого діаметра існують локальні області режимів різання, у яких процес стає більш чутливим до динамічних збурень.

Отримані результати підтверджують, що вібраційна стабільність процесу мікрофрезерування істотно залежить від діаметра інструмента та режимів різання. Це свідчить про підвищену динамічну чутливість системи при мікрофрезеруванні NiTi та вплив жорсткості інструмента на забезпечення стабільності процесу.

Узагальнюючи отримані результати, можна констатувати, що швидкість різання є головним чинником формування рівня вібрацій, однак зменшення діаметра фрези до 0,5 мм істотно підвищує вплив подачі та її взаємодії зі швидкістю. Це підтверджує зростання динамічної нестабільності системи при зниженні згинальної жорсткості інструмента та узгоджується з експериментальним збільшенням RMS-прискорення.

3.4. Показники якості пазів

Для оцінювання морфології поверхні та характеру формування мікрорельєфу після мікрофрезерування було проведено тривимірний аналіз поверхні пазів із використанням оптичного 3D-профілометра KEYENCE VR-6000. За результатами досліджень отримано знімки поверхні мікрофрезерованих пазів (рис. 3.12).

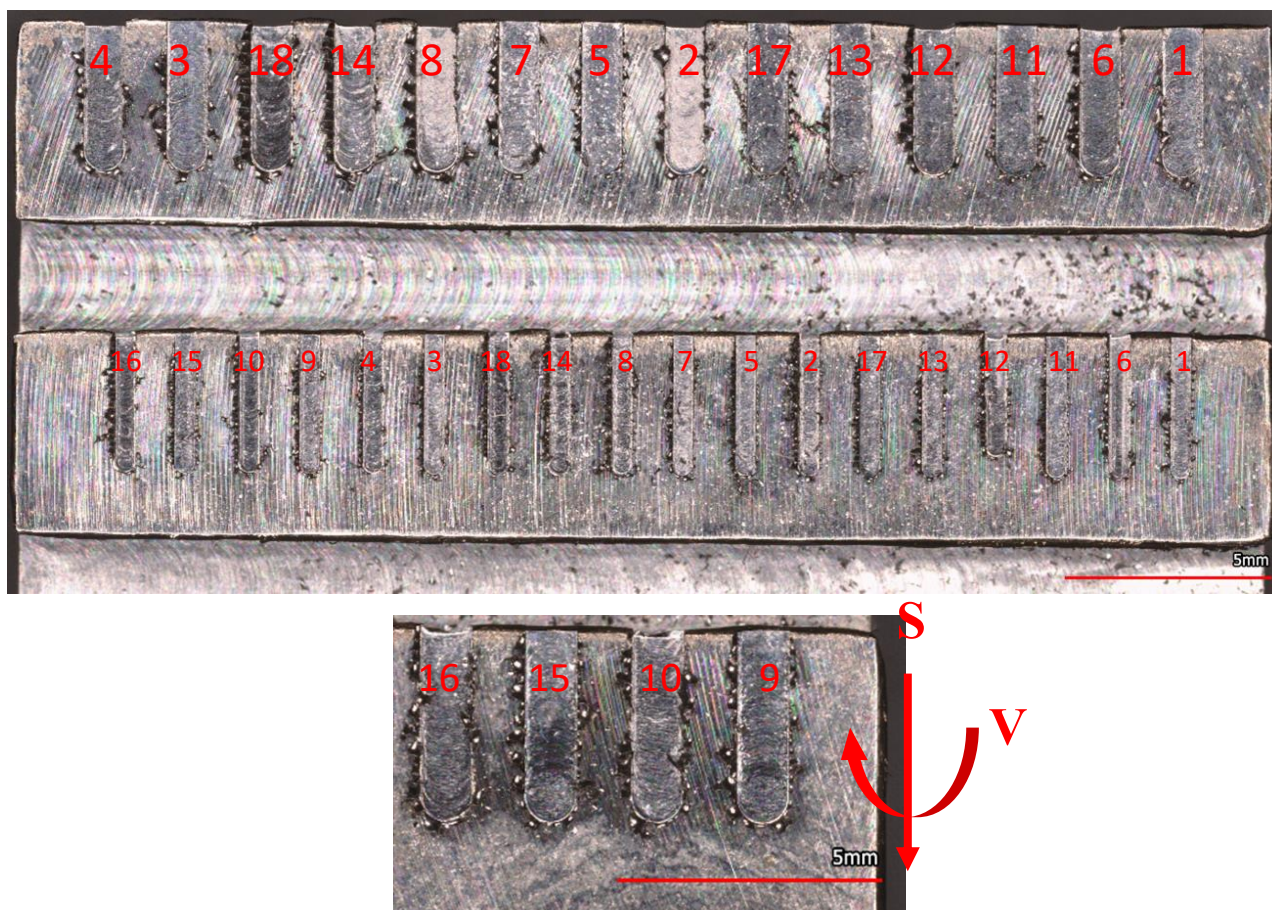


Рис. 3.12 – Отримані пази після мікрофрезерування
(цифрові позначення відповідають номерам експериментів.)

Подальший аналіз топографії поверхні здійснювався в програмному забезпеченні VR-6000 Series Software, за результатами якого визначено параметри шорсткості (табл.3.7), геометричні характеристики поверхні та заусенці.

Таблиця 3.7

Шорсткість R_a , мкм

№	Глибина різання t , мм	Подача на зуб S_z , мм/зуб	Швидкість різання V , м/хв	Шорсткість R_a , мкм	
				0,5	1
1	0,03	0,001	10	0,684	0,62
2	0,1			1,211	0,78
3	0,03	0,002		0,724	0,785
4	0,1			1,376	0,88
5	0,03	0,003		0,763	0,760
6	0,1			1,542	0,98

Закінчення табл. 3.7

7	0,03	0,001	14	0,704	0,655
8	0,1			1,284	0,823
9	0,03	0,002		0,75	0,752
10	0,1			1,514	0,956
11	0,03	0,003		0,809	0,865
12	0,1			1,745	1,091
13	0,03	0,001	18	0,715	0,68
14	0,1			1,341	0,866
15	0,03	0,002		0,782	0,806
16	0,1			1,644	1,038
17	0,03	0,003		0,852	0,938
18	0,1			1,95	1,218

На рис. 3.13-3.14 представлено залежність шорсткості ~~поверхні~~ дна паза від режимів різання для фрези 0,5 та 1 мм.

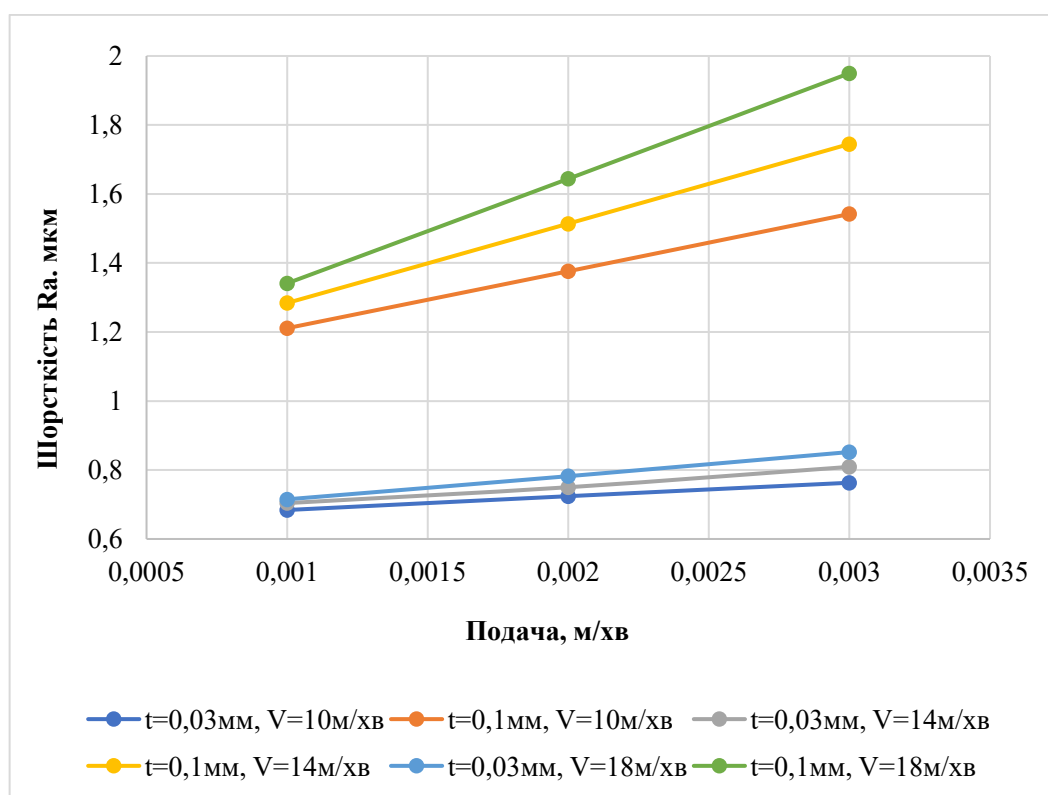


Рис. 3.13 – Вплив режимів різання на шорсткість дна пазу при мікрофрезеруванні фрезою Ø0,5 мм

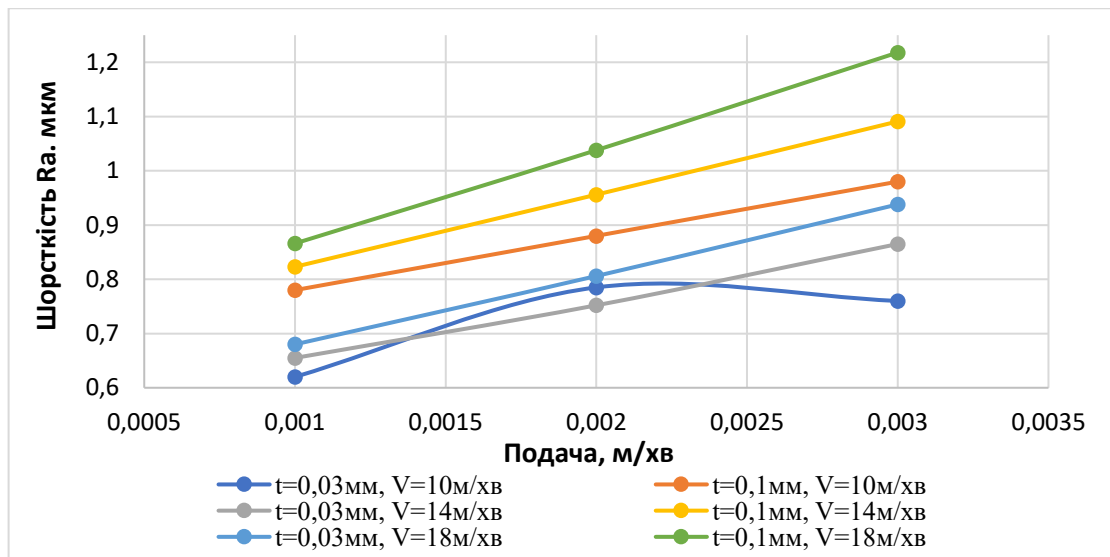


Рис. 3.14 – Вплив режимів різання на шорсткість дна пазу при мікрофрезеруванні фрезою Ø1 мм

Результати дослідження демонструють суттєвий вплив параметрів різання та діаметра інструмента на шорсткість поверхні при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. Встановлено, що застосування мікрофрези діаметром 1 мм у більшості випадків забезпечує нижчі значення шорсткості поверхні R_a порівняно з фрезою діаметром 0,5 мм за аналогічних режимів обробки. Це пояснюється більшою жорсткістю інструмента більшого діаметра, зменшенням його прогину та стабільнішим процесом різання.

Найнижчі значення шорсткості поверхні досягнуті при мінімальних значеннях глибини різання та подачі на зуб. Зокрема, при $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб та швидкості різання $V = 10$ м/хв отримано $R_a = 0,684$ мкм для фрези діаметром 0,5 мм та $R_a = 0,62$ мкм для фрези діаметром 1 мм. Зменшення глибини різання та подачі сприяє зниженню товщини зрізу, що особливо важливо в умовах прояву масштабного ефекту, характерного для мікрообробки NiTi.

Для детального аналізу характеру формування мікрорельєфу та оцінювання впливу режимів різання на якість обробленої поверхні було досліджено профілі поверхонь пазів після мікрофрезерування. На рис. 3.15 та 3.16 представлено профілі поверхонь, сформованих при мікрофрезеруванні пазів інструментами діаметром 0,5 мм та 1 мм за різних режимів різання.

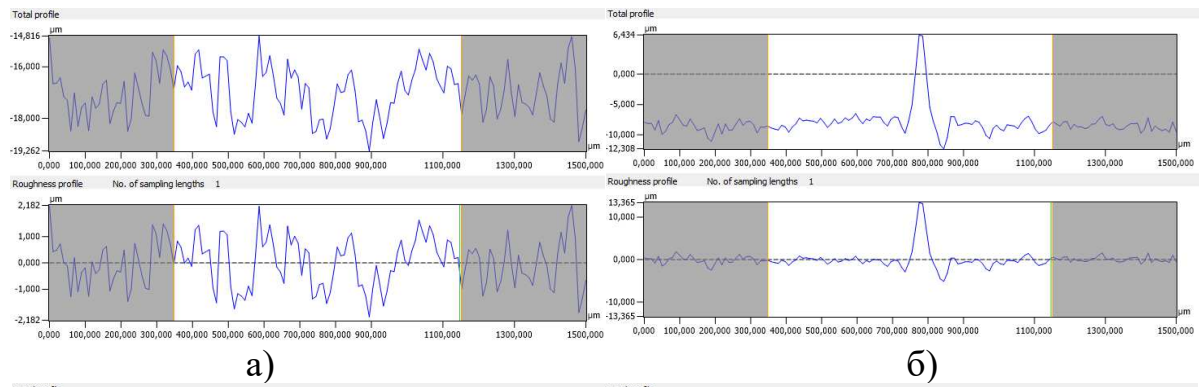


Рис. 3.15 – Профілограми оброблених поверхонь після обробки паза 0,5 мм:

а) $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб, $V = 10$ м/хв, $R_a = 0,684$ мкм;

б) $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв, $R_a = 0,852$ мкм;

в) $t = 0,1$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб, $V = 10$ м/хв, $R_a = 1,211$ мкм;

г) $t = 0,1$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв, $R_a = 1,95$ мкм.

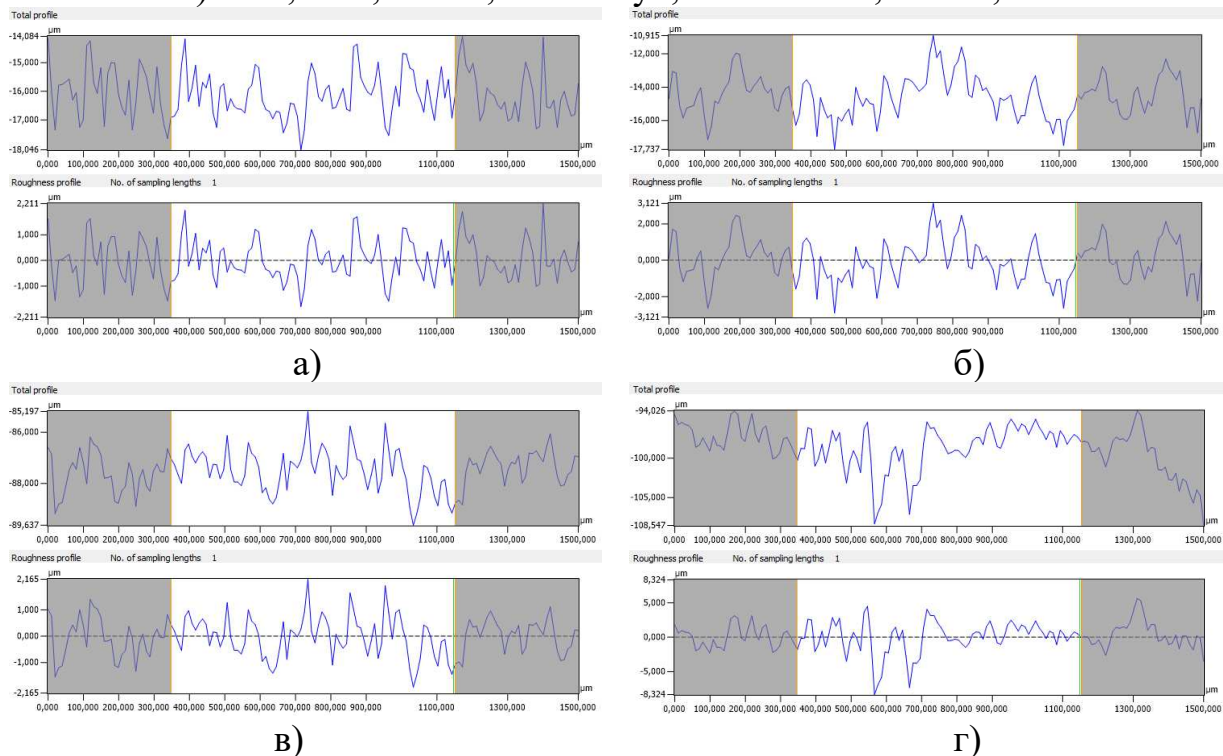


Рис. 3.16 – Профілограм оброблених поверхонь після обробки паза 1 мм:

а) $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб, $V = 10$ м/хв, $R_a = 0,62$ мкм;

б) $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв, $R_a = 0,852$ мкм;

в) $t = 0,1$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб, $V = 10$ м/хв, $R_a = 0,72$ мкм;

г) $t = 0,1$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв, $R_a = 1,218$ мкм.

Аналіз профілограм показує, що збільшення подачі на зуб S_z та швидкості різання V супроводжується підвищенням амплітуди мікронерівностей і зростанням рівня високочастотних коливань профілю, що свідчить про посилення динамічної складової процесу різання. При збільшенні глибини різання до $t=0,1$ мм спостерігається формування більш виражених пікових відхилень профілю, що обумовлено зростанням сил різання та відповідним підвищенням деформаційної та вібраційної нестабільності технологічної системи. Встановлено, що при застосуванні інструмента діаметром 0,5 мм поверхні характеризуються більшою нерівномірністю профілю, що пов'язано з підвищеною чутливістю тонкорозмірного інструмента до масштабного ефекту, відносного радіуса заокруглення ріжучої кромки та коливальних процесів. Натомість при діаметрі інструмента 1 мм формується більш стабільний профіль поверхні з меншими відхиленнями, що свідчить про кращі умови стружкоутворення. Отримані результати підтверджують визначальний вплив параметрів режиму різання та геометрії інструмента на формування топографії поверхні мікропазів і узгоджуються з положеннями теорії мікрорізання щодо зростання ролі ефекта пластичного витіснення матеріалу та мінімальної товщини зрізу при малих подачах.

Зі збільшенням подачі на зуб до $S_z = 0,002\text{--}0,003$ мм/зуб спостерігалось зростання параметрів шорсткості R_a для обох інструментів. Наприклад, при $t = 0,03$ мм та $V = 14$ м/хв значення R_a для фрези 0,5 мм зростає з 0,75 до 0,809 мкм, а для фрези 1 мм – з 0,752 до 0,865 мкм. Це пов'язано зі збільшенням висоти мікронерівностей, що формуються слідами інструмента.

Суттєвий вплив на якість поверхні має також глибина різання. При її збільшенні до $t = 0,1$ мм відбувається різке погіршення шорсткості поверхні, особливо для фрези діаметром 0,5 мм. Так, при $S_z = 0,003$ мм/зуб та $V = 18$ м/хв значення R_a досягає 1,95 мкм для фрези 0,5 мм та 1,218 мкм для фрези 1 мм (табл. 3.8). Це пояснюється зростанням сил різання, підвищенням рівня вібрацій та нестабільністю процесу різання при більших глибинах.

Аналіз впливу швидкості різання показав, що в досліджуваному діапазоні (10–18 м/хв) її підвищення не призводить до суттєвого покращення шорсткості поверхні. Значення R_a змінюються незначно або навіть зростають, що може бути пов'язано з термомеханічними особливостями обробки сплаву NiTi, зокрема фазовими перетвореннями та підвищеною схильністю до пружного відновлення матеріалу.

Таким чином, найкраща якість обробленої поверхні при мікрофрезеруванні сплаву NiTi досягається при поєднанні мінімальних значень глибини різання ($t = 0,03$ мм) та подачі на зуб ($S_z = 0,001$ мм/зуб) незалежно від діаметра інструмента, при цьому застосування фрези більшого діаметра (1 мм) є більш ефективним з точки зору забезпечення стабільності процесу та отримання нижчих значень шорсткості поверхні.

Аналіз результатів вимірювання геометричних параметрів пазів показав, що процес мікрофрезерування сплаву NiTi супроводжується формуванням складного просторового профілю поверхні, характеристики якого істотно залежать від жорсткості інструмента, умов різання та інш. Для оцінювання геометричної точності сформованих пазів (рис. 3.17) визначалися мінімальні та максимальні значення ширини і глибини пазів, кути нахилу лівої (вихід зуба) та правої (вхід зуба) бокових поверхонь, а також радіуси заокруглення в зоні переходу дна паза до бокових стінок таблиця 3.8-9.

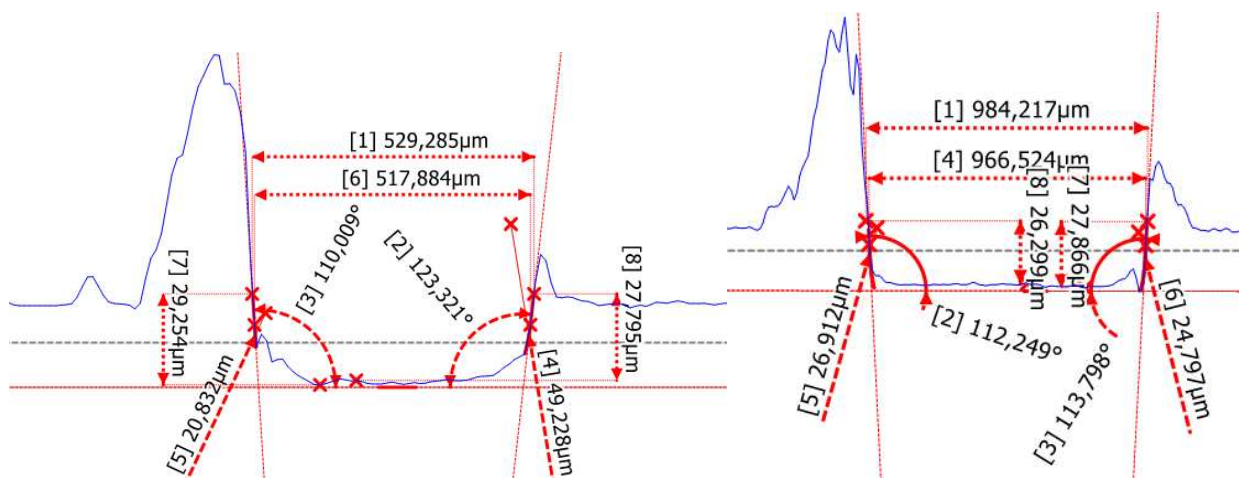


Рис. 3.17 – Профілі поверхні пазів №5 при мікрофрезеруванні сплаву NiTi:

а) при застосуванні фрези $\varnothing 0,5$ мм; б) при застосуванні фрези $\varnothing 1$ мм

Таблиця 3.8

Геометрична точність сформованих пазів при мікрофрезеруванні фрезою 0,5 мм

№	Ширина, мкм			Глибина, мкм			Кут, °		Радіус, мкм	
	мін	макс	Δ	мін	макс	Δ	на вході	на виході	на вході	на виході
1	482,29	500,11	17,82	29,50	32,31	2,81	123,57	120,02	41,16	32,18
2	420,84	493,97	73,13	96,75	100,23	3,48	103,19	123,47	22,26	46,49
3	471,97	501,34	29,38	25,19	26,11	0,92	126,05	134,03	35,80	45,37
4	447,92	507,36	59,44	97,50	100,79	3,29	98,54	116,20	28,98	43,61
5	517,88	528,66	10,77	27,80	29,25	1,46	110,01	123,32	20,83	49,22
6	461,21	520,03	58,82	100,30	104,01	3,71	101,71	120,05	42,99	41,23
7	481,61	499,27	17,66	28,17	29,35	1,18	135,74	131,73	33,56	57,99
8	422,27	500,01	77,74	96,90	98,63	1,73	107,62	121,94	37,57	69,91
9	507,11	524,32	17,21	27,88	29,97	2,09	112,02	139,80	29,99	51,06
10	501,77	527,80	26,03	98,22	102,82	4,60	95,05	109,09	27,67	33,54
11	520,83	535,61	14,78	28,18	29,44	1,26	111,78	134,42	20,56	46,45
12	485,78	527,81	42,04	97,65	102,16	4,51	97,36	108,23	37,23	48,31
13	463,43	497,01	33,58	25,49	26,35	0,85	141,80	134,11	61,01	65,58
14	434,40	501,36	66,97	96,42	98,57	2,15	95,65	114,33	38,80	66,16
15	498,18	517,48	19,30	28,95	30,92	1,97	118,05	135,57	32,41	69,73
16	479,62	515,11	35,48	92,54	95,42	2,89	97,24	118,48	27,40	55,31
17	503,51	515,03	11,52	24,33	26,04	1,70	117,19	125,85	25,48	28,46
18	486,35	514,87	28,53	95,30	97,83	2,53	101,73	116,34	24,71	22,27

Результати дослідження свідчать, що при застосуванні фрези діаметром $\varnothing 0,5$ мм спостерігалось суттєвий розкид геометричних параметрів пазів. Мінімальні значення ширини пазів знаходилися в межах 421–520 мкм, тоді як максимальні значення досягали 494–535 мкм. Δ ширини в окремих випадках перевищувала 70–80 мкм, що свідчить про нестабільність траєкторії руху інструмента під час різання. Подібна нестабільність є характерною особливістю мікрофрезерування інструментами малого діаметра та обумовлена підвищеною чутливістю мікрофрез до дії радіальних складових сили різання. Внаслідок недостатньої жорсткості інструмента виникають пружні відхилення фрези, які

призводять до локального розширення профілю паза та порушення його прямолінійності.

Таблиця 3.9

Геометрична точність сформованих пазів при мікрофрезеруванні фрезою 1 мм

№	Ширина, мкм			Глибина, мкм			Кут, °		Радіус, мкм	
	мін	макс	Δ	мін	макс	Δ	на вхіді	на виході	на вхіді	на виході
1	985,77	999,82	14,05	28,07	29,13	1,07	120,90	137,37	29,38	58,07
2	874,11	955,48	81,37	98,99	100,57	1,58	108,08	123,14	25,29	20,79
3	949,58	980,51	30,93	26,49	28,57	2,08	126,78	144,57	39,26	44,89
4	874,94	946,03	71,10	98,53	101,53	3,01	106,37	118,63	32,16	64,55
5	966,52	984,22	17,69	26,14	27,91	1,77	112,25	113,80	26,91	24,80
6	911,12	965,95	54,83	101,30	103,09	1,80	95,42	115,74	26,14	52,35
7	956,08	985,27	29,19	26,90	28,59	1,69	132,13	156,96	37,13	63,02
8	888,74	962,80	74,06	98,18	100,32	2,15	98,93	117,20	31,13	42,98
9	995,79	1001,31	5,52	28,71	30,11	1,40	101,68	120,16	20,48	25,93
10	933,01	973,52	40,51	100,24	102,45	2,21	95,25	102,50	31,66	54,71
11	991,03	999,16	8,13	28,51	30,36	1,86	106,83	115,03	22,37	38,38
12	924,47	977,53	53,07	100,62	102,85	2,22	96,80	112,92	30,64	52,83
13	989,02	1001,84	12,83	26,62	27,94	1,32	116,71	131,50	27,20	36,26
14	920,24	981,79	61,55	98,46	103,37	4,91	97,55	123,05	72,17	65,97
15	987,66	979,41	-8,25	28,15	30,85	2,70	102,58	121,11	21,40	40,68
16	916,48	964,67	48,19	95,50	100,67	5,17	102,71	110,08	46,32	78,79
17	983,62	994,22	10,60	26,03	27,23	1,20	111,64	111,66	20,08	24,49
18	871,24	959,14	87,90	96,97	103,26	6,29	93,88	116,74	77,49	74,69

Аналіз параметрів глибини пазів також підтверджувався наявністю виражених геометричних відхилень. Для фрези $\varnothing 0,5$ мм Δ глибини в окремих випадках перевищувала 4 мкм. Оскільки для формування кожного окремого паза використовувалася нова фреза, виявлені відхилення не можуть бути пов'язані із накопиченим зносом інструмента. У даному випадку нерівномірність глибини пазів обумовлена, насамперед, недостатньою жорсткістю мікроінструмента, його схильністю до пружних відхилень під дією

сил різання, а також впливом динамічних коливань технологічної системи. Для фрез малого діаметра навіть незначні зміни умов контакту в зоні різання можуть призводити до зміни фактичної глибини врізання інструмента. Додатковий вплив мають високі пружні властивості сплаву NiTi та ефект пружно-пластичного відновлення матеріалу після проходження різальної кромки, що ускладнює стабільне формування профілю дна паза та сприяє збільшенню геометричних відхилень.

Особливу увагу привертає асиметричність бокових поверхонь пазів. Значення кутів нахилу лівої та правої стінок суттєво відрізнялися між собою, таке явище свідчило про нерівномірний розподіл навантаження на різальні кромки та відхилення осі інструмента під дією сил різання. Додатково на формування асиметрії впливають вібраційні коливання технологічної системи, які для мікроінструментів малого діаметра мають значно більший вплив порівняно з традиційним фрезеруванням. При мікрофрезеруванні сплаву NiTi цей ефект посилюється через високі пружні властивості матеріалу та схильність сплаву до пружно-пластичного відновлення після проходження різальної кромки.

Аналіз радіусів заокруглення бокових поверхонь та дна пазів підтверджувався нерівномірним формуванням геометрії профілю. Для фрези Ø0,5 мм спостерігалися значні розкиди значень радіусів між лівою та правою сторонами паза. У ряді випадків різниця між радіусами перевищує 30–40 мкм, що вказує на нестабільність процесу різання та локальні деформації інструмента. Формування таких дефектів може бути пов'язане з мікроколиваннями фрези, налипанням матеріалу на різальні кромки та періодичною зміною умов контакту інструмента з поверхнею оброблення.

Для пазів, сформованих фрезою Ø1 мм, геометричні характеристики є значно стабільнішими. Незважаючи на наявність певного розкиду параметрів ширини та глибини, відхилення мали менший характер порівняно з фрезою Ø0,5 мм. Це пояснюється вищою жорсткістю інструмента більшого діаметра, зменшенням його пружних деформацій та нижчим рівнем динамічних коливань

у процесі різання. Більш стабільна геометрія пазів при застосуванні фрези Ø1 мм також свідчить про покращення умов стружкоутворення та зменшення впливу масштабного ефекту. За більших значень товщини зрізуваного шару процес різання переходить у стабільніший режим із меншим домінуванням процесів пластичного витіснення матеріалу та тертя.

Результати вимірювання геометричних параметрів заусенців, сформованих при мікрофрезеруванні пазів у сплаві NiTi фрезами діаметром Ø0,5 мм та Ø1 мм, наведено в таблиці 3.10.

Таблиця 3.10

Геометрія заусенців сформованих пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi

Паз шириною 0,5 мм					Паз шириною 1 мм				
№	Лівий		Правий		№	Лівий		Правий	
	висота	ширина	висота	ширина		висота	ширина	висота	ширина
1	415,315	305,412	190,812	251,850	1	346,105	417,971	12,443	38,526
2	263,318	354,723	175,210	132,727	2	279,017	441,428	184,842	337,470
3	253,005	322,223	138,474	105,311	3	318,282	476,430	201,999	182,525
4	130,572	214,841	137,773	187,283	4	212,165	333,676	189,898	248,700
5	175,731	241,418	58,717	49,909	5	155,295	304,303	280,117	134,660
6	148,914	279,198	253,503	145,095	6	290,261	378,836	93,994	154,687
7	214,616	269,887	134,367	202,349	7	275,136	327,382	129,070	193,248
8	202,656	286,987	116,600	163,606	8	385,388	365,739	170,453	387,609
9	198,373	204,498	124,398	193,365	9	257,557	398,521	175,868	204,625
10	179,180	322,981	158,575	120,647	10	364,629	400,017	243,555	289,202
11	206,990	225,628	59,763	107,845	11	132,946	255,260	284,656	198,504
12	216,582	229,703	158,028	216,737	12	363,603	429,365	190,134	192,295
13	189,945	285,276	112,109	188,055	13	101,388	189,590	75,031	126,081
14	232,254	486,555	120,020	138,418	14	307,340	304,323	247,972	210,880
15	191,113	205,021	116,253	175,381	15	254,683	329,500	220,519	237,208
16	242,463	433,882	91,007	152,692	16	500,327	415,647	310,371	288,473
17	233,440	242,351	72,940	141,364	17	164,039	188,986	172,321	271,237
18	235,478	329,101	89,705	178,656	18	349,240	486,729	224,513	309,745

Для оцінювання особливостей формування крайок пазів визначалися висота та ширина лівого і правого заусенців, що дозволило проаналізувати вплив діаметра інструмента та умов різання на інтенсивність пластичного деформування матеріалу.

Аналіз отриманих результатів показує, що процес формування заусенців при мікрофрезеруванні сплаву NiTi характеризується значною нерівномірністю геометричних параметрів та вираженою асиметрією між протилежними сторонами пазів. Для пазів, сформованих фрезою Ø0,5 мм, спостерігається суттєвий розкид як висоти, так і ширини заусенців. При цьому для більшості досліджених пазів характерним є переважання параметрів лівого заусенця над правим. Зокрема, для пазів №1, №6, №10, №14 та №16 висота лівого заусенця суттєво перевищує відповідні значення правої сторони, що свідчить про нерівномірний розподіл навантаження на різальні кромки інструмента та нестабільність умов стружкоутворення.

Ширина заусенців також характеризується значною варіативністю. Для окремих пазів ширина лівого заусенця більш ніж удвічі перевищує ширину правого, що особливо помітно для пазів №3, №10 та №14. Така асиметрія може бути пов'язана з відхиленням мікрофрези під дією радіальних складових сили різання, а також із нестабільним пластичним витісненням матеріалу вздовж крайок паза. Для фрези Ø0,5 мм цей ефект проявляється інтенсивніше через меншу жорсткість інструмента та підвищену чутливість до динамічних коливань технологічної системи.

Для пазів, сформованих фрезою Ø1 мм, загальний характер формування заусенців залишається подібним, однак розподіл параметрів є більш стабільним. Незважаючи на наявність окремих випадків формування значних заусенців, для більшості пазів спостерігається менша різниця між параметрами лівої та правої сторін порівняно з фрезою Ø0,5 мм. Це свідчить про більш стабільний процес різання та менший рівень пружних відхилень інструмента. Разом з тим для окремих пазів, зокрема №5 (рис. 3.18), №10, №15 та №16, спостерігаються суттєві значення висоти та ширини заусенців, що вказує на

локальну нестабільність процесу пластичного деформування матеріалу навіть при застосуванні жорсткішого інструмента.

Характерною особливістю для обох діаметрів фрез був значний розкид параметрів правих заусенців. У ряді випадків їх висота та ширина була суттєво меншою порівняно з лівою стороною, що може бути пов'язано з різними умовами входу та виходу різальної кромки із зони різання. При мікрофрезеруванні сплаву NiTi це явище додатково посилюється високими пружними властивостями матеріалу та його схильністю до пружно-пластичного відновлення після проходження інструмента.

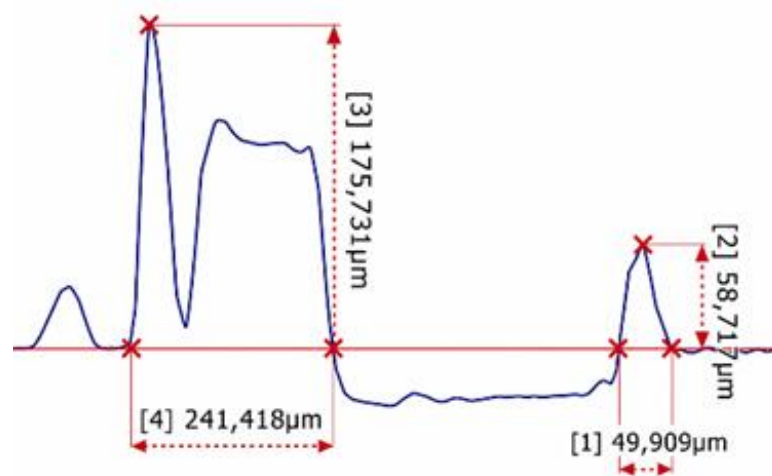


Рис. 3.18 – Профілі утворених заусенців паза №5
($S_z=0,003$ мм/зуб, $t=0,03$ мм, $V=10$ м/хв)

Отримані результати підтверджують, що утворення заусенців при мікрофрезеруванні сплаву NiTi має складний багатофакторний характер і визначається одночасним впливом масштабного ефекту, пружних деформацій мікроінструмента, динамічної нестабільності процесу та особливостей пластичного деформування матеріалу. Застосування фрези Ø1 мм забезпечує більш стабільне формування крайок пазів та зменшення асиметрії заусенців, тоді як для фрези Ø0,5 мм характерним є інтенсивніше пластичне витіснення матеріалу та більша нерівномірність геометричних параметрів заусенців.

Запропонована модель прогнозування параметра шорсткості R_a демонструє високу адекватність експериментальним даним і може бути

ефективно використана для оптимізації режимів мікрофрезерування сплаву NiTi з метою забезпечення стабільності процесу та заданої якості обробленої поверхні.

Дослідження впливу зносу фрези на якість дна паза. Мікрофрезерування пазів здійснювалося при однакових режимах різання: подача на зуб $S_z=0,003$ мм/зуб та швидкість різання $V=18$ м/хв. Для формування пазів використовувалися фрези діаметром 0,5 мм та 1 мм. Глибина різання за один прохід становила 0,05 мм для фрези $\varnothing 0,5$ мм та 0,1 мм для фрези $\varnothing 1$ мм. На рисунку 3.19 наведено результати оброблення пазів із зазначенням параметра шорсткості паза R_a . Значення під зображенням відповідають кількості проходів інструмента.

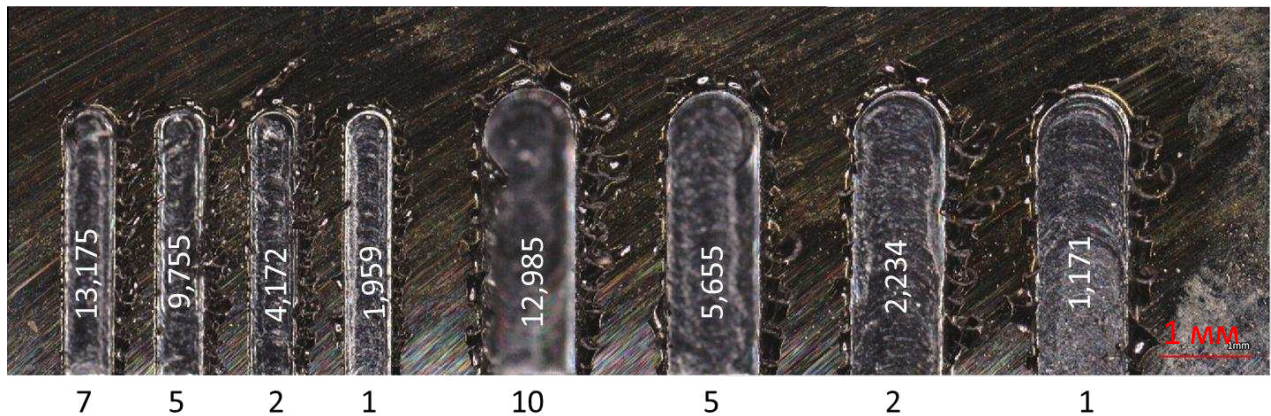


Рис. 3.19 – Фото оброблених поверхонь

Всі пази оброблялися одним інструментом відповідного діаметра. При цьому фреза $\varnothing 0,5$ мм зазнала руйнування на 16 проходів, що свідчить про її недостатню жорсткість та підвищену чутливість до динамічних навантажень у процесі мікрофрезерування. Причиною руйнування могли бути підвищені вібрації, циклічні навантаження на ріжучу частину, поступове зростання зносу різальної кромки, а також посилення впливу масштабного ефекту, за якого процес різання частково переходить у режим пружно-пластичного деформування та тертя. Додатково на руйнування інструмента могли вплинути налипання матеріалу NiTi на різальні кромки, локальне підвищення

температури стружки та мала жорсткість фрези малого діаметра, що сприяє її відхиленню та концентрації напружень у небезпечних перерізах.

Зі збільшенням кількості проходів спостерігається тенденція до збільшення шорсткості поверхні дна паза. Це пов'язано з поступовим видаленням нерівностей попередніх проходів та більш рівномірним формуванням мікрорельєфу поверхні. Водночас надмірне збільшення кількості проходів може призводити до накопичення похибок, зносу інструмента та зростання впливу вібрацій, що, у свою чергу, може погіршувати якість поверхні.

Отримані результати підтверджують суттєвий вплив жорсткості та зносу мікрофрез на формування якості дна пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. Встановлено, що фреза Ø1 мм забезпечує більш стабільний процес мікрофрезерування та вищу стійкість до динамічних навантажень, тоді як фреза Ø0,5 мм характеризується підвищеною схильністю до вібрацій, інтенсивного зносу та руйнування при тривалій роботі.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3

1. Проведено експериментальні та скінченно-елементні дослідження процесу мікрофрезерування пазів у сплаві NiTi фрезами діаметром 0,2; 0,5 та 1 мм, що дозволило встановити закономірності зміни сил різання, температури, вібрацій та показників якості пазів залежно від режимів різання.

2. Встановлено, що найбільший вплив на силові характеристики процесу мікрофрезерування має глибина різання t . При її збільшенні з 0,03 до 0,1 мм рівнодійна сила різання R для фрези Ø1 мм зростає у 3,5–3,8 раза, тоді як для фрези Ø0,5 мм збільшення становить близько 2,1–2,2 раза. Домінуючою складовою сили різання в усіх випадках є R_y , що обумовлено особливостями взаємодії інструмента зі стінками паза.

3. Підтверджено адекватність розробленої скінченно-елементної моделі процесу мікрофрезерування сплаву NiTi. Середня похибка між результатами

експериментальних досліджень та скінченно-елементного моделювання для складових сил різання не перевищує 14 %, що свідчить про можливість використання моделі для прогнозування силових та температурних характеристик процесу.

4. Встановлено прояв масштабного ефекту при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. При зменшенні товщини зрізу до значень, співрозмірних із радіусом заокруглення ріжучої кромки, відбувається різке зростання питомої сили різання до 3100 ГПа (гіпотетично) внаслідок домінування пластичного деформування матеріалу. Показано, що найбільш сприятливі умови для мікрофрезерування NiTi мають місце при масштабному коефіцієнті $k_m > 0.5$, що забезпечує менші енергетичні витрати та більш стабільні умови стружкоутворення.

5. Визначено закономірності зміни температури стружки при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. Встановлено, що зі збільшенням глибини різання, подачі на зуб та швидкості різання температура стружки суттєво зростає. Максимальні температури досягали 374,82 °C для фрези Ø1 мм та 315,75 °C для фрези Ø0,5 мм при режимах $t=0,1$ мм, $S_z=0,003$ мм/зуб та $V=18$ м/хв.

6. Дослідження вібраційних характеристик процесу показали, що зменшення діаметра інструмента призводить до істотного підвищення динамічної нестабільності процесу. Для фрези Ø0,5 мм максимальне значення середньоквадратичного вібраційного прискорення досягало 0,1656 м/с², що майже вдвічі перевищує аналогічні значення для фрези Ø1 мм. Встановлено, що найбільший рівень вібрацій спостерігається при поєднанні підвищених значень глибини різання та швидкості різання.

7. Встановлено, що найкращі показники шорсткості поверхні забезпечуються при мінімальних значеннях подачі та глибини різання. Найменші значення параметра шорсткості R_a становили 0,62 мкм для фрези Ø1 мм та 0,684 мкм для фрези Ø0,5 мм при режимах $t=0,03$ мм, $S_z=0,001$ мм/зуб та

$V=10$ м/хв. При збільшенні глибини різання до 0,1 мм і подачі до 0,003 мм/зуб шорсткість зростала до 1,218 та 1,95 мкм відповідно.

8. Аналіз геометричної точності сформованих пазів показав, що застосування фрези $\varnothing 1$ мм забезпечує менші відхилення геометричних параметрів пазів порівняно з фрезою $\varnothing 0,5$ мм. Для фрези $\varnothing 0,5$ мм відхилення ширини пазів у окремих випадках перевищували 70–80 мкм, що пов'язано зі зниженням згинальної жорсткості інструмента, підвищенням рівня вібрацій та збільшенням пружних деформацій у процесі мікрофрезерування.

РОЗДІЛ 4 ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РІЗАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОБРОБКИ ПАЗІВ

4.1 Дисперсійно-регресійний аналіз результатів дослідження

Дисперсійно-регресійний аналіз результатів дослідження має на меті встановлення кількісних закономірностей впливу режимів різання на сили різання, температури, вібраційні характеристики процесу, а також показники якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. На відміну від описового аналізу експериментальних даних, застосування методів дисперсійного аналізу (ANOVA) та регресійного моделювання дозволяє не лише оцінити ступінь впливу окремих факторів, але й виявити їхню статистичну значущість, а також встановити характер взаємодії між ними в межах досліджуваного факторного простору.

Основними факторами варіювання були глибина різання t , подача на зуб S_z та швидкість різання V , які суттєво впливають на механізм стружкоутворення, сили різання, температурні поля та динамічну стабільність процесу мікрофрезерування.

4.1.1 Дисперсійно-регресійний аналіз сил різання

Для встановлення ступеня впливу параметрів режиму різання на силові характеристики процесу мікрофрезерування було проведено дисперсійний аналіз результатів експериментальних досліджень (табл. 4.1–4.6).

Таблиця 4.1

Результати дисперсійного аналізу сил різання для фрези діаметром 0,5 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p -значення для F -критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
P_x						
t	31,468889	1	5827,027	<0,0001	5827,027	95,485
S_z	0,952033	1	176,2860	<0,0001	176,2860	2,889

Закінчення табл. 4.1

V	0,316875	1	58,6751	<0,0001	58,6751	0,961
$t \times Sz$	0,050700	1	9,3880	0,0108	9,3880	0,154
$t \times V$	0,075208	1	13,9262	0,0033	13,9262	0,228
$S_z \times V$	0,033800	1	6,2587	0,0294	6,2587	0,103
Залишок	0,059406	11	-	-	0,0054	0,180
Разом	32,956911	17	-	-	-	100,000
Py						
t	34,722222	1	6746,811	<0,0001	34,722222	97,131
S_z	0,720300	1	139,9602	<0,0001	0,720300	2,015
V	0,185008	1	35,9486	<0,0001	0,185008	0,518
$t \times Sz$	0,019200	1	3,7307	0,0796	0,019200	0,054
$t \times V$	0,002408	1	0,4680	0,5081	0,002408	0,007
$S_z \times V$	0,042050	1	8,1707	0,0156	0,042050	0,118
Залишок	0,056611	11	-	-	0,00515	0,158
Разом	35,7478	17	-	-	-	100,000
Pz						
t	0,12333889	1	114,5992	<0,0001	0,12333889	29,881
S_z	0,17520833	1	162,7933	<0,0001	0,17520833	42,448
V	0,07363333	1	68,4158	<0,0001	0,07363333	17,839
$t \times Sz$	0,01540833	1	14,3165	0,0030	0,01540833	3,733
$t \times V$	0,01333333	1	12,3885	0,0048	0,01333333	3,230
$S_z \times V$	7,449e-34	1	0,0000	1,0000	7,449e-34	0,000
Залишок	0,01183889	11	-	-	0,001076	2,868
Разом	0,41276111	17	-	-	-	100,000

Для складової сили Pz при використанні фрези Ø0,5 мм домінуючим фактором була подача на зуб Sz, що пов'язано з посиленням впливу масштабного ефекту при зменшенні діаметра інструмента та товщини зрізуваного шару.

Таблиця 4.2

Результати дисперсійного аналізу сил різання для фрези діаметром 1 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
Px						
t	382,53780	1	12770,82	<0,0001	382,53780	99,216
S_z	1,20968	1	40,3844	<0,0001	1,20968	0,314
V	1,09203	1	36,4570	<0,0001	1,09203	0,283
$t \times Sz$	0,02341	1	0,7815	0,3956	0,02341	0,006

Закінчення табл. 4.2

$t \times V$	0,28830	1	9,6247	0,0101	0,28830	0,075
$S_z \times V$	0,08000	1	2,6708	0,1305	0,08000	0,021
Залишок	0,32949	11	-	-	0,03	0,085
Разом	385,56071	17	-	-	-	100,000
Py						
t	532,57601	1	7083,043	<0,0001	532,57601	98,097
S_z	4,87687	1	64,8604	<0,0001	4,87687	0,898
V	3,24480	1	43,1545	<0,0001	3,24480	0,598
$t \times S_z$	0,84801	1	11,2782	0,0064	0,84801	0,156
$t \times V$	0,32013	1	4,2576	0,0635	0,32013	0,059
$S_z \times V$	0,21451	1	2,8529	0,1193	0,21451	0,040
Залишок	0,82709	11	-	-	0,0752	0,152
Разом	542,90743	17	-	-	-	100,000
Pz						
t	98,326939	1	15413,45	<0,0001	98,326939	98,827
S_z	0,279075	1	43,7470	<0,0001	0,279075	0,280
V	0,616533	1	96,6460	<0,0001	0,616533	0,620
$t \times S_z$	0,057408	1	8,9992	0,0121	0,057408	0,058
$t \times V$	0,140833	1	22,0766	0,0007	0,140833	0,142
$S_z \times V$	0,003200	1	0,5016	0,4935	0,003200	0,003
Залишок	0,070172	11	-	-	0,0064	0,071
Разом	99,494161	17	-	-	-	100,000

Таблиця 4.3

Результати дисперсійного аналізу рівнодійної сили різання для фрези
діаметром 0,5 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	р-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
R						
t	63,056450	1	7423,699	<0,0001	63,056450	95,984
S_z	1,794133	1	211,2251	<0,0001	1,794133	2,731
V	0,572033	1	67,3461	<0,0001	0,572033	0,871
$t \times S_z$	0,076800	1	9,0417	0,0119	0,076800	0,117
$t \times V$	0,030000	1	3,5319	0,0869	0,030000	0,046
$S_z \times V$	0,072200	1	8,5002	0,0140	0,072200	0,110
Залишок	0,093433	11	-	-	0,0085	0,142
Разом	65,695050	17	-	-	-	100,000

Таблиця 4.4

Результати дисперсійного аналізу рівнодійної сили різання для фрези
діаметром 1 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
R						
t	1007,1072	1	13264,72	<0,0001	1007,1072	98,672
S_z	6,0919	1	80,2368	<0,0001	6,0919	0,597
V	4,9152	1	64,7386	<0,0001	4,9152	0,482
$t \times S_z$	0,7252	1	9,5518	0,0103	0,7252	0,071
$t \times V$	0,7105	1	9,3585	0,0109	0,7105	0,070
$S_z \times V$	0,2738	1	3,6063	0,0841	0,2738	0,027
Залишок	0,8352	11	-	-	0,076	0,082
Разом	1020,6590	17	-	-	-	100,000

Згідно з результатами (табл. 4.1 – 4.4), найбільший вплив на складові сил різання P_x , P_y та рівнодійну силу різання R мала глибина різання t , внесок якої перевищував 95 %. Це пояснюється збільшенням площі зрізуваного шару та об'єму матеріалу, що деформувався у процесі різання.

Таблиця 4.5

Результати дисперсійного аналізу питомої сили різання для фрези
діаметром 0,5 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
K						
t	2537,3313	1	37,7505	<0,0001	2537,3313	22,064
S_z	7858,6890	1	116,9220	<0,0001	7858,6890	68,338
V	57,3781	1	0,8537	0,3753	57,3781	0,499
$t \times S_z$	298,5019	1	4,4411	0,0588	298,5019	2,596
$t \times V$	7,7120	1	0,1147	0,7412	7,7120	0,067
$S_z \times V$	0,7938	1	0,0118	0,9154	0,7938	0,007
Залишок	739,344	11			67,21	6,429
Разом	11499,750	17				100,000

Таблиця 4.6

Результати дисперсійного аналізу питомої сили різання для фрези
діаметром 1 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
К						
t	260,604	1	0,7722	0,3983	260,604	0,548
S_z	42813,269	1	126,8562	<0,0001	42813,269	90,064
V	492,160	1	1,4583	0,2525	492,160	1,035
$t \times S_z$	160,528	1	0,4756	0,5047	160,528	0,338
$t \times V$	40,590	1	0,1203	0,7353	40,590	0,085
$S_z \times V$	57,085	1	0,1691	0,6888	57,085	0,120
Залишок	3712,438	11			337,49	7,810
Разом	47536,675	17				100,000

Аналіз питомої сили різання К (табл. 4.5, 4.6) показав, що основний вплив мала подача на зуб S_z , внесок якої становив 68,338 % для фрези Ø0,5 мм та 90,064 % для Ø1 мм. Отримані результати підтвердили, що зі зміною товщини зрізуваного шару суттєво змінювались енергетичні характеристики процесу мікрофрезерування та інтенсивність прояву масштабного ефекту. Водночас швидкість різання V не мала статистично значущого впливу на сили різання у досліджуваному діапазоні режимів різання.

На основі даних скінченно-елементного моделювання та дисперсійного аналізу було побудовано багатофакторні лінійні регресійні моделі для опису залежностей складових сил різання (P_x , P_y , P_z), рівнодійної (R) та питомої (K) сили різання від режимів різання (t , S_z , V):

$$P_{x0,5} = 37,777778 \cdot t + 281,66667 \cdot S_z + 0,040625 \cdot V + 1857,1429 \cdot t \cdot S_z + 0,5654762 \cdot t \cdot V + 16,25 \cdot S_z \cdot V \quad (4.1)$$

$$P_{y0,5} = 39,68254 \cdot t + 245 \cdot S_z + 0,0310417 \cdot V + 18,125 \cdot S_z \cdot V \quad (4.2)$$

$$P_{z0,5} = 0,6232143 + 2,3650794 \cdot t + 120,83333 \cdot S_z + 0,0195833 \cdot V + 1023,8095 \cdot t \cdot S_z - 0,238095 \cdot t \cdot V \quad (4.3)$$

$$R_{0,5} = 53,47619 \cdot t + 386,66667 \cdot S_z + 0,0545833 \cdot V + 2285,7143 \cdot t \cdot S_z + 23,75 \cdot S_z \cdot V \quad (4.4)$$

$$K_{0,5} = 119,81278 - 339,2222 \cdot t - 25590,83 \cdot S_z \quad (4.5)$$

$$P_{x1} = -2,564484127 + 131,71428571 \cdot t - 317,5 \cdot S_z - 0,0754166667 \cdot V + 1,1071425871 \cdot t \cdot V \quad (4.6)$$

$$P_{y1} = -2,872936508 + 155,41269841 \cdot t - 637,5 \cdot S_z - 0,13 \cdot V + 7595,2380952 \cdot t \cdot S_z \quad (4.7)$$

$$P_{z1} = -1,596111111 + 66,777777778 \cdot t - 152,5 \cdot S_z + 0,0566666667 \cdot V + 1976,1904762 \cdot t \cdot S_z + 0,7738095238 \cdot t \cdot V \quad (4.8)$$

$$R_1 = -4,107539683 + 213,71428571 \cdot t + 712,5 \cdot S_z + 0,16 \cdot V + 7023,8095238 \cdot t \cdot S_z + 1,7380952381 \cdot t \cdot V \quad (4.9)$$

$$K_1 = 211,94676587 - 59730,83333 \cdot S_z \quad (4.10)$$

На рис. 4.1–4.2 наведено оцінку надійності та точності розроблених регресійних моделей. Значення коефіцієнта детермінації $RSq=R^2$ для всіх апроксимаційних регресійних рівнянь перевищували 0,75, що свідчить про їх статистичну прийнятність та достатню адекватність експериментальним даним. На рисунках представлено результати порівняння експериментальних і прогнозованих значень досліджуваних параметрів, отриманих за побудованими регресійними моделями. Експериментальні дані подано у вигляді окремих точок, регресійні залежності – у вигляді апроксимувальних ліній, а заштриховані області характеризують довірчий інтервал прогнозованих значень. Крім того, показник RMSE (Root Mean Square Error) характеризує величину середньоквадратичної похибки прогнозування, а значення $P\text{-value} < 0,0001$ підтверджує статистичну значущість отриманих регресійних залежностей.

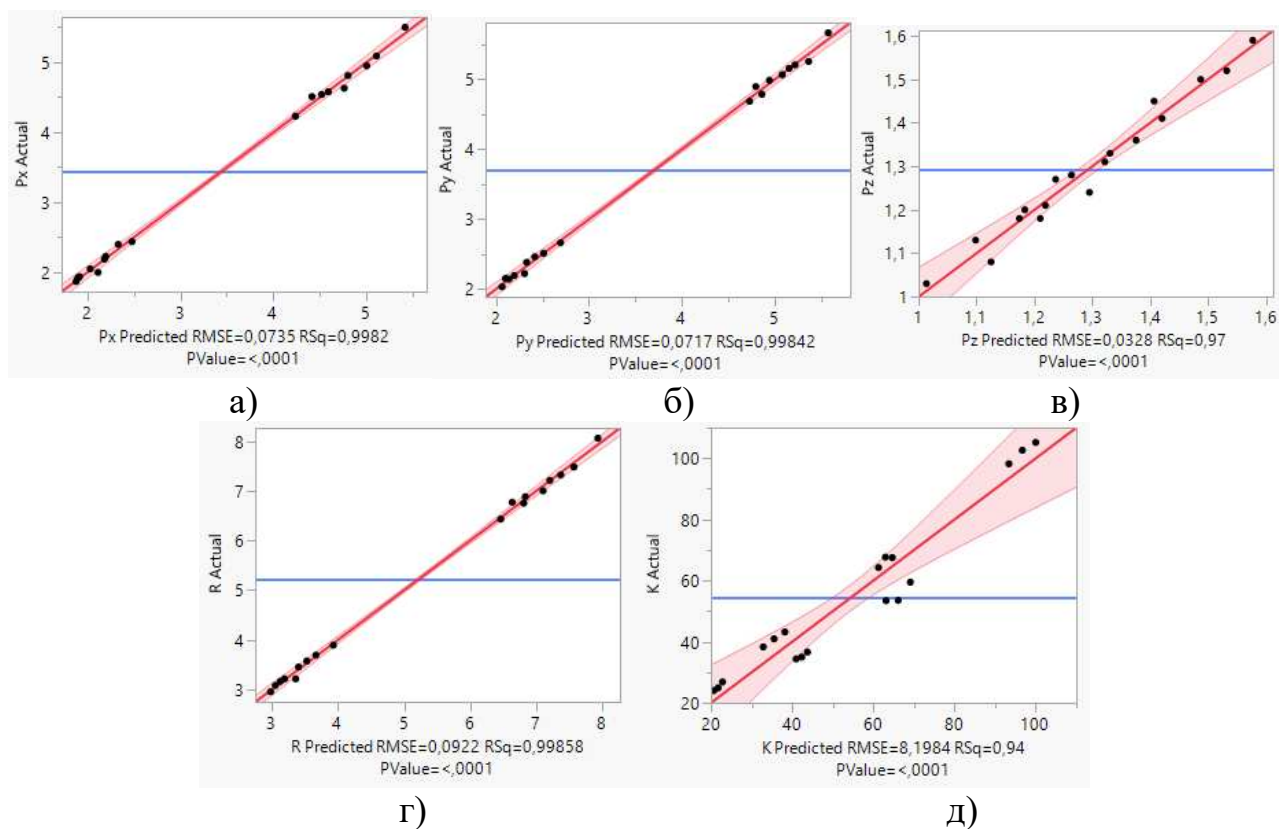


Рис. 4.1 – Залежність експериментальних та прогнозованих значень сил різання при мікрофрезеруванні паза 0,5 мм: а) Px; б) Py; в) Pz; г) рівнодійна; д) питима

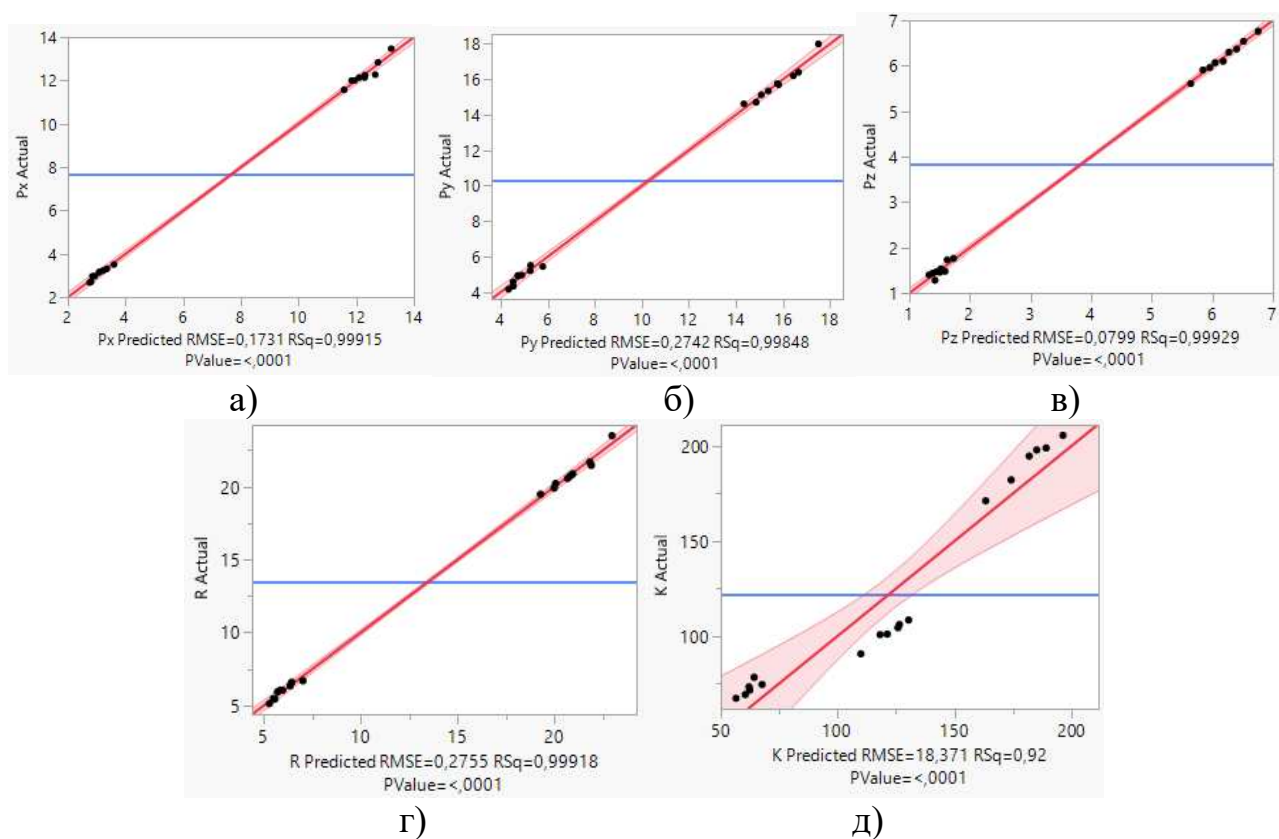


Рис. 4.2 – Залежність експериментальних та прогнозованих значень сил різання при мікрофрезеруванні паза 1 мм: а) Px; б) Py; в) Pz; г) рівнодійна; д) питима

Для фрези $\varnothing 0,5$ мм зі збільшенням глибини різання t від 0,03 до 0,10 мм значення складової сили P_y зростали приблизно від 2 до 7 Н, а рівнодійної сили різання R від 3 до понад 9 Н. Аналогічна тенденція спостерігалася і для фрези $\varnothing 1$ мм, однак абсолютні значення сил були вищими через збільшення площі зрізуваного шару.

Для складової сили P_z при використанні фрези $\varnothing 0,5$ мм спостерігалася більш виражена зміна значень при збільшенні подачі на зуб S_z . У діапазоні подач 0,001–0,003 мм/зуб значення P_z збільшувались більш ніж у 2 рази, що підтверджувало підвищену чутливість осьової складової сили до зміни товщини зрізуваного шару в умовах мікромасштабного різання.

Для питомої сили різання K спостерігалася протилежна закономірність. При збільшенні подачі на зуб S_z від 0,001 до 0,003 мм/зуб значення K зменшувались: для фрези $\varnothing 0,5$ мм - приблизно від 1900 до 700 Н/мм², а для $\varnothing 1$ мм - від 1100 до менш ніж 300 Н/мм². Найбільш інтенсивне зниження K відбувалося у зоні малих подач, де прояв масштабного ефекту був найбільш вираженим.

Для фрези $\varnothing 1$ мм поверхні відгуку характеризувалися більш рівномірною зміною силових параметрів без різких локальних перепадів значень, що свідчило про стабільніший характер процесу мікрофрезерування порівняно з фрезою $\varnothing 0,5$ мм.

4.1.2 Дисперсійно-регресійний аналіз температур стружки

Згідно з отриманими даними (табл.4.7), визначальним фактором була глибина різання t , внесок якої становив 53,827 % для $\varnothing 0,5$ мм та 57,443 % для $\varnothing 1$ мм. Подача на зуб S_z також істотно впливала на температуру, особливо для інструмента $\varnothing 0,5$ мм (22,374 %), тоді як для $\varnothing 1$ мм (6,334 %). Швидкість різання V має помітний вплив на температуру, особливо для інструмента $\varnothing 1$ мм (29,465 %), тоді як для $\varnothing 0,5$ мм він становить 21,396 %.

Таблиця 4.7

Результати дисперсійного аналізу температури стружки для фрези Ø0,5 та 1 мм

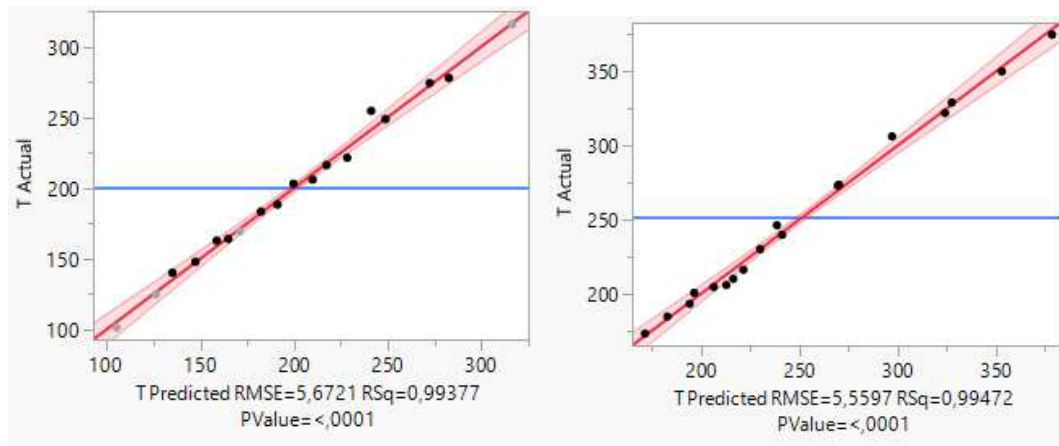
Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
T _{0,5} , °C						
t	30574,523	1	950,3149	<0,0001	30574,523	53,827
S_z	12708,823	1	395,0146	<0,0001	12708,823	22,374
V	12153,331	1	377,7489	<0,0001	12153,331	21,396
$t \times S_z$	953,727	1	29,6437	0,0002	953,727	1,679
$t \times V$	3,979	1	0,1237	0,7317	3,979	0,007
$S_z \times V$	53,354	1	1,6584	0,2243	53,354	0,094
Залишок	353,903	11	-	-	32,17	0,623
Разом	56801,641	17	-	-	-	100,000
T ₁ , °C						
t	37020,112	1	1197,645	<0,0001	37020,112	57,443
S_z	4081,879	1	132,0537	<0,0001	4081,879	6,334
V	18989,381	1	614,3294	<0,0001	18989,381	29,465
$t \times S_z$	864,622	1	27,9716	0,0003	864,622	1,342
$t \times V$	3133,747	1	101,3805	<0,0001	3133,747	4,863
$S_z \times V$	16,445	1	0,5320	0,4810	16,445	0,026
Залишок	340,018	11	-	-	30,9	0,528
Разом	64446,203	17	-	-	-	100,000

На основі даних скінченно-елементного моделювання та дисперсійного аналізу було побудовано багатофакторні лінійні регресійні моделі для опису залежності температури (T) від режимів різання (t , S_z , V) (табл. 2.7):

$$T_{0,5} = -53,07633 + 1177,5397 \cdot t + 32543,333 \cdot S_z + 7,9560417 \cdot V - 4,113095 \cdot t \cdot S_z \quad (4.11)$$

$$T_1 = 1295,7301587 \cdot t + 18443,333333 \cdot S_z + 9,945 \cdot V + 242523,80952 \cdot t \cdot S_z + 115,42857143 \cdot t \cdot V \quad (4.12)$$

Коефіцієнт детермінації отриманої регресійної моделі для температури рис. 4.3 перевищує $R^2 = 0,99$, що свідчить про високу ступінь узгодженості експериментальних даних із результатами регресійного аналізу.



а)

б)

Рис. 4.3 – Залежність між експериментальними та прогнозованими значеннями результуючої температури при мікрофрезеруванні паза: а) 0,5 мм; б) 1 мм

Отримані результати температури стружки будуть застосовані для комплексного аналізу взаємозв'язку між температурою, силами різання та вібраційними характеристиками процесу, що дає змогу більш повно оцінити особливості мікрофрезерування сплаву NiTi при різних режимах обробки.

Після валідації регресійних моделей вплив режимів різання на температуру можна інтерпретувати, як показано на рис. 4.4–4.5.

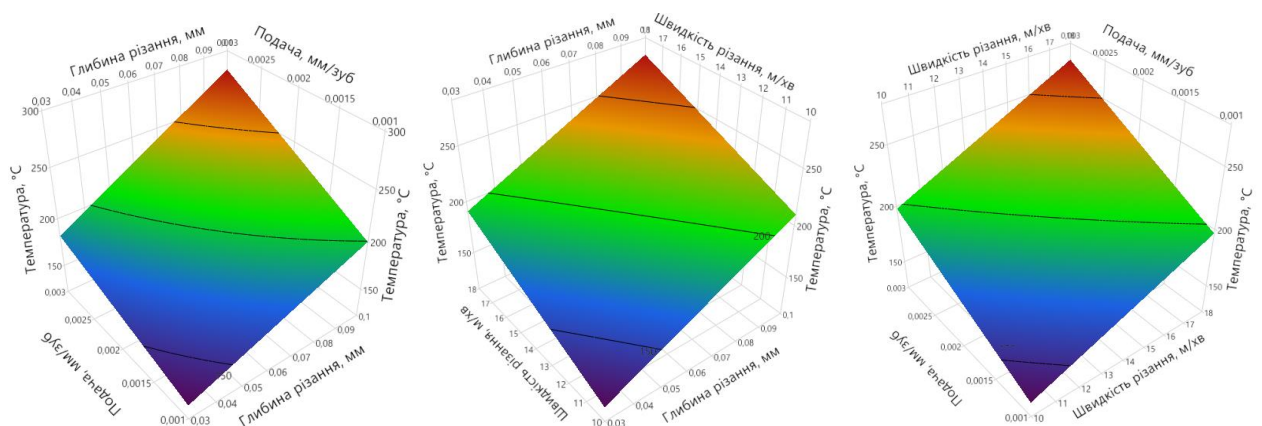


Рис. 4.4 – Залежність температури від режимів різання для 0,5 мм фрези

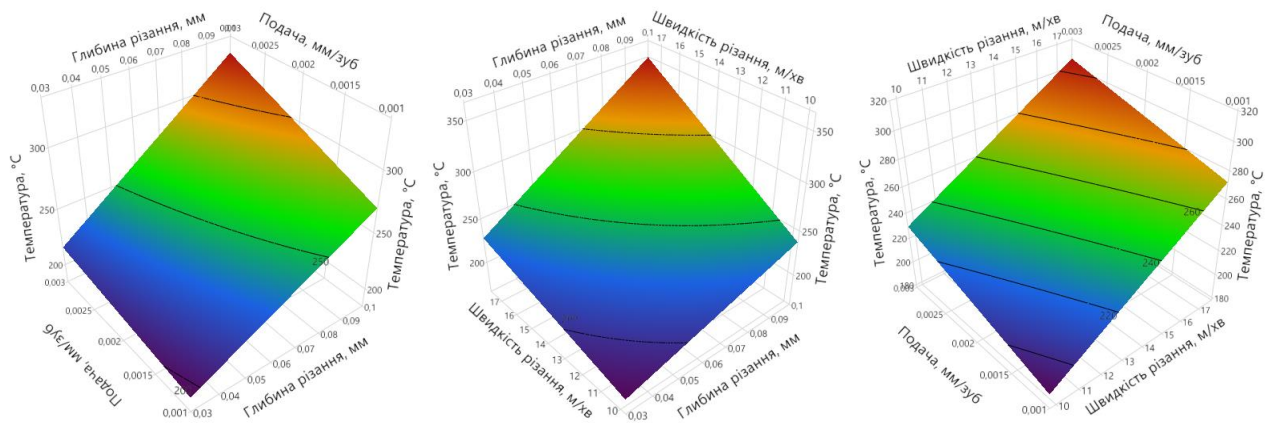


Рис. 4.5 – Залежність температури від режимів різання для 1 мм фрези

Аналіз графіків показав, що найбільш інтенсивне зростання температури спостерігалось зі збільшенням швидкості різання V . Для фрези $\varnothing 0,5$ мм при підвищенні швидкості різання від 10 до 18 м/хв температура зростала приблизно від 80–120 °С до понад 250–300 °С. Аналогічна закономірність спостерігалася і для фрези $\varnothing 1$ мм, де максимальні температури перевищували 350 °С.

Збільшення глибини різання t також призводило до підвищення температури, однак її вплив був менш вираженим порівняно зі швидкістю різання. При переході від $t=0,03$ мм до $t=0,1$ мм спостерігалось поступове зростання температури внаслідок збільшення площі контакту інструмента із матеріалом та інтенсивності пластичного деформування у зоні різання.

Для фрези $\varnothing 0,5$ мм при малих подачах спостерігалися локальні області підвищених температур, що пов'язано з посиленням процесів пластичного витіснення матеріалу та тертя при малих значеннях товщини зрізуваного шару. Зі збільшенням подачі температура змінювалася менш інтенсивно, ніж при зміні швидкості різання.

Для фрези $\varnothing 1$ мм поверхні відгуку мали більш плавний характер зміни температури без різких локальних перепадів. Це свідчило про стабільніші умови тепловиділення в процесі різання внаслідок більшої жорсткості інструмента та збільшення товщини зрізуваного шару.

Отримані залежності показали, що температура стружки при мікрофрезеруванні сплаву NiTi визначалася переважно швидкістю різання та глибиною різання, тоді як вплив подачі на зуб був менш вираженим і суттєво залежав від прояву масштабного ефекту у зоні малих товщин зрізуваного шару.

4.1.3 Дисперсійно-регресійний аналіз вібраційних прискорень

Для встановлення закономірностей впливу режимів різання на вібраційні характеристики процесу мікрофрезерування сплаву NiTi було проведено дисперсійний аналіз (табл. 4.8) середньоквадратичного значення вібраційного прискорення RMS при мікрофрезеруванні сплаву NiTi інструментами діаметром 0,5 мм та 1 мм.

Таблиця 4.8

Результати дисперсійного аналізу вібраційного прискорення для фрези Ø0,5 та 1 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
RMS _{0,5}						
t	0,00023545	1	0,8237	0,3836	0,00023545	1,799
S_z	0,00013002	1	0,4549	0,5140	0,00013002	0,993
V	0,00910803	1	31,8630	0,0001	0,00910803	69,590
$t \times S_z$	0,00033391	1	1,1681	0,3029	0,00033391	2,551
$t \times V$	0,00000507	1	0,0177	0,8965	0,00000507	0,039
$S_z \times V$	0,00013122	1	0,4591	0,5121	0,00013122	1,003
Залишок	0,00314434	11	-	-	0,000286	24,025
Разом	0,01308804	17	-	-	-	100,000
RMS ₁						
t	0,00001644	1	0,0120	0,9147	0,00001644	0,217
S_z	0,00034776	1	1,6398	0,2267	0,00034776	4,585
V	0,00536787	1	18,7697	0,0012	0,00536787	70,780
$t \times S_z$	0,00020667	1	1,0592	0,3255	0,00020667	2,725
$t \times V$	0,00010920	1	0,3513	0,5654	0,00010920	1,440
$S_z \times V$	0,00001012	1	0,0350	0,8549	0,00001012	0,133
Залишок	0,00152585	11	-	-	0,000139	20,120
Разом	0,00758392	17	-	-	-	100,000

На основі дисперсійного аналізу експериментальних даних побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів, яка описує залежність RMS вібраційного прискорення від режимів різання:

$$RMS_{0,5} = 0,0068875 \cdot V \quad (4.13)$$

$$RMS_1 = 0,0052875 \cdot V \quad (4.14)$$

Коефіцієнт детермінації отриманої регресійної моделі рис. 4.6 для $RMS_{0,5}$ становив $R^2 = 0,76$ та $R^2 = 0,8$ для $RMS_{0,5}$, що свідчить про високу ступінь узгодженості експериментальних даних із результатами регресійного аналізу.

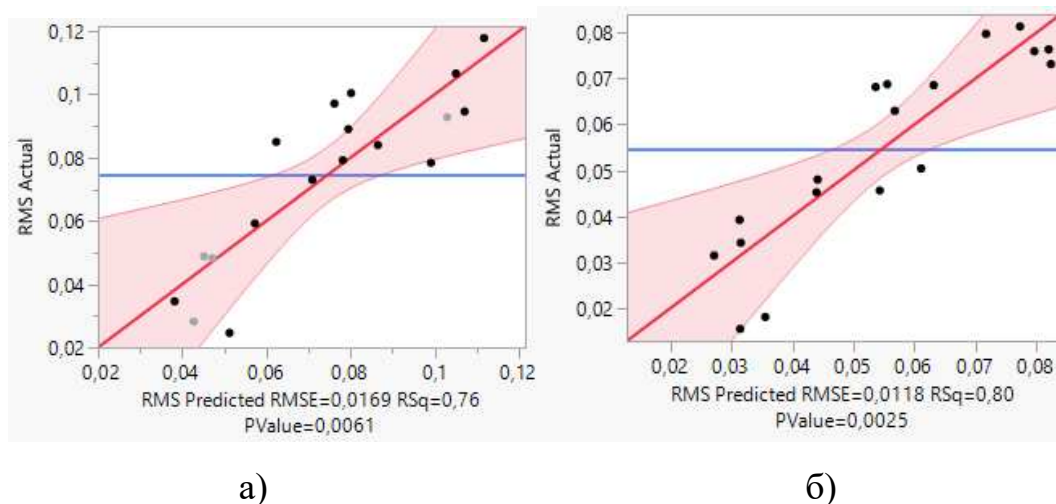


Рис. 4.6 – Залежність між експериментальними та прогнозованими значеннями результуючої RMS при мікрофрезеруванні паза: а) 0,5 мм; б) 1 мм

На рис. 4.7–4.8 наведено поверхні відгуку RMS вібраційного прискорення залежно від режимів різання при мікрофрезеруванні пазів фрезами Ø0,5 мм та Ø1 мм.

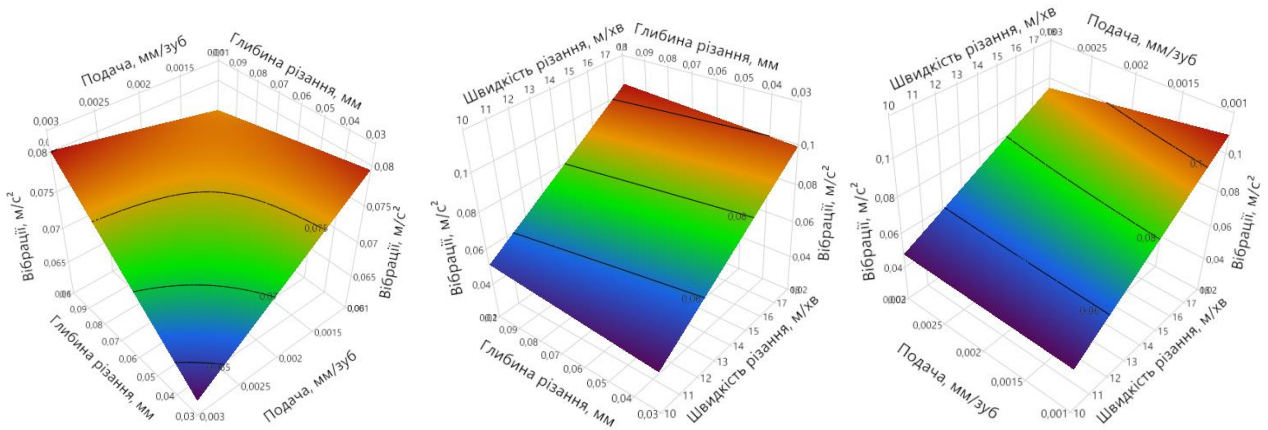


Рис. 4.7 – Залежність RMS вібраційного прискорення від режимів різання при мікрофрезеруванні паза фрезою 0,5 мм

Для фрези $\varnothing 0,5$ мм зі збільшенням швидкості різання та глибини різання спостерігалось формування області підвищених значень RMS у зоні максимальних режимів різання. Це свідчило про зростання динамічної нестабільності процесу внаслідок підвищення силових навантажень та зменшення жорсткості мікрофрези малого діаметра.

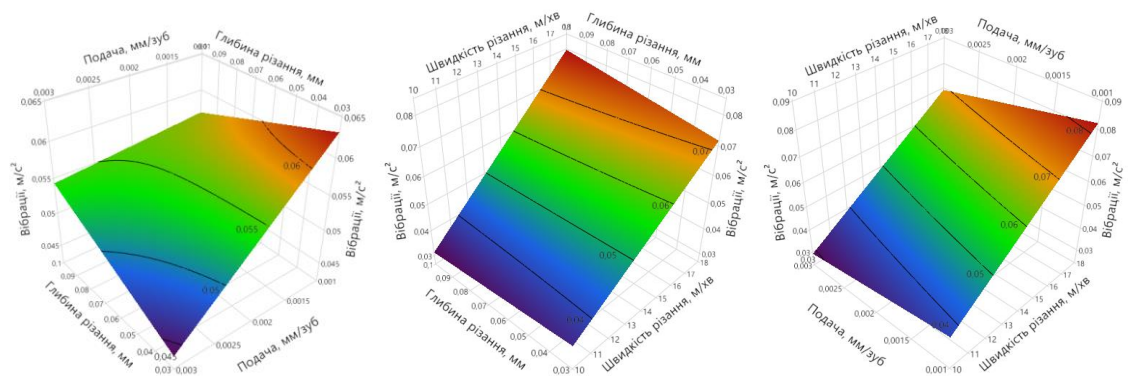


Рис. 4.8 – Залежність RMS вібраційного прискорення від режимів різання при мікрофрезеруванні паза фрезою 1 мм

Для фрези $\varnothing 1$ мм поверхні відгуку RMS мали більш рівномірний характер без різких локальних максимумів, що вказувало на стабільніший процес мікрофрезерування та меншу чутливість системи до зміни режимів різання.

У зоні малих подач на зуб для фрези $\varnothing 0,5$ мм спостерігалось локальне підвищення RMS, що пов'язано з посиленням ефекту пластичного витіснення

матеріалу та нестабільністю формування стружки при співрозмірності товщини зрізаного шару з радіусом заокруглення різальної кромки.

Найбільш інтенсивна зміна RMS спостерігалася при одночасному збільшенні швидкості різання та глибини різання, що підтверджувало підсилення динамічних навантажень у процесі мікрофрезерування сплаву NiTi.

4.1.4 Дисперсійно-регресійний аналіз показників якості пазів

Показники якості пазів у даному дослідженні розглядаються як комплексна характеристика результату процесу мікрофрезерування, що відображає як стан обробленої поверхні, так і точність формоутворення та наявність дефектів кромки. Їх аналіз дозволяє кількісно оцінити вплив режимів різання, силових і вібраційних навантажень, а також прояву масштабного ефекту на формування функціональних властивостей оброблених елементів зі сплаву NiTi.

З урахуванням цього в подальшому розглядаються основні групи показників якості пазів, що включають параметри шорсткості дна пазів, показники геометричної точності та розміри заусенців, які в сукупності визначають придатність отриманих пазів до експлуатаційного застосування.

4.1.4.1 Дисперсійно-регресійний аналіз шорсткості дна пазів

Проведений дисперсійний аналіз (табл. 4.9) дозволив кількісно оцінити вплив режимів різання на шорсткість Ra при мікрофрезеруванні сплаву NiTi інструментами діаметром 0,5 мм та 1 мм.

На основі отриманих даних побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів при мікрофрезеруванні фрезами діаметром 0,5 та 1 мм.

Таблиця 4.9

Результати дисперсійного аналізу шорсткості для фрези Ø0,5 мм та 1 мм.

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
Ra _{0,5}						
<i>t</i>	2,5870542	1	4634,368	<0,0001	2,5870542	84,402
<i>S_z</i>	0,2471070	1	442,6598	<0,0001	0,2471070	8,062
<i>V</i>	0,0806880	1	144,5420	<0,0001	0,0806880	2,632
<i>t</i> × <i>S_z</i>	0,0972000	1	174,1211	<0,0001	0,0972000	3,171
<i>t</i> × <i>V</i>	0,0328653	1	58,8739	<0,0001	0,0328653	1,072
<i>S_z</i> × <i>V</i>	0,0141120	1	25,2798	0,0004	0,0141120	0,460
Залишок	0,0061406	11	-	-	0,000558	0,200
Разом	3,0651671	17	-	-	-	100
Ra ₁ , мкм						
<i>t</i>	0,17424672	1	298,4503	<0,0001	0,17424672	42,154
<i>S_z</i>	0,16993200	1	291,0600	<0,0001	0,16993200	41,110
<i>V</i>	0,04575675	1	78,3723	<0,0001	0,04575675	11,069
<i>t</i> × <i>S_z</i>	0,00374533	1	6,4150	0,0278	0,00374533	0,906
<i>t</i> × <i>V</i>	0,00414408	1	7,0980	0,0220	0,00414408	1,003
<i>S_z</i> × <i>V</i>	0,00911250	1	15,6079	0,0023	0,00911250	2,204
Залишок	0,00642222	11	-	-	0,000584	1,554
Разом	0,41335961	17	-	-	-	100

$$R_{a0,5} = -0,145285714 + 10,831746032 \cdot t + 143,5 \cdot S_z + 0,0205 \cdot V + 2571,4285714 \cdot t \cdot S_z + 0,3738095238 \cdot t \cdot V + 10,5 \cdot V \cdot S_z \quad (4.15)$$

$$R_{a1} = 0,223875 + 2,8111111111 \cdot t + 119 \cdot S_z + 0,0154375 \cdot V + 504,76190476 \cdot t \cdot S_z + 0,1327380952 \cdot t \cdot V + 8,4375 \cdot V \cdot S_z \quad (4.16)$$

На рис. 4.9, а наведено залежність між експериментальними та прогнозованими значеннями шорсткості Ra при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезою діаметром 0,5 мм (рис. 4.9, а), та фрезою діаметром 1 мм (рис. 4.9, б). Для обох випадків моделі демонстрували максимальне значення R^2 більше 0,98, що свідчить про високу ступінь узгодженості експериментальних даних із результатами регресійного аналізу.

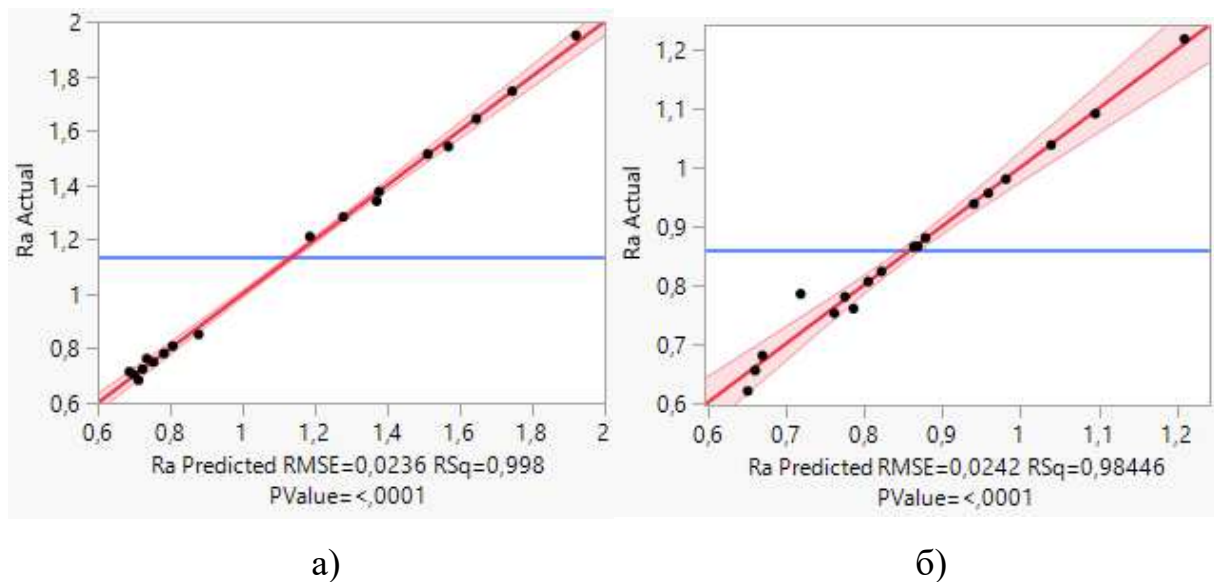


Рис. 4.9 – Експериментальні та прогнозовані значення R_a для фрези:

а) 0,5 мм; б) 1 мм

Проведений дисперсійний аналіз дозволив встановити ступінь впливу режимів різання на параметр шорсткості поверхні R_a при обробці сплаву NiTi. При мікрофрезеруванні фрезою діаметром 1 мм встановлено, що найбільший вплив на формування шорсткості поверхні має глибина t та подача на зуб S_z , внесок якої становить до 42,2%, що свідчить про її значну роль у формуванні мікрорельєфу поверхні. Для фрези діаметром 0,5 мм картина суттєво відрізняється. Основним фактором є виключно глибина різання t (84,4%), що обумовлено значним зростанням деформацій та нестабільності процесу при збільшенні глибини різання. Порівняльний аналіз показує, що зі зменшенням діаметра інструмента суттєво зростає роль глибини різання та взаємодій факторів, що пов'язано з підвищеною чутливістю процесу мікрофрезерування до вібрацій та прогину інструмента. Для інструмента більшого діаметра (1 мм) процес є стабільнішим, а основний вплив зосереджений на подачі, що узгоджується з механізмом формування шорсткості внаслідок траєкторії руху різальної кромки.

На рис. 4.10 та рис. 4.11 наведено поверхні відгуку, що відображають взаємний вплив режимів різання на шорсткість поверхні R_a при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезами діаметром 0,5 мм та 1 мм.

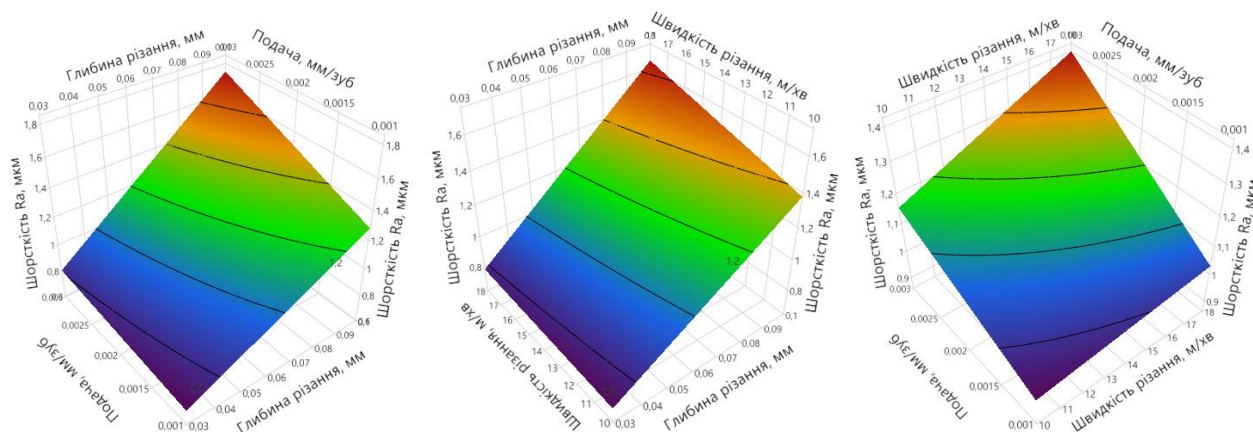


Рис. 4.10 – Графіки залежностей шорсткості R_a від режимів різання для фрези 0,5 мм

Аналіз 3D-залежностей показує різний характер формування поверхні в залежності від діаметра інструмента: для фрези діаметром 1 мм поверхні мають більш плавний характер, що свідчить про стабільність процесу, тоді як для фрези 0,5 мм спостерігаються більш круті градієнти, що вказує на підвищену чутливість до зміни глибини різання.

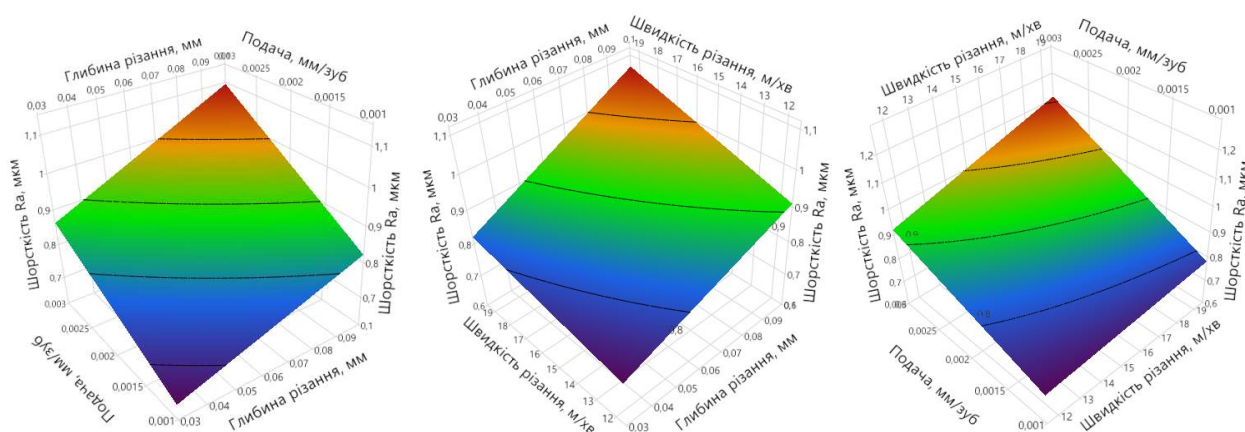


Рис. 4.11 – Графіки залежностей шорсткості R_a від режимів різання для фрези 1 мм

Отримані залежності підтверджують зміну домінуючих факторів при зменшенні діаметра інструмента та відображають нелінійний характер процесу мікрофрезерування.

4.1.4.2 Дисперсійно-регресійний аналіз показників геометричної точності пазів

Проведений дисперсійний аналіз дозволив кількісно оцінити вплив режимів різання на геометричну точність при мікрофрезеруванні сплаву NiTi інструментами діаметром 0,5 мм та 1 мм.

На основі отриманих даних побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів при проведенні експерименту по визначенні параметрів геометричної точності:

Мінімальна ширина паза:

$$b_{min0,5} = 45,08629 - 486,7587 \cdot t + 22560,917 \cdot S_z \quad (4.17)$$

Максимальна ширина паза:

$$b_{max0,5} = 485,91736 + 12523,917 \cdot t \quad (4.18)$$

Дельта ширини паза:

$$\Delta b_{0,5} = 40,831069 + 470,07778 \cdot t - 10037 \cdot S_z \quad (4.19)$$

Мінімальна глибина паза:

$$h_{min0,5} = 1014,4381 \cdot t - 0,479521 \cdot V \quad (4.20)$$

Максимальна глибина паза:

$$h_{max0,5} = 1017,0476 \cdot t - 0,366458 \cdot V \quad (4.21)$$

Дельта глибини паза:

$$\Delta h_{0,5} = 23,244444 \cdot t \quad (4.22)$$

Кут лівої стінки (вихід зуба):

$$\alpha_{L0,5} = 140,01867 - 314,4825 \cdot t - 5648,083 \cdot S_z + 134435,71 \cdot t \cdot S_z \quad (4.23)$$

Кут правої стінки (вхід зуба):

$$\alpha_{R0,5} = 137,89711 - 207,5206 \cdot t \quad (4.24)$$

Радіус лівої частини дна паза:

$$r_{L0,5} = 39,28748 - 5212,25 \cdot S_z + 178902 \cdot t \cdot S_z - 1563 \cdot S_z \cdot V \quad (4.25)$$

Радіус правої частини дна паза:

$$r_{R0,5} = 53,133484 - 8530,5 \cdot S_z - 2899,625 \cdot S_z \cdot V \quad (4.26)$$

Мінімальна ширина паза:

$$b_{min1} = 974,5815 - 1096,406 \cdot t \quad (4.27)$$

Максимальна ширина паза:

$$b_{max1} = 989,93997 - 379,1095 \cdot t \quad (4.28)$$

Дельта ширини паза:

$$\Delta b_1 = 717,29683 \cdot t \quad (4.29)$$

Мінімальна глибина паза:

$$h_{min1} = 1020,92221 \cdot t \quad (4.30)$$

Максимальна глибина паза:

$$h_{max1} = -3,868274 + 1043,5397 \cdot t \quad (4.31)$$

Дельта глибини паза:

$$\Delta h_1 = 22,61746 \cdot t + 0,2143333 \cdot V + 5,7571429 \cdot t \cdot V \quad (4.32)$$

Кут лівої стінки (вихід зуба):

$$\alpha_{L1} = 143,73786 - 216,6762 \cdot t - 4790 \cdot S_z \quad (4.33)$$

Кут правої стінки (вхід зуба):

$$\alpha_{R1} = 163,1059 - 187,5413 \cdot t - 9030,333 \cdot S_z \quad (4.34)$$

Радіус лівої частини дна паза:

$$r_{L1} = 204,42381 \cdot t + 1,78175 \cdot V + 82,890476 \cdot t \cdot V \quad (4.35)$$

Радіус правої частини дна паза:

$$r_{R1} = 239,9 \cdot t + 285240,48 \cdot t \cdot S_z + 64,340476 \cdot t \cdot V \quad (4.36)$$

Коефіцієнт детермінації отриманих регресійних моделей (табл. 4.10) становив більше 0,7, що свідчить про високу ступінь узгодженості експериментальних даних із результатами регресійного аналізу.

Таблиця 4.10

Коефіцієнт детермінації (R^2) для кожної вихідної змінної

Показник	Коефіцієнт детермінації	
	$R^2_{0,5}$	R^2_1
b_{min}	0,78	0,84
b_{max}	0,7	0,72
Δb	0,85	0,84
h_{min}	0,9983	0,99903
h_{max}	0,9975	0,99919
Δh	0,7	0,76
$\alpha_{L0,5}$	0,88	0,73
$\alpha_{R0,5}$	0,71	0,72
$r_{L0,5}$	0,72	0,72
$r_{R0,5}$	0,71	0,7

На рис. 4.12 та рис. 4.13 наведено поверхні відгуку, що відображають взаємний вплив режимів різання на геометрію паза при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезами діаметром 0,5 мм та 1 мм відповідно.

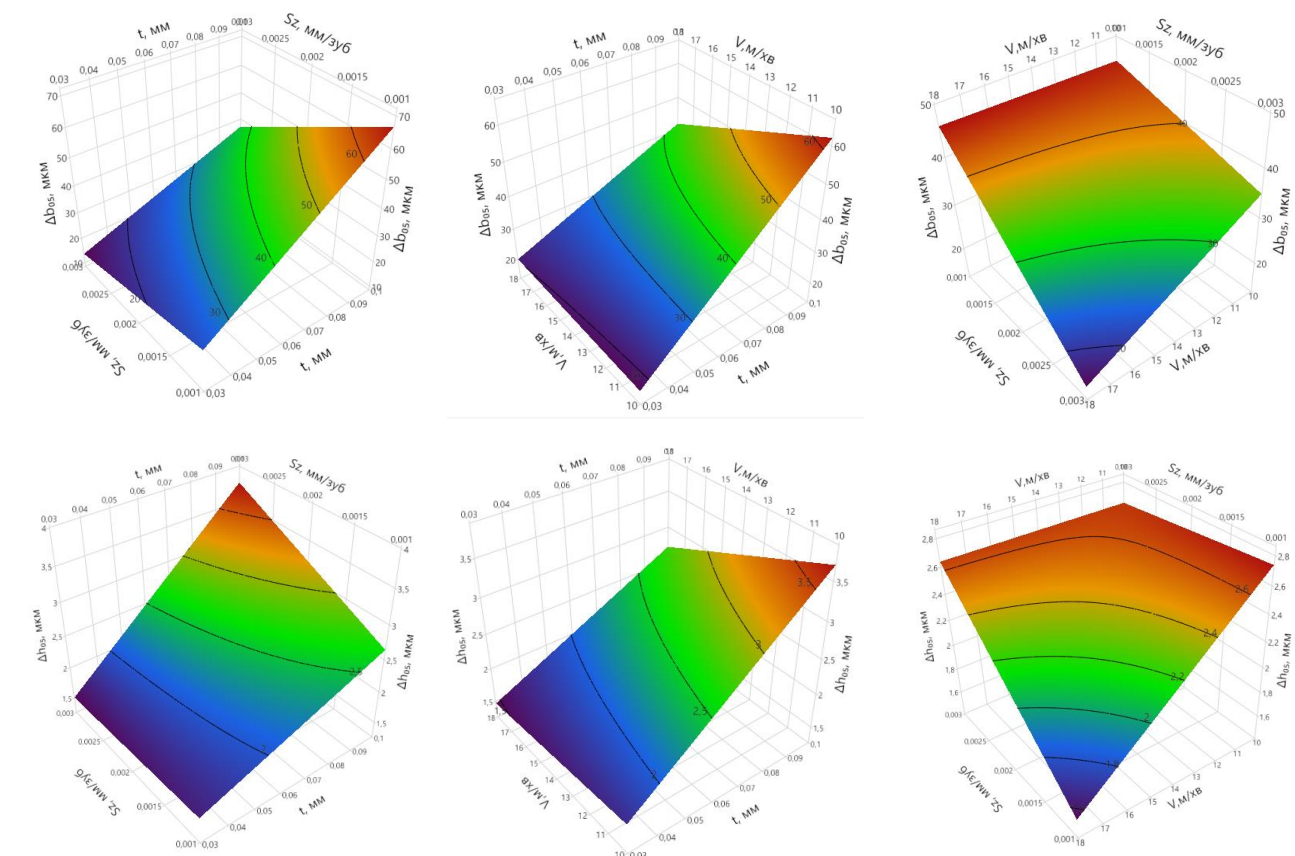


Рис. 4.12 – Графіки залежностей геометрії паза від режимів різання для фрези діаметром 0,5 мм

Для фрези Ø0,5 мм максимальні значення Δb перевищували 60 мкм та спостерігалися при поєднанні високих значень швидкості різання і глибини різання.

Для фрези Ø1 мм значення Δb не перевищували 55 мкм, а зміна параметра мала більш рівномірний характер. Це свідчило про менше пружне відведення інструмента більшого діаметра та вищу стабільність формування геометрії пазу.

Для відхилення глибини пазу Δh найбільші значення спостерігалися при максимальних значеннях глибини різання t . Для фрези Ø0,5 мм значення Δh досягали близько 0,18 мм, тоді як для Ø1 мм – близько 0,15 мм. Збільшення Δh супроводжувалося підвищенням кривизни поверхонь відгуку, що вказувало на нелінійний характер зміни геометрії пазу при зростанні силових навантажень.

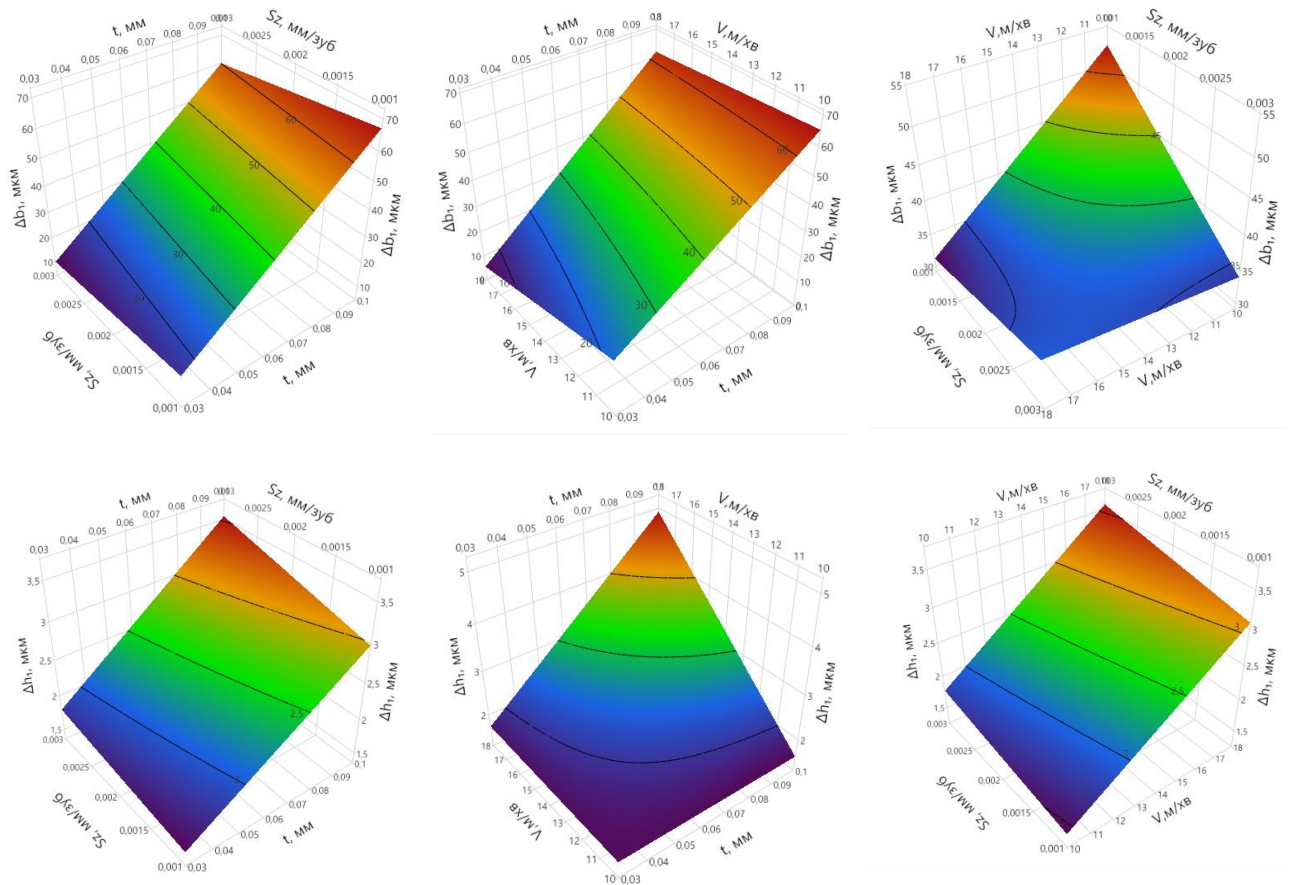


Рис. 4.13 – Графіки залежностей геометрії паза від режимів різання для фрези 1 мм

У зоні малих подач $S_z=0,001$ мм/зуб для фрези $\varnothing 0,5$ мм спостерігалось локальне збільшення Δb та Δh , що пов'язано з нестабільністю стружкоутворення та посиленням ефекту пластичного витіснення матеріалу при малих товщинах зрізаного шару.

Для фрези $\varnothing 0,5$ мм поверхні відгуку характеризувалися більш вираженою нелінійністю та локальними зонами інтенсивної зміни геометричних параметрів, тоді як для $\varnothing 1$ мм поверхні мали більш плавний характер. Це підтверджувало підвищену чутливість процесу мікрофрезерування фрезами малого діаметра до зміни режимів різання та впливу масштабного ефекту.

4.1.4.3 Дисперсійно-регресійний аналіз розмірів заусенців

Проведений дисперсійний аналіз (табл. 4.11-4.12) дозволив кількісно оцінити вплив режимів різання на геометричну точність при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезами діаметром 0,5 мм та 1 мм.

Таблиця 4.11

Результати дисперсійного аналізу розмірів заусенців для фрези діаметром 0,5 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
h_{bL}						
t	2865,523	1	1,8932	0,1962	2865,523	4,657
S_z	7548,528	1	4,9871	0,0473	7548,528	12,268
V	322,010	1	0,2127	0,6536	322,010	0,523
$t \times S_z$	944,495	1	0,6240	0,4463	944,495	1,535
$t \times V$	13130,378	1	8,6749	0,0133	13130,378	21,339
$S_z \times V$	20070,762	1	13,2603	0,0039	20070,762	32,619
Залишок	16649,634	11			1513,6	27,059
Разом	61531,331	17				100,000
b_{bL}						
t	22490,165	1	8,2840	0,0150	22490,165	22,369
S_z	16239,180	1	5,9815	0,0325	16239,180	16,152
V	5824,335	1	2,1453	0,1710	5824,335	5,793
$t \times S_z$	1612,053	1	0,5938	0,4572	1612,053	1,603
$t \times V$	24046,952	1	8,8574	0,0126	24046,952	23,918
$S_z \times V$	462,992	1	0,1705	0,6876	462,992	0,461
Залишок	29863,87	11			2714,9	29,704
Разом	100539,55	17				100,000
h_{bR}						
t	4755,985	1	4,8854	0,0492	4755,985	11,912
S_z	2040,030	1	2,0955	0,1756	2040,030	5,109
V	10352,044	1	10,6337	0,0076	10352,044	25,928
$t \times S_z$	9367,388	1	9,6222	0,0101	9367,388	23,462
$t \times V$	2671,665	1	2,7443	0,1258	2671,665	6,691
$S_z \times V$	30,741	1	0,0316	0,8622	30,741	0,077
Залишок	10708,689	11			973,52	26,821
Разом	39926,541	17				100,000
b_{bR}						
t	23,193	1	0,0242	0,8793	23,193	0,061
S_z	4696,524	1	4,8921	0,0491	4696,524	12,406

Закінчення табл. 4.11

V	873,660	1	0,9100	0,3606	873,660	2,308
$t \times S_z$	16790,581	1	17,4898	0,0015	16790,581	44,352
$t \times V$	721,820	1	0,7519	0,4044	721,820	1,907
$S_z \times V$	4191,617	1	4,3662	0,0607	4191,617	11,072
Залишок	10560,238	11			960,02	27,895
Разом	37857,631	17				100,000

Таблиця 4.12

Результати дисперсійного аналізу розмірів заусенців для фрези діаметром 1 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
h_{bL}						
t	60846,882	1	12,9140	0,0042	60846,882	35,057
S_z	4759,685	1	1,0102	0,3365	4759,685	2,742
V	479,966	1	0,1019	0,7556	479,966	0,277
$t \times S_z$	7585,643	1	1,6100	0,2307	7585,643	4,371
$t \times V$	37972,800	1	8,0593	0,0161	37972,800	21,878
$S_z \times V$	10090,309	1	2,1415	0,1713	10090,309	5,814
Залишок	51828,63	11			4711,7	29,861
Разом	173563,92	17				100,000
b_{bL}						
t	24776,641	1	7,5131	0,0192	24776,641	19,198
S_z	0,727	1	0,0002	0,9884	0,727	0,001
V	15977,438	1	4,8449	0,0500	15977,438	12,380
$t \times S_z$	11398,099	1	3,4563	0,0899	11398,099	8,832
$t \times V$	24605,786	1	7,4613	0,0195	24605,786	19,065
$S_z \times V$	16026,049	1	4,8597	0,0497	16026,049	12,417
Залишок	36275,5	11			3297,8	28,107
Разом	129060,24	17				100,000
h_{bR}						
t	5124,364	1	1,9449	0,1907	5124,364	5,194
S_z	15117,604	1	5,7376	0,0355	15117,604	15,324
V	6884,859	1	2,6130	0,1343	6884,859	6,979
$t \times S_z$	31536,793	1	11,9692	0,0053	31536,793	31,968
$t \times V$	9679,288	1	3,6736	0,0816	9679,288	9,812
$S_z \times V$	1325,996	1	0,5033	0,4928	1325,996	1,344
Залишок	28983,156	11			2634,8	29,379
Разом	98652,060	17				100,000
b_{bR}						
t	38498,223	1	13,6607	0,0035	38498,223	32,075
S_z	89,031	1	0,0316	0,8622	89,031	0,074

Закінчення табл. 4.12

V	10037,322	1	3,5616	0,0858	10037,322	8,363
$t \times Sz$	23036,875	1	8,1744	0,0155	23036,875	19,194
$t \times V$	3695,117	1	1,3112	0,2765	3695,117	3,079
$Sz \times V$	13667,831	1	4,8499	0,0499	13667,831	11,388
Залишок	30999,9	11			2818,2	25,828
Разом	120024,3	17				100,000

Для фрези $\varnothing 0,5$ мм висота лівого верхнього заусенця h_{bL} найбільше залежала від взаємодії подачі на зуб і швидкості різання $Sz \times V$, внесок якої становив 32,619 %, а також взаємодії $t \times V$ - 21,339 %. Окремий вплив подачі на зуб становив 12,268 %. Це свідчило про те, що формування заусенця на стороні входу інструмента визначалося переважно поєднанням теплових явищ та умов відокремлення стружки.

Для ширини лівого верхнього заусенця b_{bL} найбільший вплив мали глибина різання t - 22,369 % та взаємодія $t \times V$ - 23,918 %. Зі збільшенням глибини різання спостерігалось інтенсивніше пластичне витіснення матеріалу у верхню крайку пазу, що супроводжувалося збільшенням ширини заусенця.

Для правого верхнього заусенця h_{bR} визначальним фактором була швидкість різання V , внесок якої становив 25,928 %, тоді як взаємодія $t \times Sz$ становила 23,462 %. Отримані результати показали, що на стороні виходу інструмента суттєво зростав вплив теплового навантаження та нестабільності руйнування матеріалу при виході різальної кромки із зони різання.

Найбільш виражений комбінований вплив факторів спостерігався для ширини правого верхнього заусенця b_{bR} , де внесок взаємодії $t \times Sz$ досягав 44,352 %. Це вказувало на те, що збільшення товщини зрізуваного шару при одночасному підвищенні глибини різання та подачі суттєво змінювало умови пластичного деформування матеріалу у зоні формування крайки пазу.

Для фрези $\varnothing 1$ мм характер впливу факторів був більш рівномірним. Для висоти лівого верхнього заусенця h_{bL} основний вплив мала глибина різання t - 35,057 %, а внесок взаємодії $t \times V$ становив 21,878 %. Це свідчило про

переважний вплив об'єму зрізаного матеріалу та силових навантажень на формування заусенців при використанні жорсткішого інструмента.

Для параметра b_{bL} найбільші внески також мали глибина різання t - 19,198 % та взаємодія $t \times V$ - 19,065 %, тоді як вплив подачі на зуб був практично відсутнім. Це підтверджувало зменшення впливу масштабного ефекту при збільшенні діаметра фрези.

Для правого верхнього заусенця h_{bR} найбільший внесок мала взаємодія $t \times S_z$ - 31,968 %, а для b_{bR} - глибина різання t із внеском 32,075 %. Таким чином, для фрези $\varnothing 1$ мм формування заусенців більшою мірою визначалося силовими навантаженнями та товщиною зрізаного шару, тоді як вплив нестабільності процесу був менш вираженим порівняно з фрезою $\varnothing 0,5$ мм.

На основі отриманих даних побудовано лінійну регресійну модель з урахуванням парних взаємодій факторів при проведенні експерименту по визначенні розмірів заусенців:

Висота заусенця (ліва сторона):

$$h_{bL0,5} = 307,27543 + 225,7494 \cdot t \cdot V + 12387,313 \cdot S_z \cdot V \quad (4.37)$$

Ширина заусенця (ліва сторона):

$$b_{bL0,5} = 221,91334 + 1009,9317 \cdot t - 36786,75 \cdot S_z + 319,7506 \cdot t \cdot V \quad (4.38)$$

Висота заусенця (права сторона):

$$h_{bR0,5} = 223,55397 - 7,004396 \cdot V + 785723,81 \cdot t \cdot S_z \quad (4.39)$$

Ширина заусенця (права сторона):

$$b_{bR0,5} = 166,29876 + 1068745,2 \cdot t \cdot S_z \quad (4.40)$$

Висота заусенця (ліва сторона):

$$h_{bL1} = 1661,173 \cdot t + 401,80714 \cdot t \cdot V \quad (4.41)$$

Ширина заусенця (ліва сторона):

$$b_{bL1} = 415,95651 + 1044,154 \cdot t + 317,49226 \cdot t \cdot V \quad (4.42)$$

Висота заусенця (права сторона):

$$h_{bR1} = 35493,667 \cdot S_z - 1464705 \cdot t \cdot S_z \quad (4.43)$$

Ширина заусенця (права сторона):

$$b_{bR1} = 1329,3238 \cdot t - 1263821 \cdot t \cdot S_z \quad (4.44)$$

Коефіцієнт детермінації отриманих регресійних моделей наведено в табл. 4.13. Отримані результати становили більше 0,7, що свідчило про високу ступінь узгодженості експериментальних даних із результатами регресійного аналізу.

Таблиця 4.13

Коефіцієнт детермінації (R^2) для кожної вихідної змінної

Показник	Коефіцієнт детермінації	
	$R^2_{0,5}$	R^2_1
h_{bL}	0,73	0,7
b_{bL}	0,7	0,72
h_{bR}	0,73	0,71
b_{bR}	0,72	0,74

Отримані результати показали, що при мікрофрезеруванні сплаву NiTi формування заусенців визначалося не лише окремими параметрами режиму різання, а й їх взаємодіями. Для фрези Ø0,5 мм спостерігався більш виражений вплив комбінованих факторів та нестабільності процесу різання, тоді як для Ø1 мм домінуючу роль відігравала глибина різання та пов'язане з нею зростання пластичних деформацій у зоні формування крайок пазу.

4.2. Оптимізація режимів різання для забезпечення якості пазів при мікрофрезеруванні

З огляду на суперечливий характер впливу режимів різання на показники якості пазів та продуктивність процесу, визначення оптимальних режимів мікрофрезерування потребує одночасного врахування декількох критеріїв оптимізації. У зв'язку з цим у роботі виконано декілька варіантів багатокритеріальної оптимізації, що відрізняються складом та пріоритетністю критеріїв. Такий підхід дозволяє оцінити чутливість оптимальних режимів різання до вибору критеріїв оптимізації та встановити області їх оптимальних значень з урахуванням фізичних особливостей процесу мікрофрезерування.

Процес мікрофрезерування сплавів NiTi характеризується складною взаємодією геометричних, силових та термомеханічних факторів, що визначають формування якості пазів. На відміну від традиційного фрезерування, при мікрофрезеруванні суттєвий вплив має масштабний ефект, який змінює механізм стружкоутворення та співвідношення між різанням і пластичним деформуванням матеріалу.

У зв'язку з цим задача оптимізації режимів різання не може розглядатися як однокритеріальна. Збільшення продуктивності процесу за рахунок підвищення подачі або глибини різання супроводжується зростанням сил різання, температури, вібрацій та погіршенням показників якості поверхні. Тому доцільним є застосування багатокритеріального підходу, який дозволяє забезпечити компроміс між продуктивністю та якістю різання.

У даній роботі оптимізація режимів різання здійснюється за такими основними критеріями:

- мінімізація відхилення ширини паза;
- мінімізація відхилення глибини паза;
- мінімізація шорсткості поверхні;
- максимізація продуктивності.

Такий підхід дозволяє комплексно оцінити ефективність процесу мікрофрезерування та сформулювати обґрунтовані оптимізацію щодо вибору режимів різання.

Оцінювання продуктивності процесу мікрофрезерування є необхідною складовою аналізу ефективності формування пазів у виробах зі сплавів NiTi. При цьому підвищення продуктивності не повинно супроводжуватися погіршенням точності пазів та якості обробленої поверхні. Для кількісної оцінки продуктивності застосовується показник швидкості видалення матеріалу.

У проведених дослідженнях при переході від фрези діаметром Ø0,5 мм до Ø1 мм ширина різання збільшується вдвічі, однак одночасно зменшується подача на зуб, що призводить до зниження швидкості подачі. У результаті цього забезпечуються близькі значення швидкості видалення матеріалу для обох діаметрів фрези табл.4.12.

Таблиця 4.14

Показники MRR при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезами діаметром 0,5 та 1 мм

№	Глибина різання t, мм	Подача S _{хв0,5} , мм/хв	Подача S _{хв1} , мм/хв	Швидкість різання V, м/хв	MRR, мм ³ /хв
1	0,03	12,74	6,37	10	0,19
2	0,1				0,64
3	0,03	25,48	12,74		0,38
4	0,1				1,27
5	0,03	38,22	19,11		0,57
6	0,1				1,91
7	0,03	17,834	8,917	14	0,27
8	0,1				0,89
9	0,03	35,67	17,835		0,54
10	0,1				1,78
11	0,03	53,5	26,75		0,80
12	0,1				2,68
13	0,03	22,93	11,465	18	0,34
14	0,1				1,15
15	0,03	45,86	22,93		0,69
16	0,1				2,29
17	0,03	68,79	34,395		1,03
18	0,1				3,44

З урахуванням отриманих результатів встановлено, що оптимальні режими різання повинні забезпечувати умову достатнього значення подачі на зуб, при якій товщина зрізуваного шару перевищує мінімальну товщину стружки, тобто масштабний коефіцієнт знаходиться в області стабільного стружкоутворення. Одночасно необхідно обмежувати глибину різання та швидкість різання з метою зниження вібрацій та температури стружки.

На першому етапі дослідження доцільним є визначення режимів різання, що забезпечують мінімальні значення відхилень геометричних параметрів паза та шорсткості поверхні, без урахування впливу продуктивності процесу. Такий підхід дозволяє встановити граничні можливості забезпечення якості паза при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. Експериментальні дослідження передбачали варіювання основних параметрів процесу різання з одночасним вимірюванням показників якості оброблених пазів, для мінімізації шорсткості поверхні, а також відхилень геометричних параметрів – Δ ширини та глибини пазів.

Для оцінювання статистичної значущості параметрів режиму різання та їх взаємодій на показники якості пазів було проведено дисперсійний аналіз результатів експериментальних досліджень. На рис. 4.14–4.15 наведено результати дисперсійного аналізу значущості факторів та їх взаємодій для показників Δb , Δh та R_a при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезами діаметром 0,5 та 1 мм. Отримані результати дозволили визначити домінуючі фактори впливу на формування якості пазів, оцінити рівень статистичної значущості окремих параметрів процесу та встановити найбільш суттєві взаємодії між режимами різання.

Source	Logworth	PValue
t , мм	15,069	0,0000000000
S_z , мм/зуб	9,508	0,0000000003
t , мм* S_z , мм/зуб	7,361	0,0000000436
V , м/хв	6,943	0,0000001141
t , мм* V , м/хв	5,014	0,0000096927
S_z , мм/зуб* V , м/хв	3,414	0,0003852234

Рис. 4.14 – Результати дисперсійного аналізу значущості факторів та їх взаємодій для показників Δb , Δh та R_a при мікрофрезеруванні сплаву NiTi для фрези діаметром 0,5 мм

Source	Logworth	PValue
t, MM	8,593	0,0000000026
Sz, MM/зуб	8,535	0,0000000029
V, м/хв	5,609	0,0000024624
Sz, MM/зуб * V, м/хв	2,644	0,0022700265
t, MM * V, м/хв	2,007	0,0098381555
t, MM * Sz, MM/зуб	1,555	0,0278349472

Рис. 4.15 – Результати дисперсійного аналізу значущості факторів та їх взаємодій для показників Δb , Δh та R_a при мікрофрезеруванні сплаву NiTi для фрези діаметром 1 мм

За результатами багатокритеріальної оптимізації, виконаної в середовищі JMP, встановлено, що максимальне значення узагальненої бажаності для фрези діаметром 0,5 мм досягається при параметрах режиму різання $t=0,03$ мм, $Sz=0,003$ мм/зуб та $V=10$ м/хв (рис. 4.16, а).

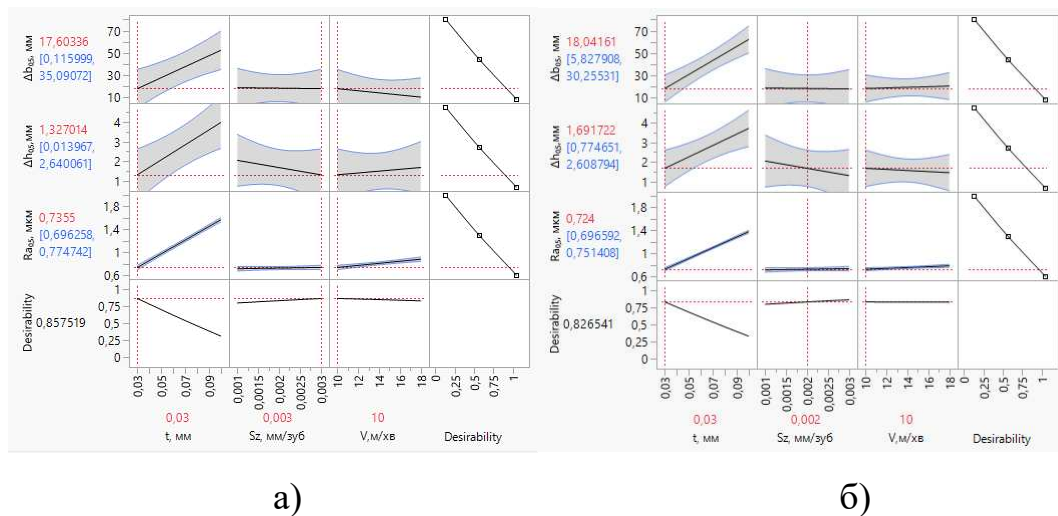


Рис. 4.16 – Оптимізація режимів різання при мікрофрезеруванні фрезою 0,5 мм за узагальненої бажаності: а) максимальна; б) оптимальна

Водночас аналіз експериментальних даних показав, що зміна подачі на зуб у діапазоні від 0,002 до 0,003 мм/зуб призводить до незначного погіршення шорсткості поверхні, різниця між значеннями параметра R_a є незначною та знаходиться в межах експериментального розкиду. З урахуванням цього, а

також необхідності забезпечення більш стабільних умов стружкоутворення та зменшення навантаження на різальний інструмент, як оптимальні режими різання доцільно прийняти параметри $t=0,03$ мм, $S_z=0,002$ мм/зуб та $V=10$ м/хв (рис. 4.16, б).

Для фрези діаметром 1 мм максимальне значення узагальненої бажаності отримано при параметрах $t=0,03$ мм, $S_z=0,001$ мм/зуб та $V=18$ м/хв (рис. 4.17, а). Однак при такому режимі мінімальна подача на зуб може посилювати вплив масштабного ефекту, оскільки товщина зрізуваного шару наближається до мінімальної товщини стружки. Тому як оптимальний режим для фрези $\varnothing 1$ мм доцільно прийняти $t=0,03$ мм, $S_z=0,002$ мм/зуб та $V=10$ м/хв (рис. 4.17, б).

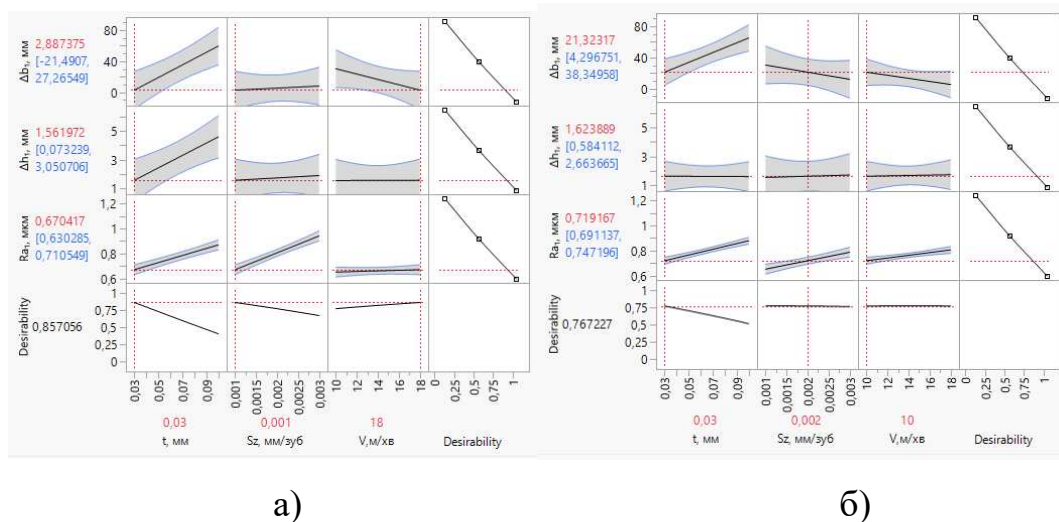


Рис. 4.17 – Оптимізація режимів різання при мікрофрезеруванні фрезою 1 мм за узагальненої бажаності: а) максимальною; б) оптимальною

Результати узагальненої бажаності дозволили визначити математично оптимальні режими для кожного діаметра інструмента, однак кінцевий вибір оптимальних режимів здійснювався з урахуванням фізичних особливостей процесу мікрофрезерування, зокрема масштабного ефекту, стабільності стружкоутворення. Для обох діаметрів фрез як оптимальні прийнято режими $t=0,03$ мм, $S_z=0,002$ мм/зуб та $V=10$ м/хв.

Оптимальні режими різання при мікрофрезеруванні пазів у сплаві NiTi наведено на рис. 4.18 та рис. 4.19 у вигляді графічних залежностей узагальненої бажаності. На рисунку різними кольорами позначено області зміни параметрів

режиму різання, за яких досягається мінімізація відповідних показників якості пазів, зокрема червона лінія відповідає мінімальному значенню відхилення ширини пазу $\Delta b_{\min}$, синя – мінімальному значенню відхилення глибини пазу $\Delta h_{\min}$, зелена – мінімальному значенню шорсткості дна пазу $Ra_{\min}$.

Точка перетину кривих характеризує область оптимального поєднання параметрів режиму різання, при якому забезпечується одночасне покращення декількох показників якості пазів.

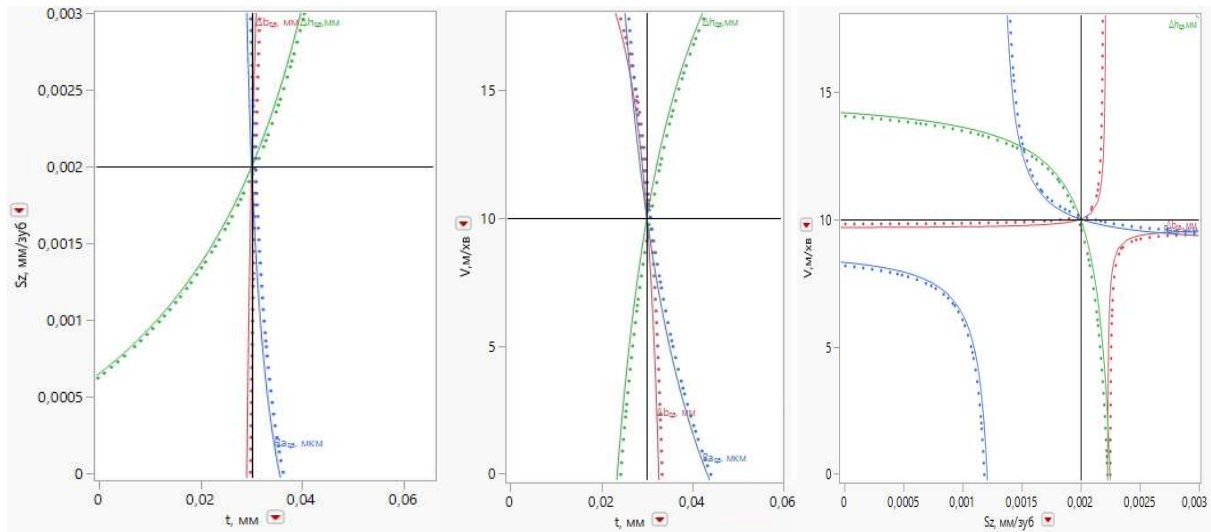


Рис. 4.18 – Візуалізація зон оптимальних параметрів обробки з урахуванням впливу факторів на всі критерії одночасно при мікрофрезеруванні фрезою 0,5 мм

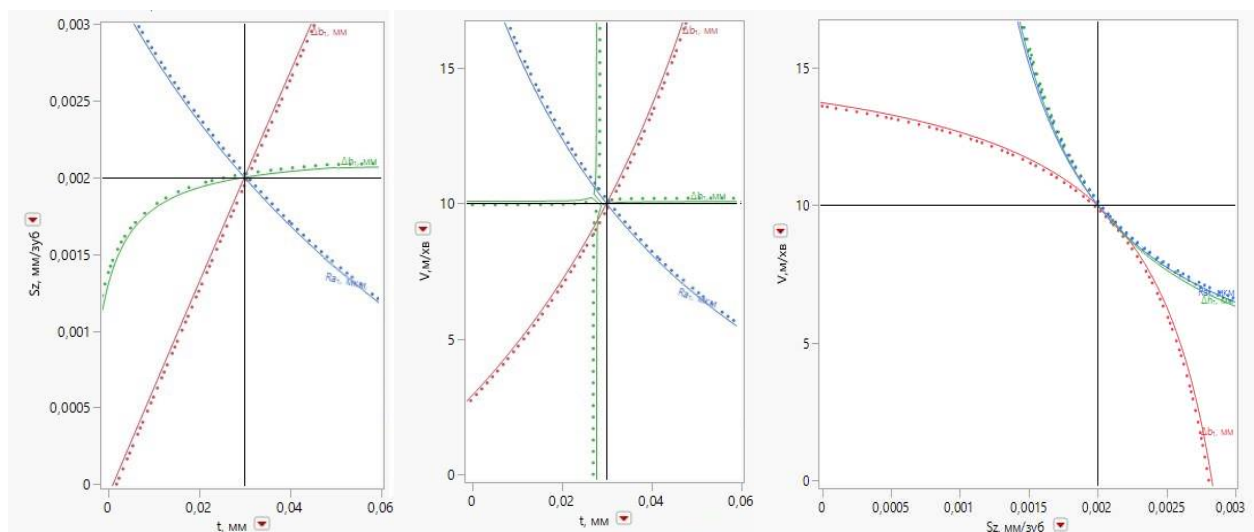


Рис. 4.19 – Візуалізація зон оптимальних параметрів обробки з урахуванням впливу факторів на всі критерії одночасно при мікрофрезеруванні фрезою 1 мм

Параметри, визначені за результатами багатокритеріальної оптимізації, узагальнено у таблиці 4.15. Отримані значення узагальненої бажаності знаходяться в діапазоні, що відповідає області оптимальних режимів різання, за яких досягається збалансоване поєднання показників якості та ефективності процесу, що підтверджує стабільність оптимального рішення в межах досліджуваного діапазону варіювання режимів різання. Встановлено, що для досліджуваних діаметрів інструмента оптимальні режими різання збігаються, що свідчить про стійкість отриманого рішення в межах досліджуваного факторного простору. Водночас відмінності у значеннях показників якості пазів при однакових режимах різання відображають вплив діаметра інструмента, що пов'язано з проявом масштабного ефекту та геометрією різальної кромки.

Таблиця 4.15

Результати багатокритеріальної оптимізації режимів різання при
мікрофрезеруванні сплаву NiTi

Діаметр фрези, мм	t, мм	S_z , мм/зуб	V, м/хв	Δb , мкм	Δh , мкм	Ra, мкм	D
0,5	0,03	0,002	10	18,041	1,691	0,724	0,826
1				21,323	1,623	0,719	0,767

Таким чином, встановлено, що при близьких значеннях узагальненої бажаності перевагу доцільно надавати режимам з меншими значеннями подачі на зуб, що забезпечує підвищення стабільності процесу мікрофрезерування та покращення якості сформованих пазів.

Наступним етапом було проведено оптимізацію режимів різання без урахування параметра шорсткості Ra та з включенням швидкості видалення матеріалу MRR як додаткового критерію продуктивності процесу (рис. 4.20). Це дозволило оцінити компроміс між досягненням високої якості пазів та забезпеченням достатнього рівня продуктивності.

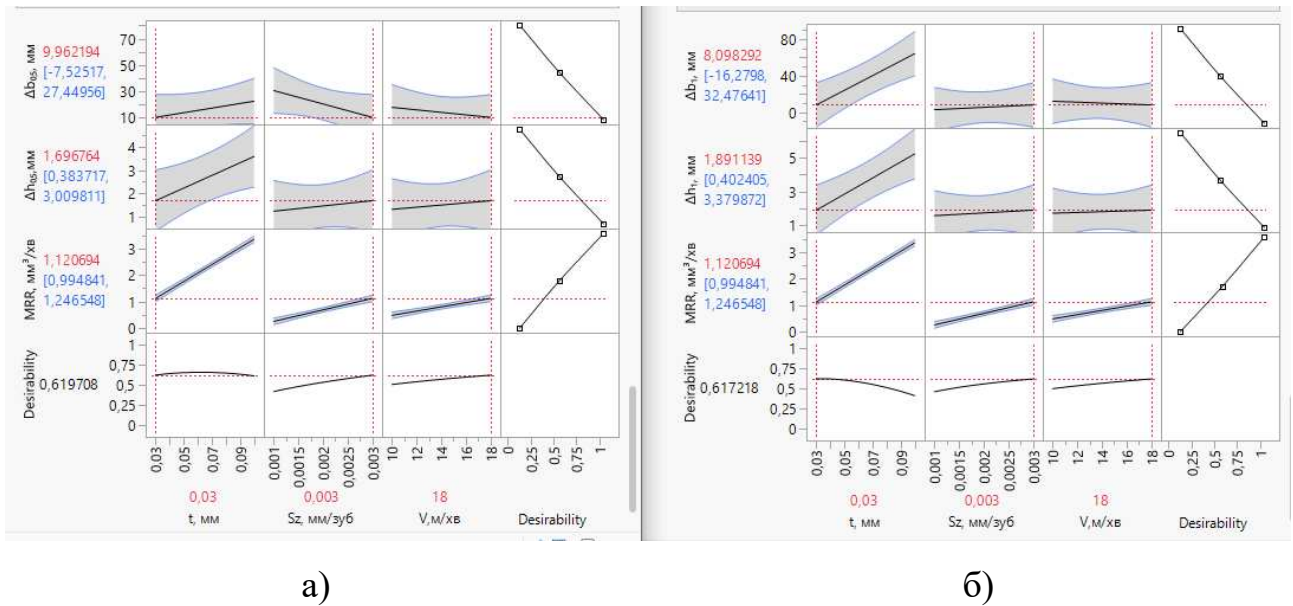


Рис. 4.20 – Оптимізація режимів різання при мікрофрезеруванні фрезою: а) 0,5 мм б) 1 мм

Результати оптимізації режимів різання показали, що при прийнятих критеріях мінімізації відхилення ширини пазу Δb , глибини пазу Δh та максимізації швидкості видалення матеріалу MRR для обох діаметрів фрез оптимальні значення режимів різання співпадають і становлять: $t=0,03$ мм, $S_z=0,003$ мм/зуб та $V=18$ м/хв. При цьому значення узагальненої бажаності для фрез $\varnothing 0,5$ та $\varnothing 1$ мм є близькими і становлять відповідно $D=0,62$ та $D=0,617$.

Отримані результати свідчать про те, що за однакових режимів режиму різання та прийнятих критеріїв оптимізації ефективність застосування фрез різного діаметра є практично однаковою. Це обумовлено тим, що покращення окремих показників якості пазів при застосуванні фрези більшого діаметра компенсується зниженням продуктивності різання, тоді як для фрези меншого діаметра має місце зворотна тенденція.

Окремо було проведено оптимізацію режимів різання із застосуванням узагальненої бажаності, яка дозволила визначити компроміс між суперечливими вимогами до якості (Δb , Δh , R_a) та продуктивності (MRR).

З урахуванням результатів експериментальних досліджень сил різання та вібраційних сигналів встановлено, що збільшення подачі на зуб та швидкості

різання призводить до зростання середньоквадратичних значень вібрацій і амплітуди силових навантажень, що негативно впливає на формування геометричної точності пазів та шорсткість їх поверхні. Особливо чутливим до цих факторів є відхилення ширини паза Δb , що узгоджується з результатами дисперсійного аналізу.

У зв'язку з цим остаточний вибір режимів різання здійснювався не лише за критерієм узагальненої бажаності, а з урахуванням обмеження рівня вібрацій та сил різання, а також мінімізації дефектів поверхні, зокрема утворення заусенців (рис. 4.21).

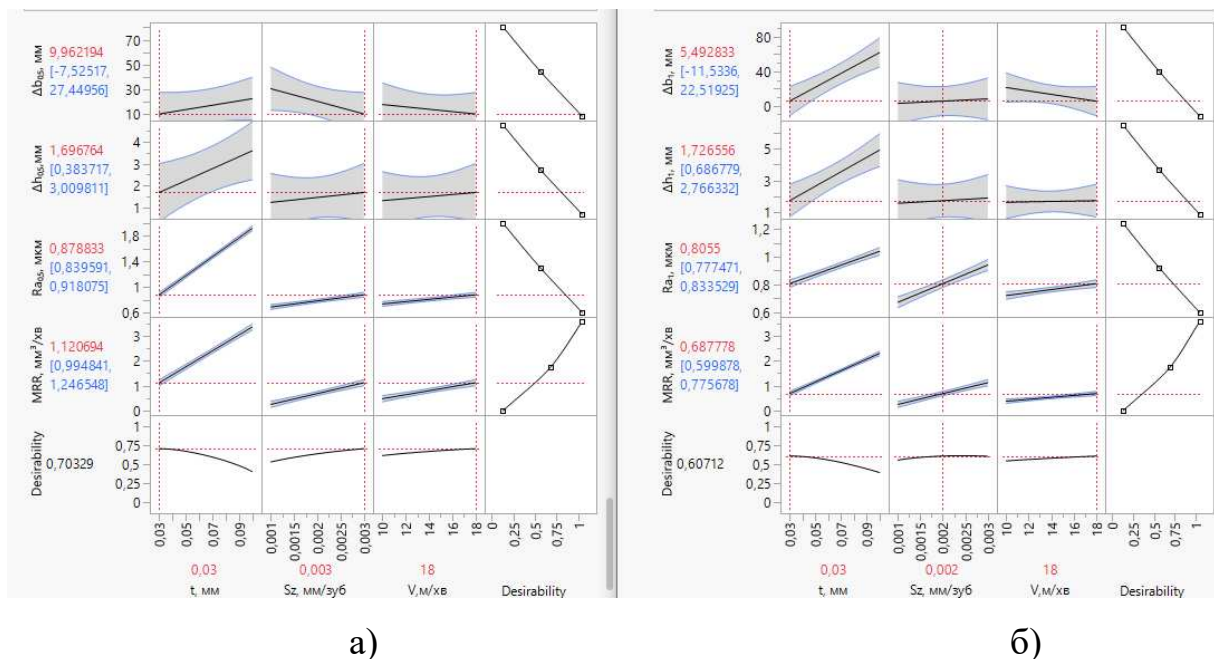


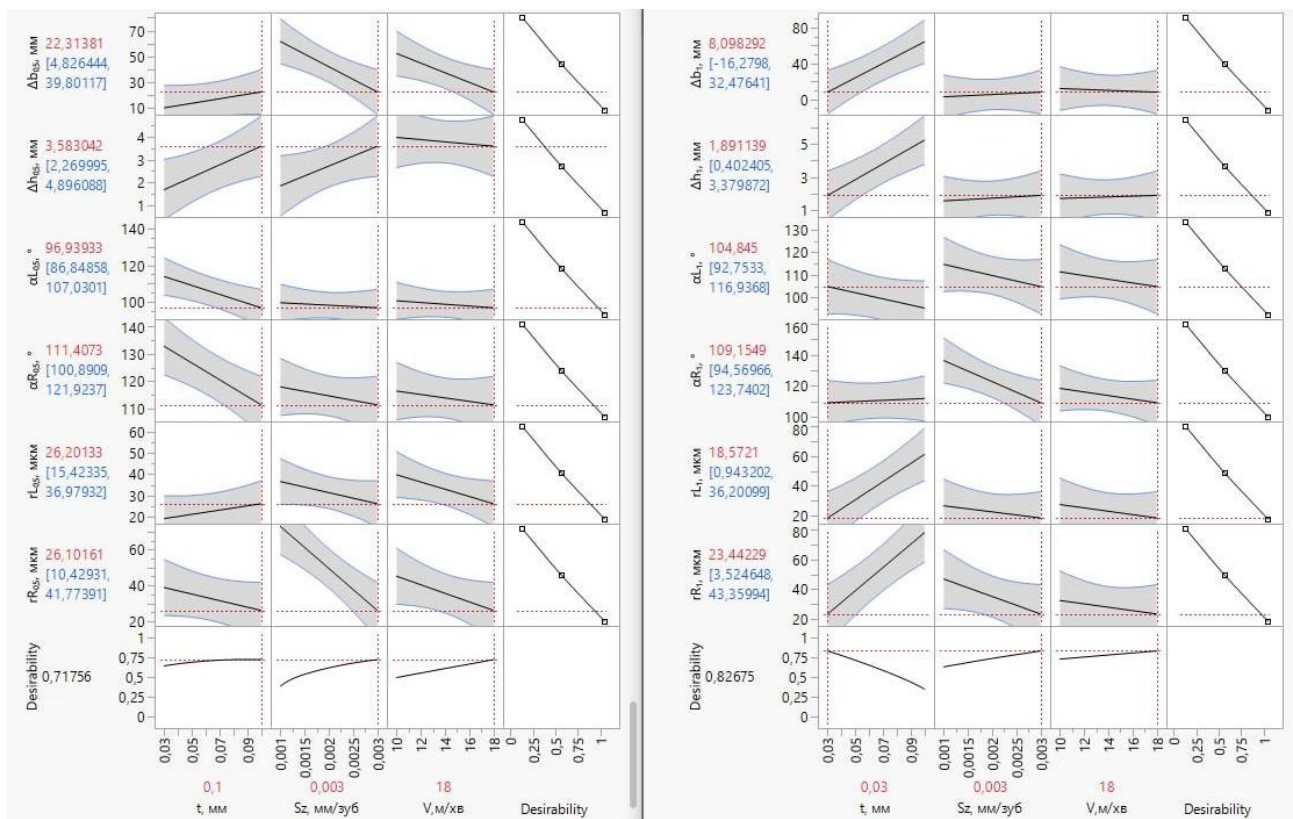
Рис. 4.21 – Оптимізація режимів різання при мікрофрезеруванні фрезою діаметром: а) 0,5 мм б) 1 мм

При використанні фрези діаметром $\varnothing 0,5$ мм (рис. 4.21, а) доцільно прийняти режими різання: $t=0,03$ мм, $S_z=0,003$ мм/зуб та $V=18$ м/хв, що забезпечують високий рівень продуктивності процесу при допустимих значеннях відхилень геометричних параметрів паза, шорсткості поверхні та стабільному характері вібрацій.

Для фрези діаметром $\varnothing 1$ мм, з урахуванням підвищених сил різання та чутливості процесу до вібрацій, оптимальними є режими (рис. 4.21, б): $t=0,03$

мм, $S_z=0,002$ мм/зуб та $V=18$ м/хв, які забезпечують стабілізацію процесу різання та покращення показників якості пазів.

Для визначення оптимальних режимів мікрофрезерування з одночасним урахуванням геометричної точності пазів та параметрів заусенців було проведено багатокритеріальну оптимізацію із використанням узагальненої бажаності. Як критерії оптимізації розглядалися відхилення ширини пазу Δb , відхилення глибини пазу Δh , а також висота та ширина заусенців h_{bL} , b_{bL} , h_{bR} , b_{bR} . На рис. 4.22 наведено результати багатокритеріальної оптимізації процесу мікрофрезерування пазів для фрез діаметром 0,5 мм та 1 мм у вигляді профілів досліджуваних параметрів і функції бажаності залежно від глибини різання t , подачі на зуб S_z та швидкості різання V , що дозволяє визначити оптимальні області зміни факторів та відповідні їм оптимальні режими різання.



a)

b)

Рис. 4.22 – Профілі досліджуваних параметрів та функції бажаності процесу мікрофрезерування залежно від режимів різання для фрез діаметром: а) 0,5 мм

б) 1 мм

За результатами оптимізації встановлено, що для фрези діаметром 0,5 мм максимальне значення узагальненої бажаності ($D = 0,71756$) досягається при режимах $t = 0,1$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб та $V = 18$ м/хв, тоді як для фрези діаметром 1 мм оптимальні параметри відповідають $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб та $V = 18$ м/хв при більш високому значенні $D = 0,82675$. Отримана різниця в оптимальних значеннях, насамперед за глибиною різання, обумовлена сукупною дією масштабного ефекту, жорсткості інструмента та характеру формування стружки.

Для фрези діаметром 0,5 мм (рис. 4.22, а) у досліджуваному діапазоні подач значення незрізаної товщини стружки були співрозмірними з радіусом різальної кромки, що призводило до часткового переходу процесу різання у режим пластичного деформування матеріалу. У таких умовах ускладнювалося стружкоутворення, посилювався вплив тертя та пружного відновлення матеріалу, що супроводжувалося підвищенням чутливості процесу до зміни режимів різання та збільшенням розкиду геометричних параметрів пазу. Збільшення глибини різання до $t=0,1$ мм сприяло стабілізації процесу за рахунок збільшення об'єму зрізу та зменшення відносного впливу радіуса заокруглення різальної кромки.

Для фрези діаметром 1 мм (рис. 4.22, б) при однаковій подачі на зуб фактична товщина зрізаного шару була більшою відносно радіуса різальної кромки, що забезпечувало переважно різальний механізм стружкоутворення без суттєвого впливу пластичного деформування. Крім того, збільшення діаметра фрези супроводжувалося підвищенням жорсткості інструмента та зменшенням його пружних відхилень під дією сил різання, що забезпечувало менші значення Δb та Δh і більш стабільне формування геометрії пазу навіть при менших значеннях глибини різання.

Однакові оптимальні значення подачі на зуб $S_z = 0,003$ мм/зуб та швидкості різання $V = 18$ м/хв для обох інструментів свідчать про те, що саме подача визначає умови формування стружки та ступінь прояву масштабного ефекту, тоді як швидкість різання у досліджуваному діапазоні впливає

переважно на енергетичні параметри процесу та не є обмежуючим фактором з точки зору геометричної точності. Підвищення S_z до граничного значення в межах експерименту забезпечує збільшення товщини зрізу, зменшення питомих сил різання та перехід до стабільного стружкоутворення, що позитивно впливає на всі досліджувані параметри.

Таким чином, більш високий рівень узагальненої бажаності для фрези діаметром 1 мм обумовлений зменшенням впливу масштабного ефекту, підвищенням жорсткості інструмента та більш стабільними умовами стружкоутворення, що забезпечує узгоджене досягнення оптимальних значень геометричних параметрів паза в ширшому діапазоні режимів різання.

Узагальнення результатів оптимізації табл.4.14 показало, що значення режимів різання суттєво залежать від складу критеріїв оптимізації.

Таблиця 4.17

Узагальнені результати оптимізації режимів різання при
мікрофрезеруванні сплаву NiTi

Діаметр фрези, мм	Тип оптимізації	t, мм	S_z , мм/зуб	V, м/хв	D	Отриманий результат
0,5	Δb , Δh , Ra	0,03	0,003	10	0,857	Мінімальні геометричні відхилення та шорсткість при підвищеному впливі масштабного ефекту
1			0,001	18	0,857	Мінімальні геометричні відхилення та шорсткість при стабільнішому стружкоутворенні
0,5	Δb , Δh , MRR	0,03	0,003	18	0,619	Підвищення продуктивності процесу при допустимих геометричних відхиленнях
1					0,617	
0,5	Δb , Δh , Ra, MRR	0,03	0,003	18	0,703	Узгодження показників точності пазу, шорсткості та продуктивності
1			0,002		0,607	Зниження подачі для покращення якості поверхні
0,5	Δb , Δh , a_L , a_R , r_L , r_R	0,1	0,003	18	0,717	Врахування геометрії пазу
1		0,03			0,826	Найбільш узгоджене поєднання геометричної точності пазу

При максимізації узагальненої бажаності визначаються режими, що відповідають граничним значенням режимів різання. Включення показника швидкості видалення матеріалу призводить до зміщення оптимальних режимів у бік підвищення продуктивності. Врахування шорсткості та розширеного комплексу геометричних параметрів паза обумовлює корекцію подачі на зуб і глибини різання.

За результатами проведеної багатокритеріальної оптимізації встановлено, що для фрези $\varnothing 0,5$ мм найбільш оптимальним режимом процесу мікрофрезерування є $t=0,03$ мм, $S_z=0,003$ мм/зуб та $V=10$ м/хв. Даний режим забезпечував максимальне значення узагальненої бажаності $D=0,857$ та характеризувався найбільш узгодженим поєднанням геометричної точності пазу, шорсткості поверхні та стабільності процесу різання. Зниження швидкості різання до 10 м/хв сприяло зменшенню температурних і вібраційних навантажень, а збільшення подачі до $S_z=0,003$ мм/зуб забезпечувало зменшення впливу масштабного ефекту та стабільніше стружкоутворення.

Для фрези $\varnothing 1$ мм оптимальним режимом процесу мікрофрезерування визначено $t=0,03$ мм, $S_z=0,003$ мм/зуб та $V=18$ м/хв, при якому досягалося найбільш узгоджене поєднання геометричної точності пазу та мінімальних параметрів заусенців. Використання фрези більшого діаметра забезпечувало підвищення жорсткості інструмента та зменшення пружних відхилень, що дозволяло застосовувати вищу швидкість різання без суттєвого погіршення стабільності процесу та якості сформованого пазу.

4.3 Рекомендації з призначення режимів різання для підвищення якості пазів

На основі проведених експериментальних досліджень, скінченно-елементного моделювання та дисперсійно-регресійного аналізу встановлено закономірності впливу режимів різання на сили різання, температури,

вібраційні характеристики та показники якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi.

Отримані результати дозволили сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо призначення режимів різання з метою забезпечення високої якості пазів.

Встановлено, що визначальний вплив на формування сил різання має глибина різання t , внесок якої перевищує 95 %, тоді як подача на зуб S_z є основним фактором, що визначає питому силу різання (до 90 %) та безпосередньо пов'язана з проявом масштабного ефекту.

У зв'язку з цим призначення режимів різання повинно здійснюватися з урахуванням умов стійкого стружкоутворення, тобто забезпечення співвідношення між подачею на зуб та радіусом різальної кромки.

З метою мінімізації питомих сил різання та уникнення режиму пластичного витіснення матеріалу рекомендовано призначати подачу на зуб із умови:

$$S_z \geq (0,5 \dots 1) \cdot r_c \quad (4.45)$$

де r_c - радіус різальної кромки.

Виконання цієї умови забезпечує перехід до стабільного стружкоутворення, зниження питомих сил різання та покращення якості обробленої поверхні.

Аналіз температурних залежностей показав, що температура стружки визначається насамперед глибиною різання (53–58 %) та швидкістю різання (до 29 %), що обумовлює необхідність обмеження цих параметрів при мікрофрезеруванні тонкостінних або прецизійних елементів.

Підвищення швидкості різання супроводжується зростанням температури, але водночас сприяє зменшенню сил різання та стабілізації процесу.

Вібраційний аналіз показав, що домінуючим фактором, який визначає рівень RMS вібрацій, є швидкість різання V (до 70 % внеску), що узгоджується з наближенням частоти збудження до власних частот системи.

Тому при призначенні режимів різання необхідно уникати зон резонансних частот та забезпечувати стабільність процесу шляхом оптимального вибору швидкості різання.

З урахуванням отриманих закономірностей сформульовано наступні рекомендації щодо призначення режимів різання.

Для забезпечення мінімальної шорсткості поверхні дна паза доцільно застосовувати підвищені значення подачі на зуб у межах області стійкого стружкоутворення, оскільки надто малі значення S_z призводять до домінування процесів пластичного деформування, зростання R_a та утворення дефектів поверхні.

Для зменшення розмірів заусенців та підвищення геометричної точності пазів рекомендується обмежувати глибину різання t , оскільки її зростання викликає пропорційне збільшення сил різання, що призводить до пружних деформацій системи та погіршення точності формоутворення.

Швидкість різання V доцільно призначати у верхньому діапазоні досліджуваних значень, що забезпечує зниження сил різання та більш стабільний процес, однак з урахуванням обмежень за температурою та вібраціями.

На основі багатокритеріальної оптимізації, яка враховує одночасно показники якості пазів (R_a , Δb , Δh) та швидкість видалення матеріалу, встановлено, що оптимальні режими різання відповідають області компромісу між мінімізацією відхилень та забезпеченням достатньої продуктивності. Такі режими характеризуються значенням узагальненого показника бажаності в межах $D = 0,6-0,8$, що свідчить про їх практичну доцільність та стійкість у межах досліджуваного факторного простору.

Таким чином, призначення режимів різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi повинно здійснюватися з урахуванням комплексного впливу

подачі на зуб, глибини різання та швидкості різання на сили різання, температурні та вібраційні характеристики процесу. Запропоновані рекомендації табл.4.18 дозволяють забезпечити підвищення якості пазів за рахунок зменшення шорсткості, відхилень геометричної точності та розмірів заусенців при збереженні оптимального рівня продуктивності.

Таблиця 4.18

Рекомендації з призначення режимів різання залежно від цільового результату при мікрофрезеруванні пазів у сплавi NiT

Діаметр фрези, мм	Технологічна мета	Критерії оптимізації	t, мм	Sz, мм/зуб	V, м/хв	Отриманий результат
0,5	Якість пазів	Δb , Δh , Ra	0,03	0,003	10	$\Delta b=10,7$ $\Delta h=1,4$ Ra=0,763 мкм
1,0				0,001	18	$\Delta b=12,8$ $\Delta h=1,3$ Ra=0,68 мкм
0,5	Точність пазів	Δb , Δh , a_L , a_R , r_L , r_R	0,1	0,003	18	$\Delta b=33,5$ $\Delta h=0,85$ $a_L=141,8$ мкм $a_R=134,1$ мкм $r_L=61$ мкм $r_R=65,5$ мкм
1,0			0,03			$\Delta b=10,6$ $\Delta h=1,2$ $a_L=93,8$ мкм $a_R=116,7$ мкм $r_L=77,5$ мкм $r_R=74,7$ мкм
0,5	Точність+ продуктивність	Δb , Δh , MRR	0,03	0,003	18	$\Delta b=11,5$ $\Delta h=1,7$ MRR=1,03 мм ³ /хв
1,0						$\Delta b=10,6$ $\Delta h=1,2$ MRR=1,03 мм ³ /хв
0,5	Якість + продуктивність	Δb , Δh , Ra, MRR	0,03	0,003	18	$\Delta b=11,5$ $\Delta h=1,7$ Ra=0,85 мкм MRR=1,03 мм ³ /хв
1,0				0,002		$\Delta b=8,2$ $\Delta h=2,7$ Ra=0,8 мкм MRR=0,69 мм ³ /хв

Таким чином, при забезпеченні якості та точності пазів доцільно застосовувати режими з помірними значеннями подачі на зуб і швидкості різання, тоді як підвищення продуктивності досягається шляхом збільшення S_z і V , що супроводжується зростанням сил різання, температури та вібрацій. Отримані результати підтверджують необхідність вибору режимів різання з урахуванням пріоритетного критерію оптимізації та дозволяють обґрунтовано призначати параметри процесу мікрофрезерування сплаву NiTi залежно від вимог до якості та ефективності різання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4

Виконано дисперсійно-регресійний аналіз для всіх досліджуваних показників процесу мікрофрезерування та побудовано математичні моделі впливу режимів різання на сили різання, температуру, вібрації, шорсткість поверхні, геометричну точність пазів і параметри заусенців.

Встановлено, що глибина різання t є визначальним фактором формування сил різання (внесок понад 95 %), тоді як подача на зуб S_z визначає рівень питомої сили різання (до 90 %), що підтверджує домінуючу роль масштабного ефекту при мікрофрезеруванні сплаву NiTi.

Показано, що температура стружки формується переважно під впливом глибини різання (53–58 %) та швидкості різання (до 29 %), а рівень вібрацій (RMS) визначається швидкістю різання (до 70 %), що обумовлює необхідність комплексного врахування цих параметрів при виборі режимів.

Встановлено, що забезпечення стійкого стружкоутворення та зниження питомих сил різання досягається при подачі на зуб, співрозмірній з радіусом різальної кромки, що дозволяє уникнути режиму пластичного витіснення матеріалу та покращити якість поверхні.

За результатами багатокритеріальної оптимізації визначено, що оптимальні режими різання відповідають області узагальненої бажаності $D =$

0,6–0,8 та забезпечують узгодження показників якості пазів (Δb , Δh , R_a) і швидкості видалення матеріалу.

Встановлено, що режими $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 10$ м/хв для фрези $\varnothing 0,5$ мм та $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв для фрези $\varnothing 1,0$ мм забезпечують оптимальне поєднання показників якості пазів ($R_a = 0,763$ та $0,68$ мкм відповідно, $\Delta b = 10,7$ та $12,8$ мкм, $\Delta h = 1,4$ та $1,3$ мкм). Водночас підвищення продуктивності досягається при режимі $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв, за якого забезпечується оптимальна швидкість видалення матеріалу ($MRR = 1,03$ мм³/хв), проте спостерігається певне погіршення показників якості та геометричної точності пазів.

Розроблено узагальнені рекомендації щодо призначення режимів різання, які враховують взаємозв'язок між силами, температурою, вібраціями та показниками якості пазів і дозволяють обґрунтовано вибирати режими залежно від пріоритетної технологічної мети: якості, точності або продуктивності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальне науково-прикладне завдання технологічного забезпечення якості пазів на поверхнях виробів зі сплаву нікеліду титану при мікрофрезеруванні шляхом встановлення взаємозв'язків між режимами різання, силами різання, температурами, вібраціями, а також показниками якості пазів.

1. На основі аналітичного огляду наукових джерел встановлено, що низька оброблюваність сплавів NiTi при мікрофрезеруванні додатково ускладнюється проявом масштабного ефекту, який зумовлює зміну механізму різання, зростання питомих сил різання та нестабільність процесу обробки. Визначено, що якість пазів, виготовлених фрезеруванням, визначається режимами різання, за рахунок зміни сил та температур різання, а також вібраційних характеристик, що обґрунтовує необхідність комплексного підходу до дослідження та керування процесом мікрофрезерування.

2. На основі розроблених методик з використанням високоточного верстатно-апаратного комплексу реалізовано експериментальні дослідження процесу мікрофрезерування при змінних режимах різання та отримано часові реалізації складових сил різання, вібраційних прискорень, а також показники якості пазів: шорсткість дна паза R_a , розміри заусенців (висота h_b та ширина b_b), геометрична точність паза (ширина b та висота h , відхилення ширини Δb та висоти Δh , лівий та правий радіус заокруглення r_L , r_R та кут нахилу α_L , α_R).

3. Розроблено та експериментально валідовано скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування пазів у сплавах NiTi, яка дозволила визначити силові та температурні характеристики процесу в широкому діапазоні режимів різання. Встановлено, що зі збільшенням подачі на зуб від 0,00002 до 0,02 мм/зуб значення складових сил різання зростають у 3–7 разів залежно від діаметра фрези та глибини різання. Показано, що зі збільшенням масштабного коефіцієнта k_m від 0,002 до 2 питома сила різання зменшується більш ніж у 400 разів – від гіпотетичних 3100 ГПа до 6–10 ГПа. Визначено, що

область $k_m < 0,1$ характеризується домінуванням ефекту пластичного витіснення матеріалу, тоді як при $k_m > 0,5$ забезпечуються умови стабільного стружкоутворення.

4. На основі дисперсійно-регресійного аналізу встановлено, що визначальний вплив на сили різання здійснює глибина різання, внесок якої становить 95–99 %, тоді як на питому силу різання – подача на зуб із внеском 68–90 %. Для температури стружки домінуючим фактором також є глибина різання із внеском 53–57 %, а для вібраційного прискорення – швидкість різання із внеском 70 %. Визначено, що найбільший вплив на шорсткість і геометричну точність пазів має глибина різання, внесок якої становить 42–89 %, тоді як формування заусенців переважно визначається взаємодією режимних параметрів із сумарним внеском 34,5–78,6 %. Розроблено регресійні моделі для прогнозування сил різання, температури стружки, вібраційного прискорення та показників якості пазів, коефіцієнт детермінації R^2 яких складає 0,7–0,99.

5. Здійснено оптимізацію режимів різання при мікрофрезеруванні пазів у сплавах NiTi з метою забезпечення якості пазів для різних комбінацій критеріїв оптимізації, що дозволило розробити рекомендації щодо призначення режимів різання. В якості критеріїв оптимізації виступали: Δb , Δh , R_a , a_L , a_R , r_L , r_R та швидкість видалення матеріалу. Встановлено, що для критеріїв Δb , Δh та R_a максимальне значення інтегрального показника бажаності $D = 0,857$ досягається при режимі різання $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 10$ м/хв для фрези діаметром 0,5 мм та при режимі $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,001$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв для фрези діаметром 1 мм. Для забезпечення геометричної точності пазів (Δb , Δh , α_L , α_R , r_L , r_R) найбільше значення інтегрального показника бажаності становило $D = 0,717$ при режимах різання $t = 0,1$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв для фрези діаметром 0,5 мм та $D = 0,826$, що відповідає режиму $t = 0,03$ мм, $S_z = 0,003$ мм/зуб, $V = 18$ м/хв для фрези діаметром 1 мм.

6. На основі проведеної процедури оптимізації розроблено рекомендації щодо призначення режимів різання для підвищення якості обробки пазів на поверхнях виробів зі сплавів NiTi. Розроблені рекомендації можуть бути

використані при технологічній підготовці виготовлення мікророзмірних конструктивних елементів виробів із сплавів NiTi методом мікрофрезерування.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Kaya, E., & Kaya, İ. (2018). A review on machining of NiTi shape memory alloys: The process and post process perspective. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 100(5–8), 2045–2087. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>
2. Dornfeld, D., Min, S., & Takeuchi, Y. (2006). Recent advances in mechanical micromachining. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 55(2), 745–768. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006>
3. Chae, J., Park, S. S., & Freiheit, T. (2006). Investigation of micro-cutting operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46, 313–332. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.015>
4. Mehrpouya, M., Shahedin, A. M., Dawood, S. D. S., & Ariffin, A. K. (2017). An investigation on the optimum machinability of NiTi based shape memory alloy. *Materials and Manufacturing Processes*, 32(13), 1497–1504. DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279290>
5. Mihálcz, I. (2001). Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 45(1), 75–86.
6. Kahn, H., Huff, M., & Heuer, A. (1998). The TiNi shape-memory alloy and its applications for MEMS. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 8(3), 213–221. DOI: <https://doi.org/10.1088/0960-1317/8/3/007>
7. Zainal, M. A., Sahlan, S., & Ali, M. S. M. (2015). Micromachined shape memory alloy microactuators and their application in biomedical devices. *Micromachines*, 6(7), 879–901. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi6070879>
8. Mohd Jani, J., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M. A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials & Design*, 56, 1078–1113. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>
9. Sadashiva, M., Sheikh, M. Y., Khan, N., Kurbet, R., & Gowda, T. M. D. (2021). A review on application of shape memory alloys. *International Journal*

- of Recent Technology and Engineering, 9(6), 111–120. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.f5438.039621>
10. Patel, S. K., Behera, B., Swain, B., Roshan, R., Sahoo, D., & Behera, A. (2020). A review on NiTi alloys for biomedical applications and their biocompatibility. *Materials Today: Proceedings*, 33, 5548–5551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.03.538>
 11. 100. Kuram, E., & Özçelik, B. (2014). Micro milling. *Materials forming, machining and tribology*, 325–365. Springer. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-45176-8_12
 12. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2023). Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд. *Технічна інженерія*, 2(92), 74–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88)
 13. Weinert, K., & Petzoldt, V. (2008). Machining NiTi micro-parts by micro-milling. *Materials Science and Engineering: A*, 481–482, 672–675. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.220>
 14. Балицька, Н. О. (2025). Технологічні особливості мікрофрезерного текстуровання поверхонь сплаву NiTi. *Технічна інженерія*, 2(96), 3–12. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2025-2\(96\)-3-12](https://doi.org/10.26642/ten-2025-2(96)-3-12)
 15. Балицька, Н. О., & Мельничук, П. П. (2025). Мікрофрезерування як спосіб текстуровання поверхонь сплавів Ni–Ti для модифікації змочуваності. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*, 347(1), 478–485. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-65>
 16. Du, H., Wu, C., Li, D., Yip, W. S., Wang, Z., & To, S. (2023). Feasibility study on ultraprecision micro-milling of the additively manufactured NiTi alloy for generating microstructure arrays. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 55–67. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.214>
 17. Tej, P., & Karali, P. (2018). Direction dependent dynamic wetting of semi-hemispherical end micro-groove textured Ti-6Al-4V surface. *Surface and Coatings Technology*, 356, 138–149. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.037>

18. Jain, A., Kumari, N., Jagadevan, S., & Bajpai, V. (2021). Surface free energy and bacterial attachment on microtextured Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 3968–3975. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05651-1>
19. Балицька, Н. О., & Томашевський, О. О. (2025). Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-4>
20. Балицька, Н. О. (2026). Фазові перетворення у сплавах Ni–Ti при лезовій обробці. *Технічні науки та технології*, 4(42), 43–54. DOI: [https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4\(42\)-43-54](https://doi.org/10.25140/2411-5363-2025-4(42)-43-54)
21. Mwangi, J. W., Nguyen, L. T., Bui, V. D., Berger, T., Zeidler, H., & Schubert, A. (2019). Nitinol manufacturing and micromachining: A review of processes and their suitability in processing medical-grade nitinol. *Journal of Manufacturing Processes*, 38, 355–369. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.01.003>
22. Zainal Abidin, Z., Mativenga, P. T., & Harrison, G. (2019). Chilled air system and size effect in micro-milling of nickel–titanium shape memory alloys. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 7(2), 283–297. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00040-5>
23. Shizuka, H., Sakai, K., Yang, H., Sonoda, K., Nagare, T., Kurebayashi, Y., & Hayakawa, K. (2020). Difficult cutting property of NiTi alloy and its mechanism. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4), 124. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>
24. Kaynak, Y., Manchiraju, S., Jawahir, I. S., & Biermann, D. (2020). Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: Microstructure-based modelling and experimental validation. *CIRP Annals*, 69(1), 85–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>
25. Yang, H., Sakai, K., Shizuka, H., Kurebayashi, Y., Hayakawa, K., & Nagare, T. (2021). Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting

- process of super-elastic NiTi alloy. *International Journal of Automation Technology*, 15(1), 24–33. DOI: <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>
26. Kaynak, Y., Karaca, H. E., Noebe, R. D., & Jawahir, I. S. (2013). Tool-wear analysis in cryogenic machining of NiTi shape memory alloys: A comparison of tool-wear performance with dry and MQL machining. *Wear*, 306(1–2), 51–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2013.05.011>
 27. Aramcharoen, A., & Mativenga, P. T. (2009). Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. *Precision Engineering*, 33(4), 402–407. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2008.11.002>
 28. Kim, C.-J., Mayor, J. R., & Ni, J. (2004). A static model of chip formation in microscale milling. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126(4), 710–718. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1813475>
 29. Ullah, N., Rehan, M., Farooq, M. U., Li, H., Yip, W. S., & To, S. S. (2025). A comprehensive review of micro-milling: Fundamental mechanics, challenges, and future prospective. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-025-15388-z>
 30. Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P., & Dudzinski, D. (2014). Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation. *Precision Engineering*, 38(2), 356–364. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.006>
 31. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2024). Утворення задирок при мікрофрезеруванні нітинолу. У Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки (с. 125–126). Державний університет «Житомирська політехніка». URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/sekcija-6.pdf>.
 32. Aslantaş, K., & Kaynak, Y. (2018). Şekil hafızalı NiTi alaşımının mikro frezelenmesi ve kritik talaş kalınlığının belirlenmesi. *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. DOI: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460515>

33. Balázs, B. Z., Geier, N., Takács, M., & Davim, J. P. (2020). A review on micro-milling: Recent advances and future trends. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 112, 655–684. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06445-w>
34. de Paiva Silva, G., de Oliveira, D., & Malcher, L. (2023). Numerical study of the minimum uncut chip thickness in micro-machining of Inconel 718 based on Johnson-Cook isothermal model. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 127, 2707–2721. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-11573-0>
35. Wan, M., Wen, D., Ma, Y., & Zhang, W. H. (2019). On material separation and cutting force prediction in micro milling through involving the effect of dead metal zone. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 146, 103452. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2019.103452>
36. Jun, M. B. G., Liu, X., DeVor, R. E., & Kapoor, S. G. (2006). Investigation of the dynamics of microend milling–Part I: Model development. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 128(4), 893–900. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2193546>
37. Kuppuswamy, R., & Yui, A. (2017). High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93, 11–21. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7598-9>
38. Zailani, Z. A., & Mativenga, P. T. (2016). Effects of Chilled Air on Machinability of NiTi Shape Memory Alloy. *Procedia CIRP*, 45, 207–210. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.156>
39. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2025). Масштабний ефект при мікрофрезеруванні нітинолів. У Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки (с. 121). Державний університет «Житомирська політехніка». URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/6.pdf>.

40. Balázs, B. Z., & Takács, M. (2020). Experimental investigation and optimisation of the micro milling process of hardened hot-work tool steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(11–12), 5289–5305. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-04991-x>
41. Hascelik, A. (2024). Exploring sustainable micro milling: Investigating size effects on surface roughness for renewable energy potential. *Renewable Energy: Generation and Application*. DOI: <https://doi.org/10.21741/9781644903216-18>
42. Zhang, X., Ehmann, K. F., Yu, T., & Wang, W. (2016). Cutting forces in micro-end-milling processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 107, 21–40. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2016.04.012>
43. Kaynak, Y., Manchiraju, S., & Jawahir, I. S. (2015). Modeling and simulation of machining-induced surface integrity characteristics of NiTi alloy. *Procedia CIRP*, 31, 557–562. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.071>
44. Jin, X., & Altintas, Y. (2013). Chatter stability model of micro-milling with process damping. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 135(3). DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4024038>
45. Ma, L., et al. (2020). Experimental investigation of cutting vibration during micro-end-milling of the straight groove. *Micromachines*, 11(5), 494. DOI: <https://doi.org/10.3390/mi11050494>
46. Li, H., Jing, X., & Wang, J. (2014). Detection and analysis of chatter occurrence in micro-milling process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 228(11), 1359–1371. DOI: <https://doi.org/10.1177/0954405414522216>
47. Kundiya, R., Kadam, M., Jadhav, P., & Pawade, R. (2025). In-situ monitoring of high-speed micro milling of NiTiNol shape memory alloy using acoustic emission analysis. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 18. DOI: <https://doi.org/10.2174/0122127976378857250424043626>

48. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2024). Проблеми скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування. У Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 24-ої Міжнародної науково-технічної конференції (с. 125–127). АТМ України. URL: https://www.atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf
49. Weinert, K., Kahnis, P., Petzoldt, V., & Peters, C. (2005). Micro-milling of steel and NiTi SMA. 55th CIRP General Assembly, STC-C Section Meeting, Antalya, Turkey.
50. Filiz, S., Conley, C. M., Wasserman, M. B., & Ozdoganlar, O. B. (2007). An experimental investigation of micro-machinability of copper 101 using tungsten carbide micro-endmills. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(7–8), 1088–1100. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.09.024>
51. Liu, X., DeVor, R. E., Kapoor, S. G., & Ehmann, K. F. (2004). The mechanics of machining at the microscale. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 126, 666–678. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.1813469>
52. Raja, J., Muralikrishnan, B., & Fu, S. (2002). Recent advances in separation of roughness, waviness and form. *Precision Engineering*, 26, 222–235. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0141-6359\(02\)00103-4](https://doi.org/10.1016/S0141-6359(02)00103-4)
53. International Organization for Standardization. (2017). ISO 1101:2017. Geometrical tolerancing—Tolerances of form, orientation, location and run-out.
54. ДП «УкрНДНЦ». (2018). ДСТУ EN ISO 1101:2018. Геометричні допуски форми, орієнтації, розташування та биття.
55. Zhang, X., Yang, T., & Wang, W. (2016). Chatter stability of micro end milling by considering process nonlinearities and process damping. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 87(9–12), 2785–2796. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-016-8658-5>
56. International Organization for Standardization. (2012). ISO 4287:2012. Geometrical product specifications (GPS)—Surface texture: Profile method.

57. International Organization for Standardization. (1996). ISO 4288:1996. Surface texture—Profile method—Rules and procedures for the assessment.
58. Dutta, S., Sarma, D. K., Vora, J., Chaudhari, R., Bhowmik, A., Samal, P., & Khanna, S. (2025). A State-of-the-Art Review on Micro-Machining of Nitinol Shape Memory Alloys and Optimization of Process Variables Considering the Future Trends of Research. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 9(6), 183. DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp9060183>
59. Hashimura, M., Hassamontr, J., & Dornfeld, D. A. (1999). Effect of in-plane exit angle and rake angles on burr height and thickness in face milling operation. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 121(1), 13–19. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2830566>
60. Olvera, O., & Barrow, G. (1996). An experimental study of burr formation in square shoulder face milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(9), 1005–1020. DOI: [https://doi.org/10.1016/0890-6955\(96\)00014-4](https://doi.org/10.1016/0890-6955(96)00014-4)
61. De Chiffre, L., Kunzmann, H., Peggs, G. N., & Lucca, D. A. (2003). Surfaces in precision engineering, microengineering and nanotechnology. *CIRP Annals*, 52(2), 561–577. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)60204-2](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60204-2)
62. KEYENCE. Wide-area optical profiler VR-6000 series. URL: <https://www.keyence.com/products/3d-measure/roughness-measure/vr-6000/>
63. International Organization for Standardization. (2015). ISO 16610-1:2015. Filtration of surface texture data.
64. Mathia, T. G., Pawlus, P., & Wiczorowski, M. (2011). Recent trends in surface metrology. *Wear*, 271(3–4), 494–508. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2010.06.001>
65. Gillespie, L. K. (1999). Deburring and edge finishing handbook. SME.
66. International Organization for Standardization. (2017). ISO 13715:2017. Technical product documentation—Edges of undefined shape.

67. Aurich, J. C., Dornfeld, D., Arrazola, P., et al. (2009). Burrs—Analysis, control and removal. *CIRP Annals*, 58(2), 519–542. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.09.004>
68. dos Santos Lopes, J., Câmara, P. B., Davis, R., Araujo, C. J. d., Silva, M. B. d., & Machado, Á. R. (2025). Insights into the fabrication of microchannels on biomedical NiTi₆₀. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 56, 106–118. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2024.12.003>
69. Balytska, N. O., Tomashevskiy, O. O., & Shadura, V. A. (2025). Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling. *Journal of Engineering Sciences*, 12(1), A20–A27. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3)
70. Guo, Y., Klink, A., Fu, C., & Snyder, J. (2013). Machinability and surface integrity of Nitinol shape memory alloy. *CIRP Annals*, 62(1), 83–86. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.004>
71. Kundiya, R. R., Kadam, M., Jadhav, P., & Pawade, R. (2024). A review on high speed micro-milling of shape memory alloy (NiTi₆₀): process and post perspective. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJIDeM)*. 19. 2337-2353. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12008-024-02153-x>
72. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2023). Механізм стружкоутворення при мікрофрезеруванні. У Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (с. 104–105). Державний університет «Житомирська політехніка». URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>.
73. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2025). Питомі сили різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. У Матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю «Процеси механічної обробки, верстати та інструмент» (с. 128–129). Державний університет «Житомирська політехніка». URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/128-1.pdf>.

74. Томашевський, О. О. (2026). Вібрації при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. У Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: Матеріали 26-го Міжнародного науково-технічного семінару (с. 129–131). АТМ України. URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/s1-26c.pdf>.
75. Томашевський, О. О., & Оліщук, Н. О. (2026). Фактори, що впливають на якість пазів при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. У Тези доповідей Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки (с. 125–126). Державний університет «Житомирська політехніка». URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2026/06/sekcija-6.pdf>.
76. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2025). Особливості процесу мікрофрезерування. У Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: Матеріали 25-го Міжнародного науково-технічного семінару (с. 158–160). АТМ України. URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-25s.pdf>.
77. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2025). Сили і температури різання при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплаву NiTi. У Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції «Інженерія поверхні та реновація виробів» (с. 102–104). АТМ України. URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-25zb.pdf>.
78. Hoffmann Group. URL: <https://surli.cc/irpcr>
79. DMG MORI. DMU 80 eVo / DMU 80 eVo linear. URL: <https://en.dmgmori.com/products/machines/milling/5-axis-milling/evo/dmu-80-fd-evo>
80. Haas Automation. VF-2SSYT: Вертикальний високошвидкісний оброблювальний центр з ЧПК. URL: <https://www.haascnc.com/uk/machines/vertical-mills/vf-series/models/small/vf-2ssyt.html>

81. Томашевський, О. О., Балицька, Н. О., & Прилипко, О. І. (2024). Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу. Технічна інженерія, 1(93), 81–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88).
82. Kistler. (2024). Multicomponent dynamometer, Type 9257B. Kistler Group. URL: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-151e.pdf
83. Kistler. (2016). Multichannel charge amplifier for multicomponent force measurement, Type 5070A. Kistler Group. URL: https://kistler.cdn.celum.cloud/SAPCommerce_Download_original/000-485e.pdf
84. Goldammer GmbH. USB Basic/Sim BNC opto (G0S-1034-4): Multifunction USB data acquisition card. Goldammer GmbH. URL: <https://goldammer.de/eng/usb-basic-serie/>
85. Томашевський, О. О. (2026). Експериментальна оцінка вібрацій у процесі мікрофрезерування титанового сплаву. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 649–657. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-85>
86. Metrolog. Віброперетворювач ДН-3. Metrolog. URL: https://metrolog.com.ua/ua/product/preobrazovatel_dn3
87. Balytska, N. O. (2022). Features of face milling of Ni–Ti alloys with shape memory effect. Technical Engineering, 2(90), 3–12. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-3-12](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-3-12)
88. Dubnitskiy, V., Kobylin, A., Kobylin, O., Kushneruk, Y., & Khodyrev, A. (2023). Calculation of Harrington function (desirability function) values under interval determination of its arguments. Advanced Information Systems, 7(1), 71–81. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.1.12>

ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Довідка про впровадження результатів наукового дослідження на підприємстві

Підприємство з іноземними інвестиціями
Товариство з обмеженою відповідальністю
12402 вул. Садова, 4 с. Оліївка, Житомирський р-н,
Житомирська обл.
тел./факс +38 0412 433-386



Enterprise with foreign investments
Limited liability company
12402 Sadova Str. 4
Zhytomyr distr., Zhytomyr reg.
Tel./fax +38 0412 433-386

UA41305299000026009026401784 в АТ КБ "ПриватБанк", МФО 305299, код ЄДРПОУ 31603510

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукового дослідження
ТОМАШЕВСЬКОГО Олега Олеговича

Дана довідка засвідчує, що результати дисертаційного дослідження ТОМАШЕВСЬКОГО О.О. на тему: «Технологічне забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні» використовуються в діяльності ПП ТОВ «Даніко» при технологічній підготовці виготовлення металообробного обладнання.

Запропоновані рекомендації дисертаційного дослідження ТОМАШЕВСЬКОГО О.О. щодо призначення оптимальних режимів різання можуть бути використані для вдосконалення технологічних процесів мікрофрезерування.

Довідка не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Головний
інженер-конструктор



Андрій ГОЛУБОВСЬКИЙ

ДОВІДКА

про впровадження результатів наукового дослідження ТОМАШЕВСЬКОГО Олега Олеговича

Результати дисертаційного дослідження, присвяченого забезпеченню якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні, впроваджені в діяльність ТОВ «СОФ-Орто» при розробленні та вдосконаленні технологічних процесів виготовлення протезно-ортопедичних виробів.

Практичне значення для підприємства мають результати досліджень, пов'язані з оцінюванням впливу параметрів механічної обробки на якість поверхонь та формуванням рекомендацій щодо підвищення ефективності високоточної обробки матеріалів медичного призначення.

Акт не є підставою до взаємних фінансових розрахунків.

Директор ТОВ «СОФ-Орто»



Григорій БОНДАРЕНКО

ДОДАТОК Б

**Довідка про впровадження результатів в освітній процес Державного
університету «Житомирська політехніка»**



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
 Ministry of Education and Science of Ukraine, Zhytomyr Polytechnic State University

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005
 103, Chudnivska Str., Zhytomyr, Ukraine, 10005
 Phone/fax: (0412) 24-14-22, 24-14-23, e-mail: rector@ztu.edu.ua, https://ztu.edu.ua, код ЄДРПОУ 05407870

СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ВІДПОВІДАЄ ДСТУ ISO 9001:2015
QUALITY MANAGEMENT SYSTEM ISO 9001:2015

Від 12.05.2026 № 44-01.00/734
 На № _____ від _____

ДОВІДКА

**про впровадження результатів наукового дослідження Томашевського Олега
Олеговича в сфері механічної обробки матеріалів у машинобудуванні в
освітній процес Державного університету «Житомирська політехніка»**

Засвідчую, що результати дисертаційного дослідження Томашевського О.О. на тему: «Технологічне забезпечення якості паців на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні» використовуються в освітньому процесі Державного університету «Житомирська політехніка» при підготовці здобувачів освітніх ступенів «бакалавр» та «магістр» за спеціальностями G9 «Прикладна механіка» та G11.01 «Машинобудування (Верстати та інструменти)».

Результати дослідження впроваджені в структуру та зміст навчальних дисциплін «Теорія різання», «Прогресивні процеси обробки матеріалів» та «Робочі процеси високих технологій».

Матеріали дисертаційного дослідження використовуються при вивченні питань мікрофрезерування, забезпечення якості оброблених поверхонь та особливостей механічної обробки сплавів з ефектом пам'яті форми.

Отримані результати сприяють удосконаленню освітнього процесу та підвищенню якості підготовки фахівців машинобудівного профілю.

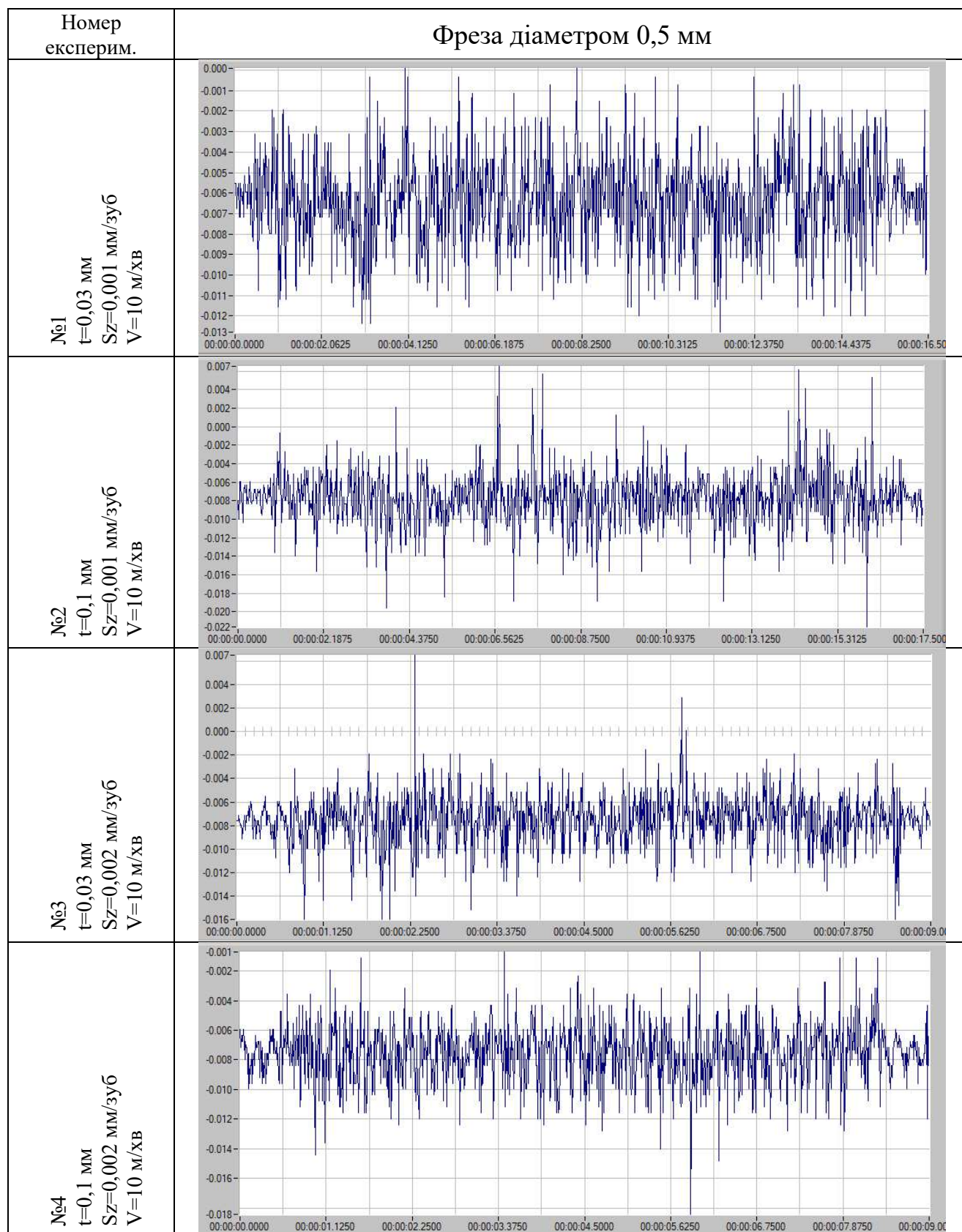
Довідка видана для представлення до Спеціалізованої вченої ради.

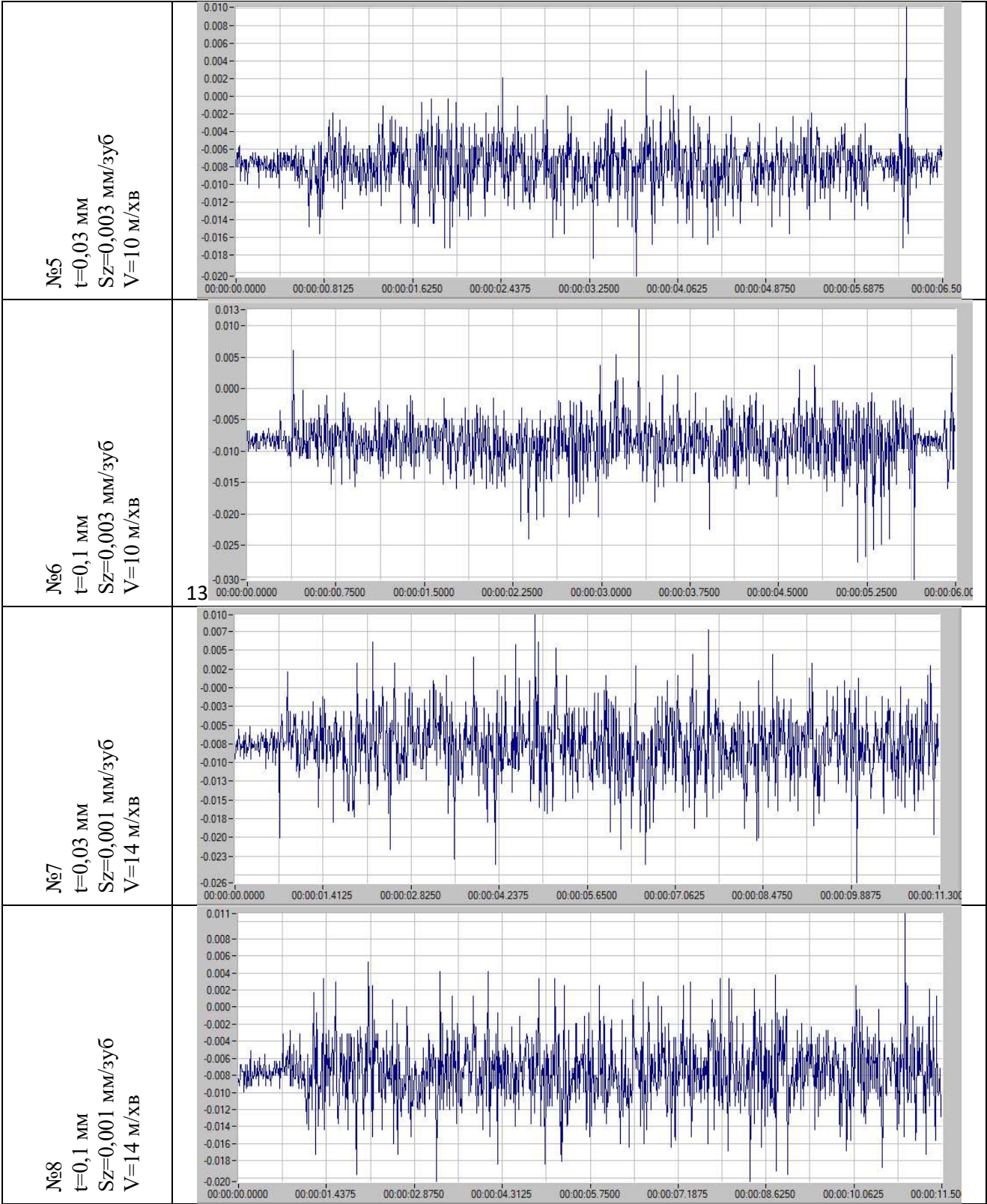
Т.в.о. ректора

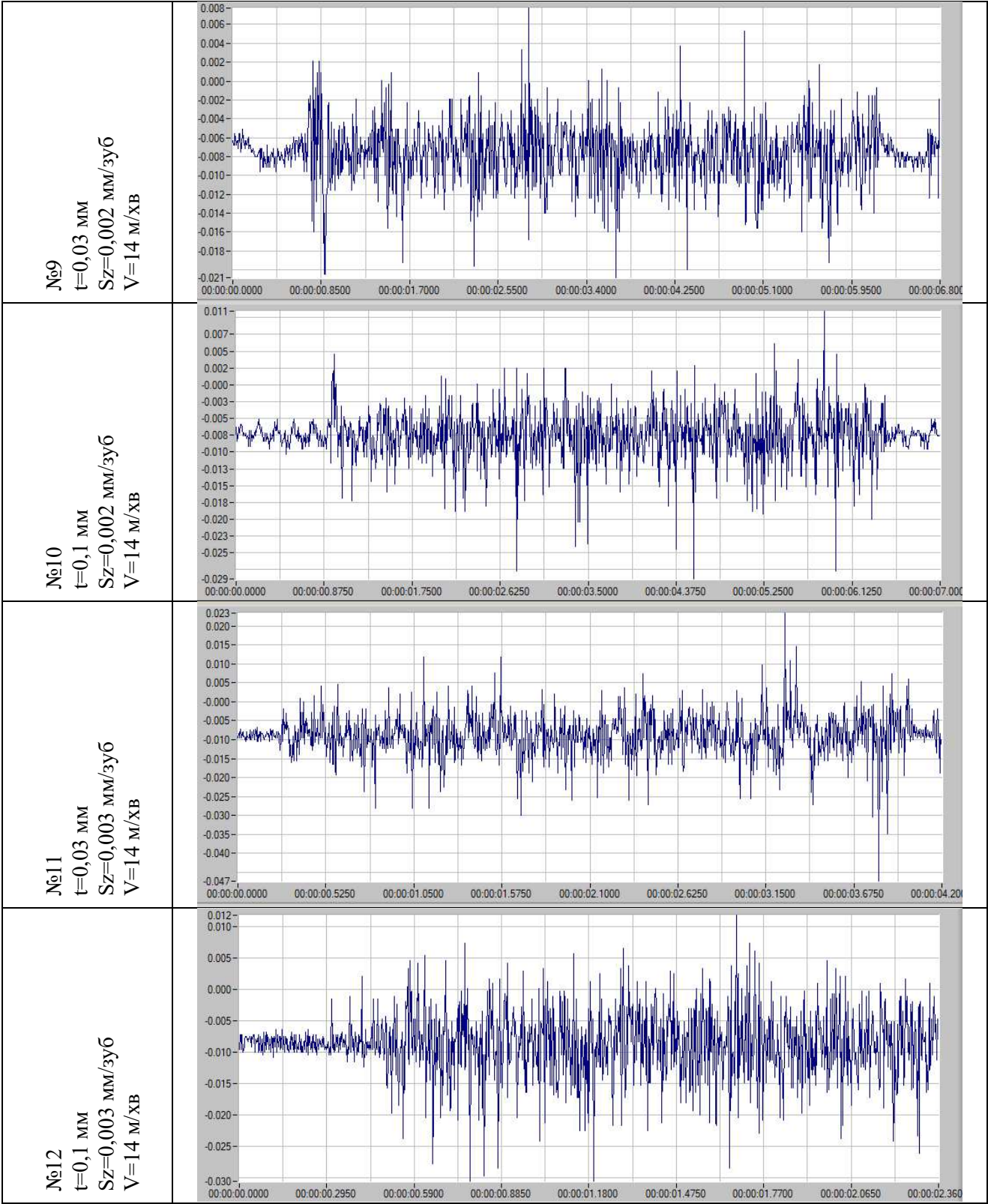


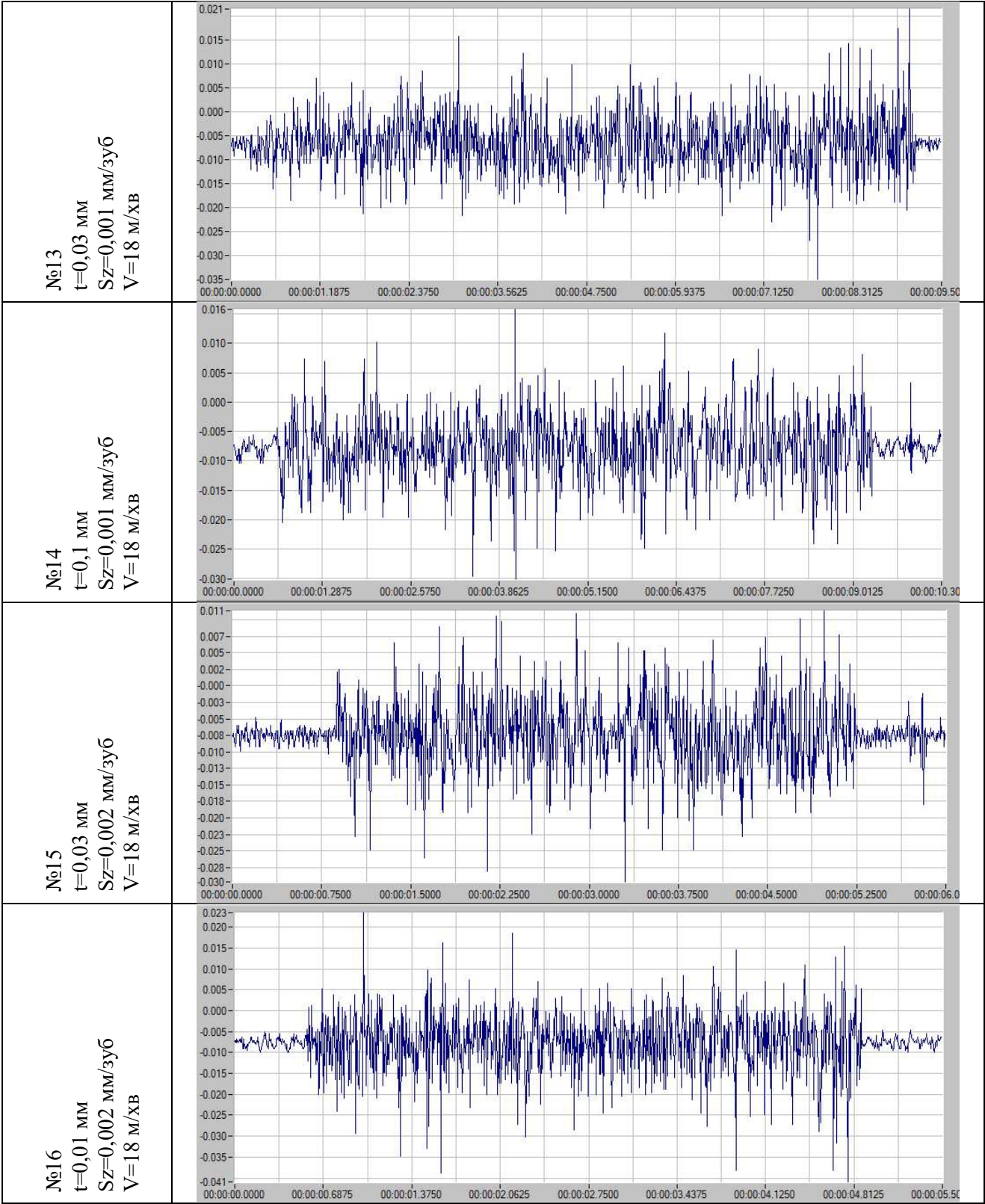
Андрій МОРОЗОВ

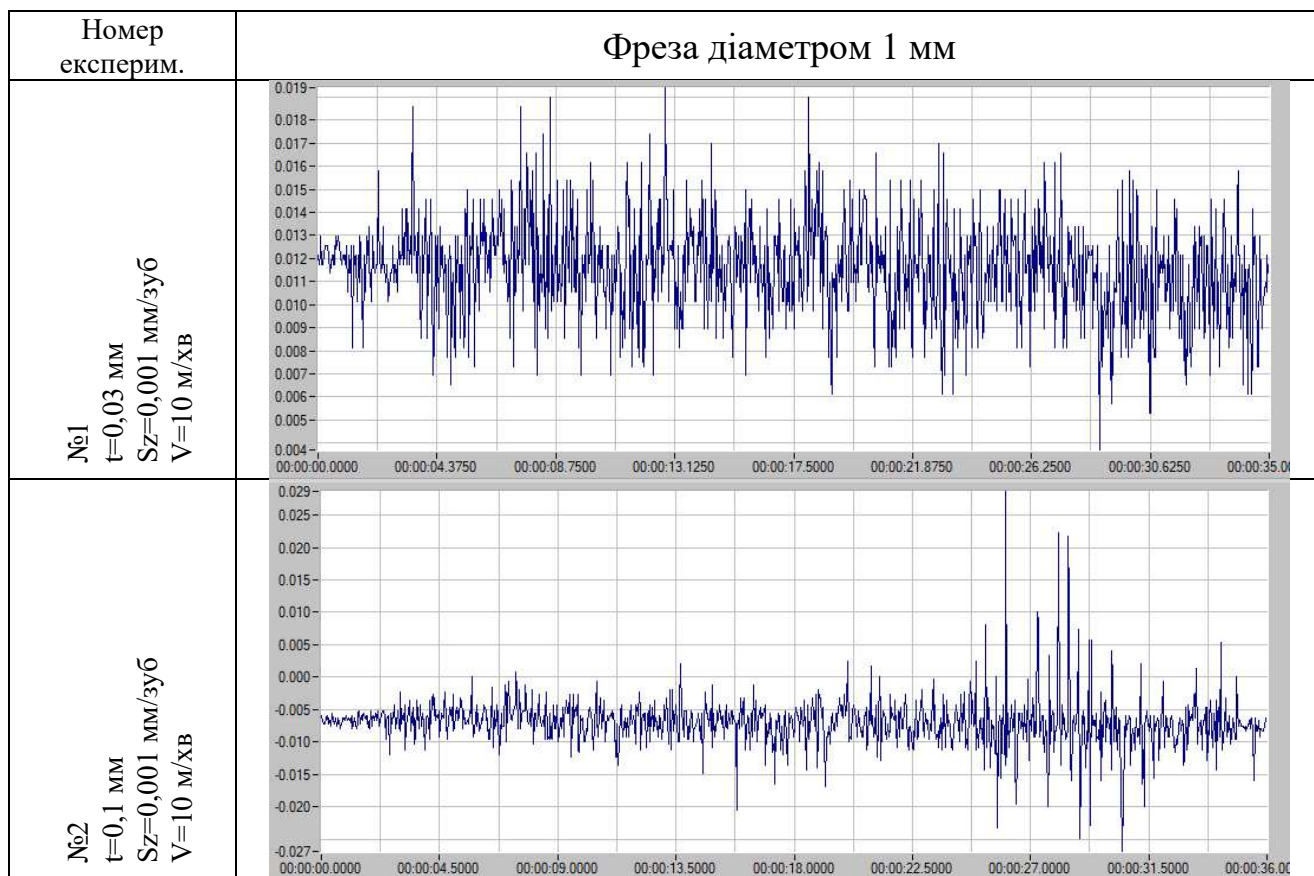
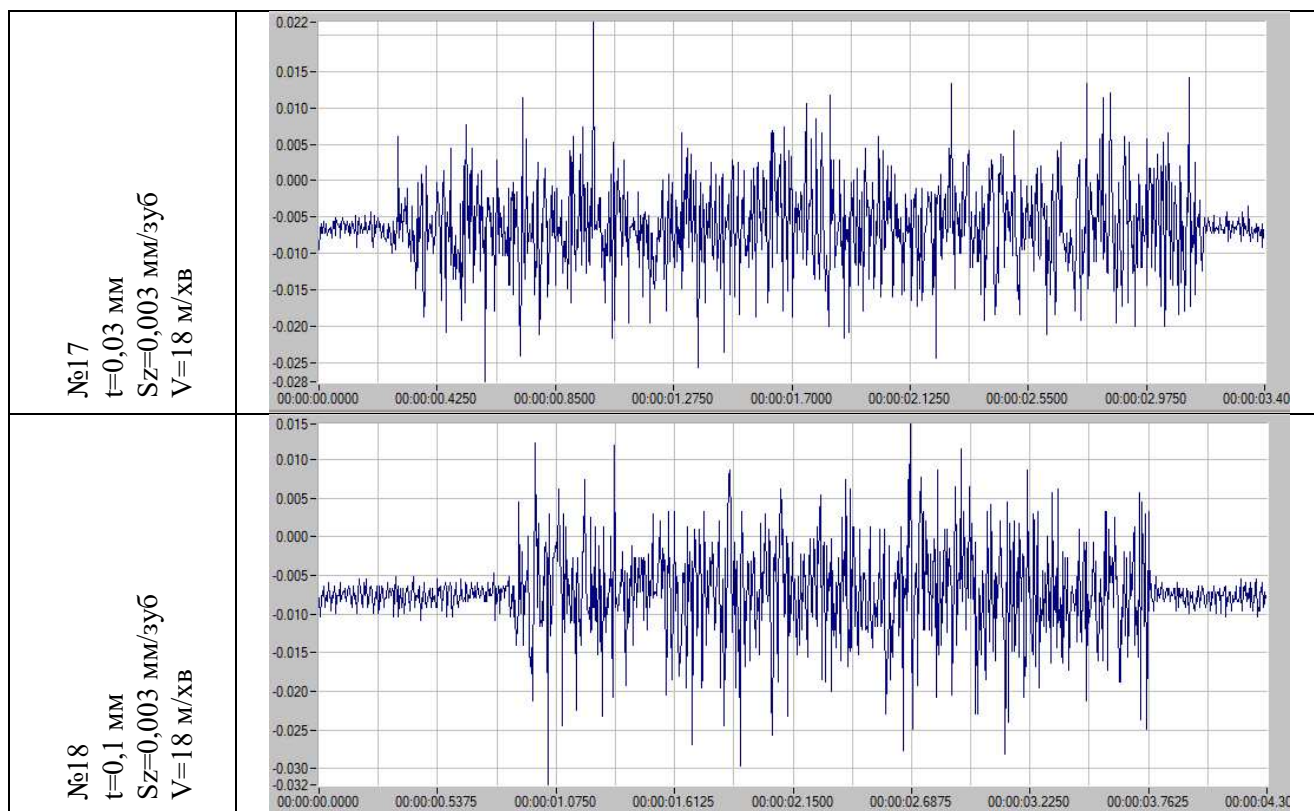
Часова залежність вихідного сигналу датчика вібрацій при
мікрофрезеруванні сплаву NiTi

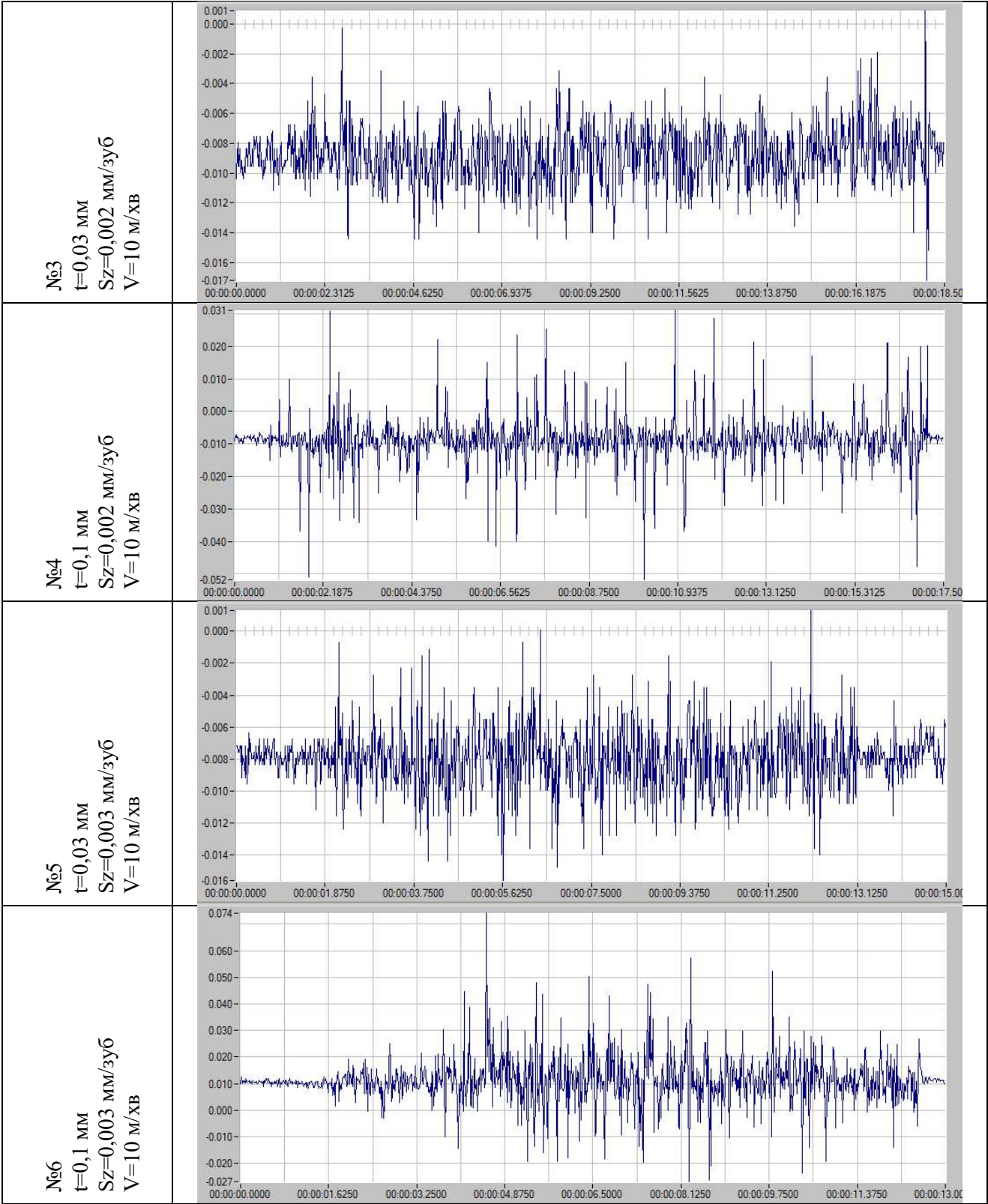


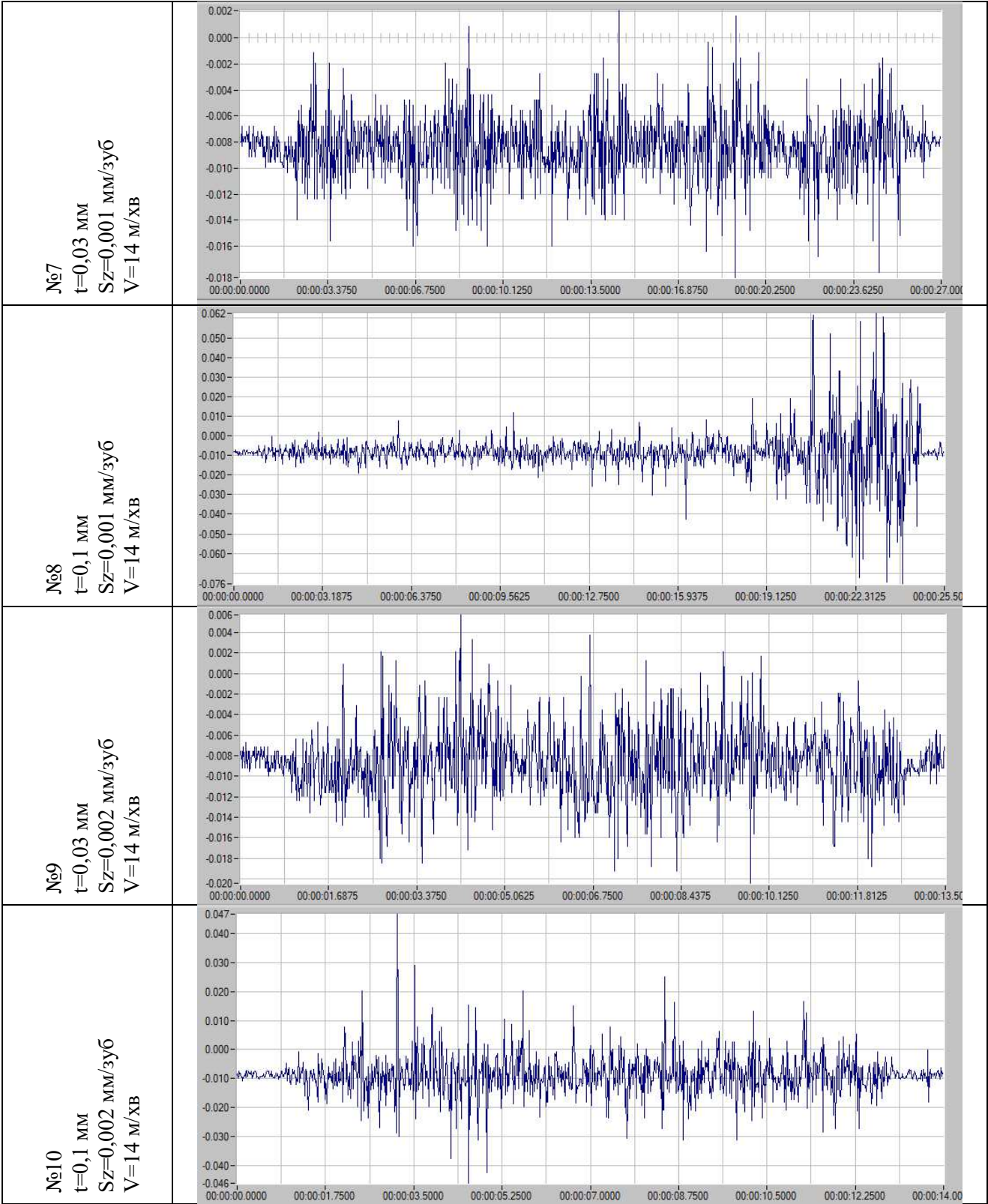


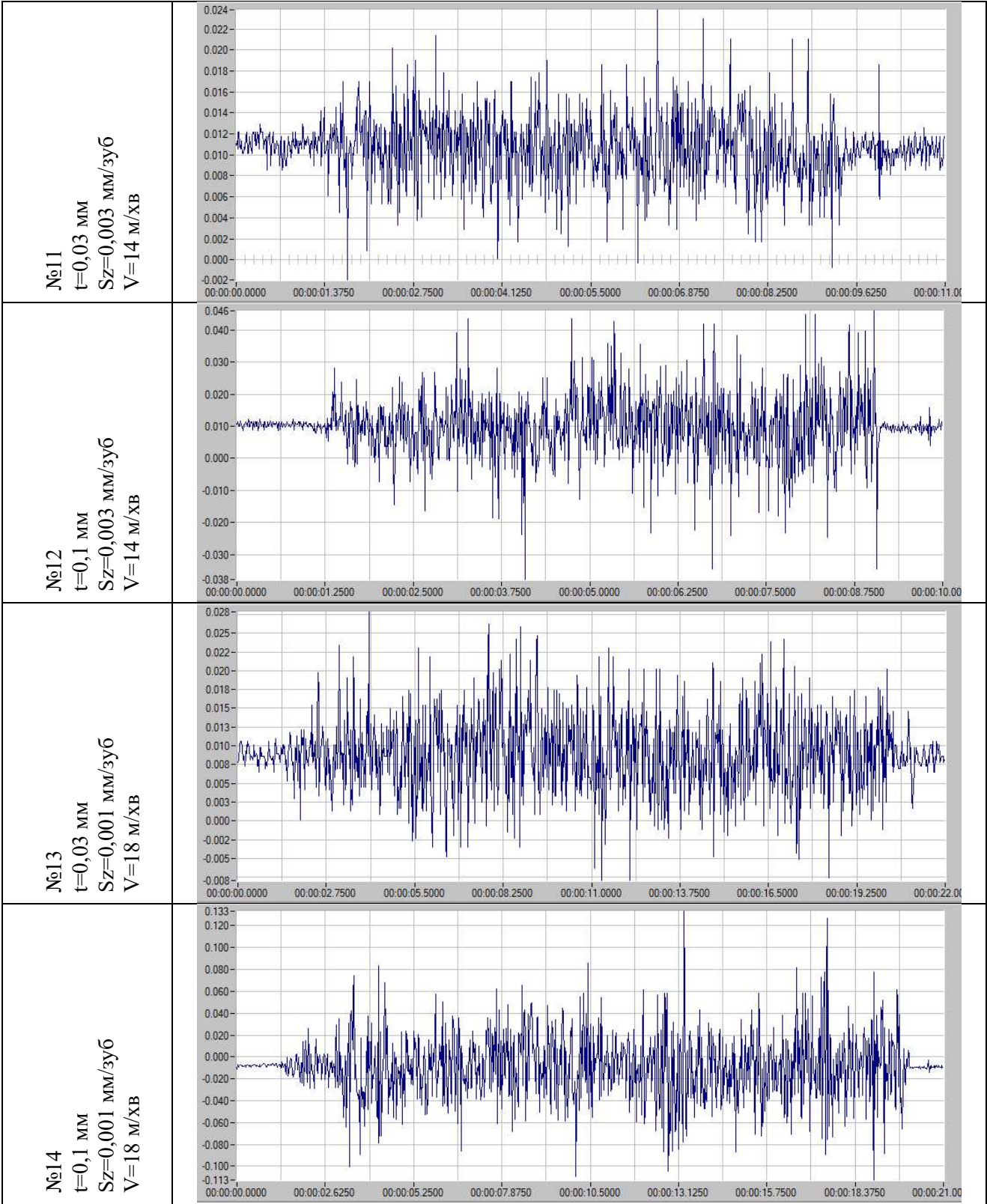


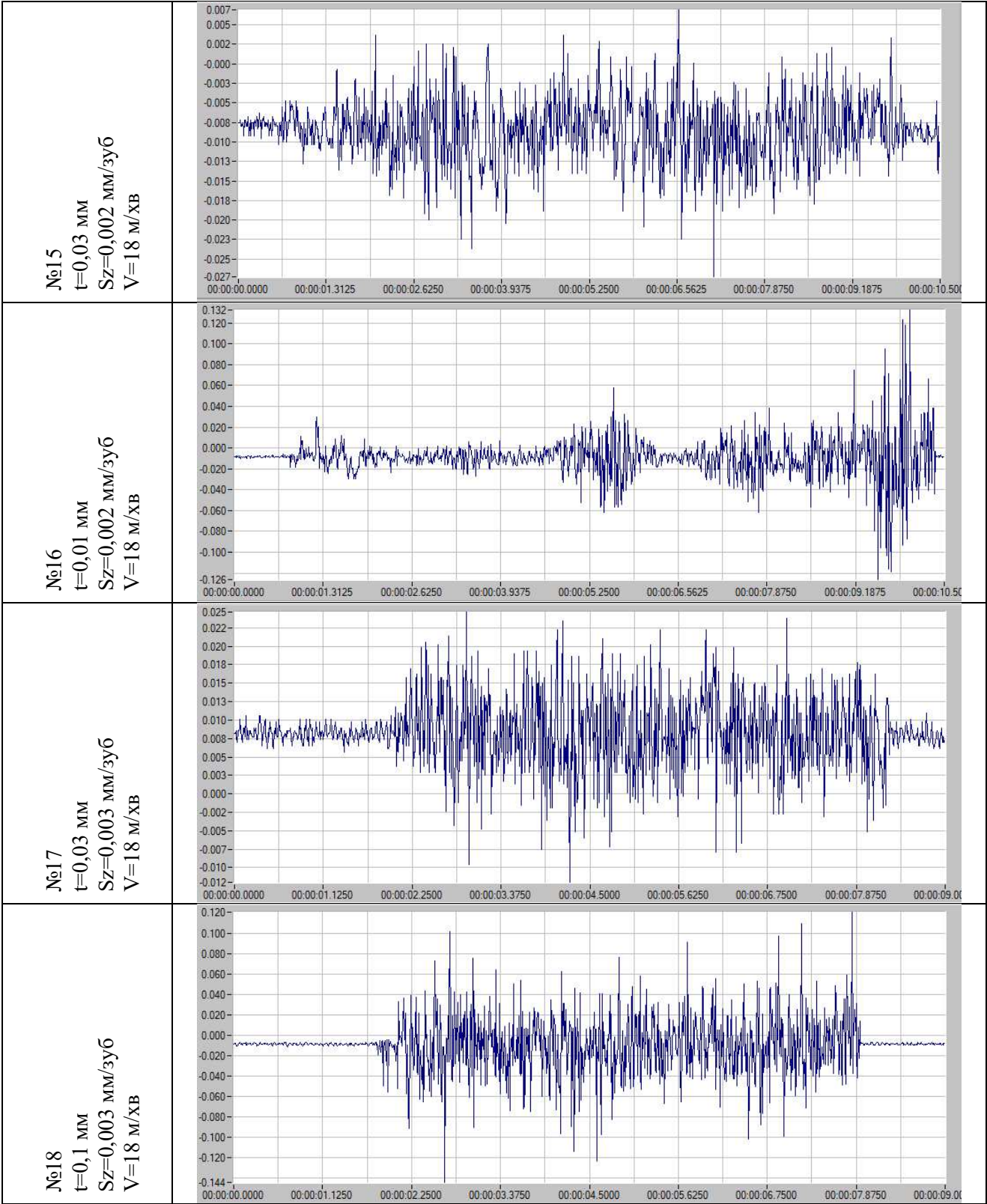




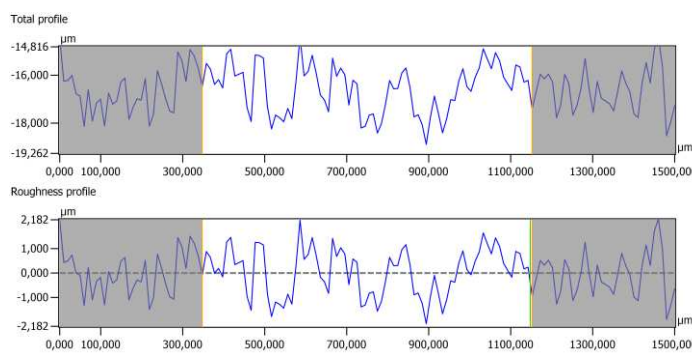
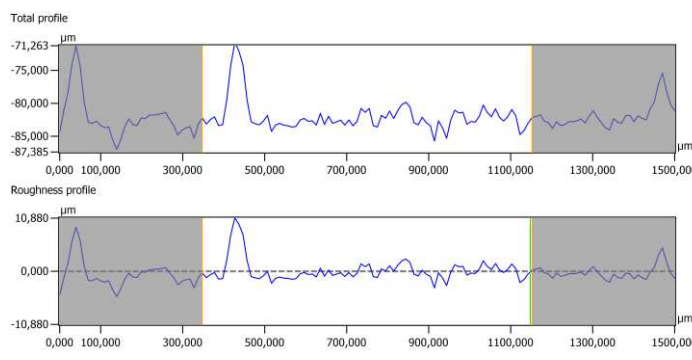


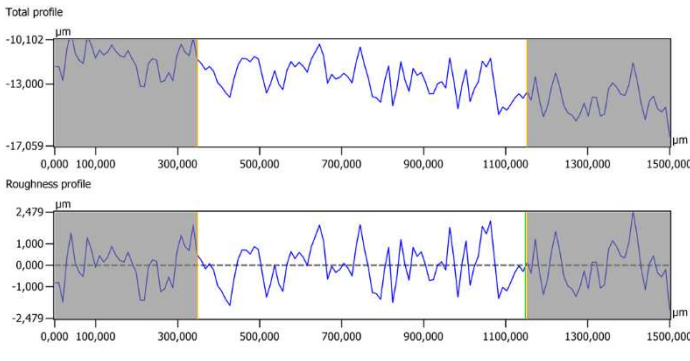
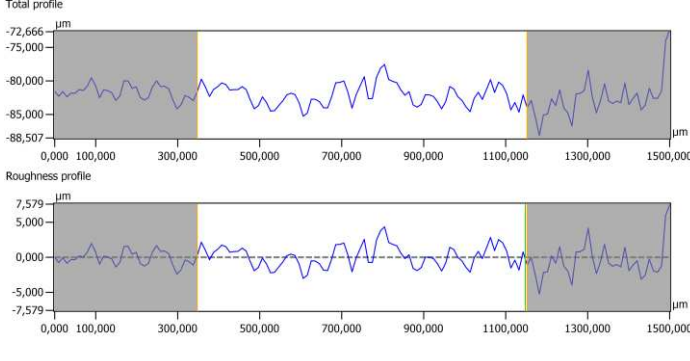
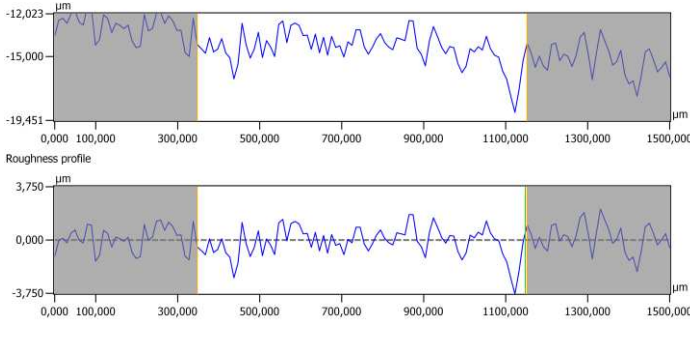


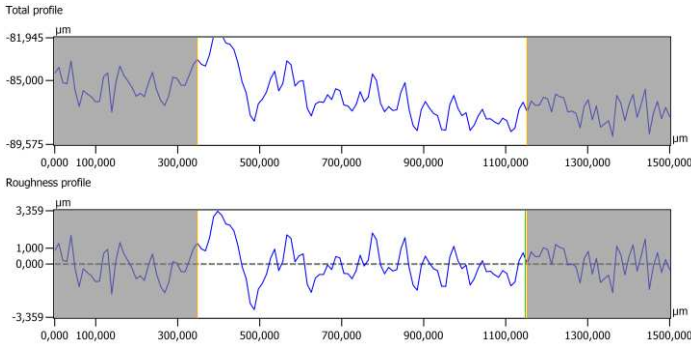
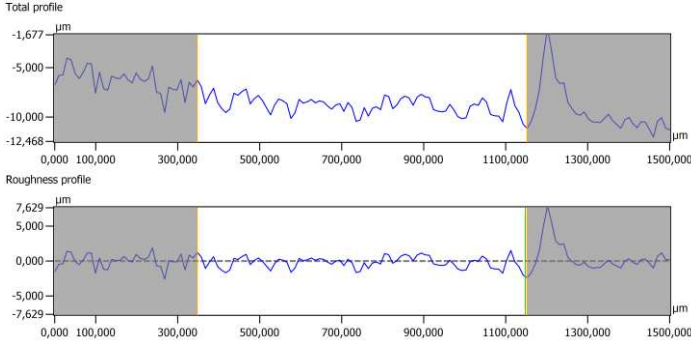
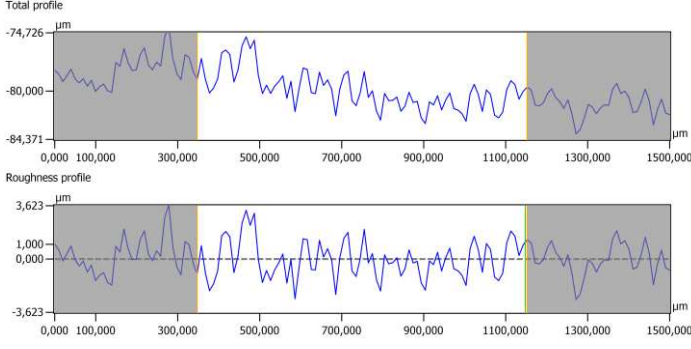


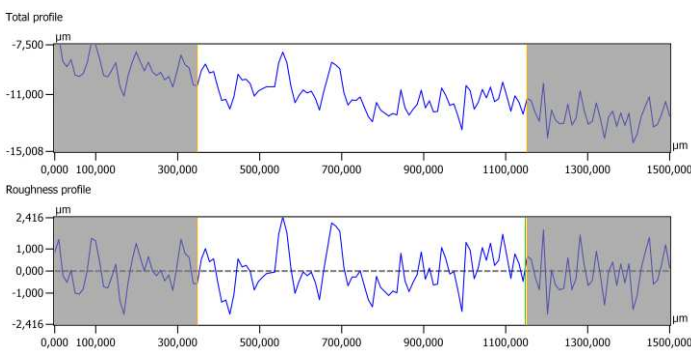
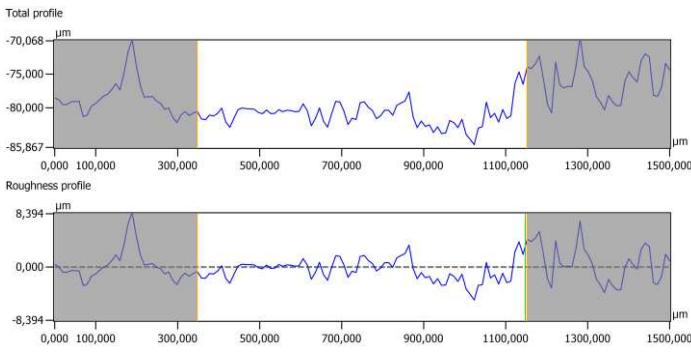
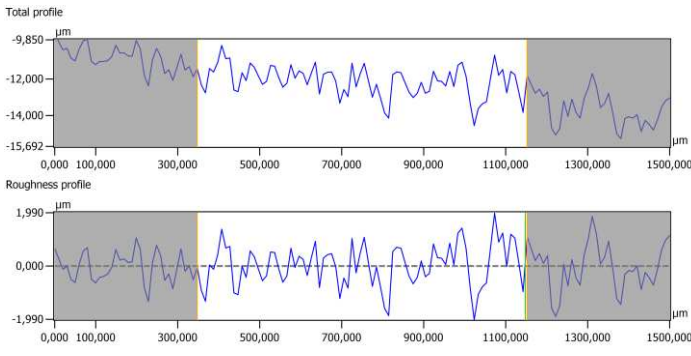


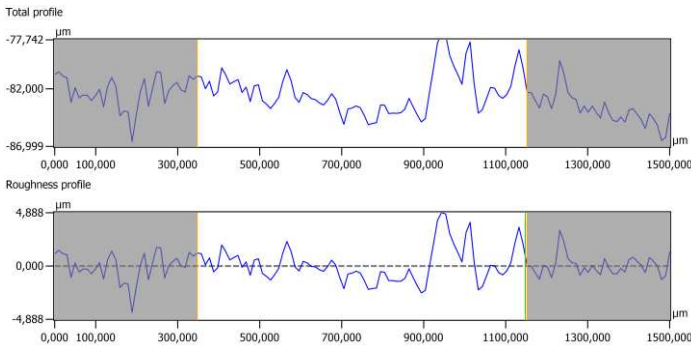
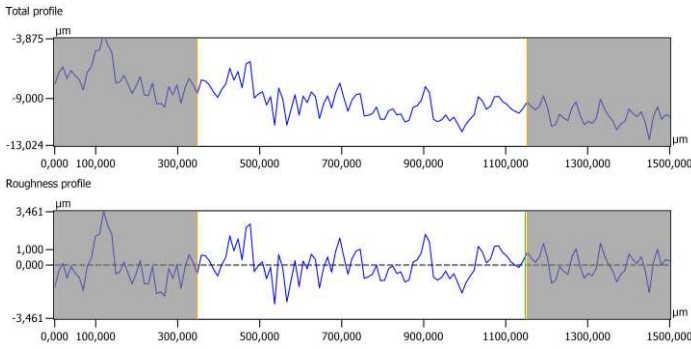
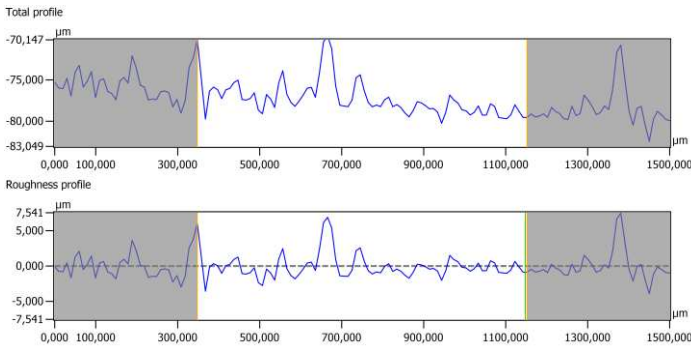
Результати вимірювання параметрів шорсткості Ra, Rz при
мікрофрезеруванні сплаву NiTi

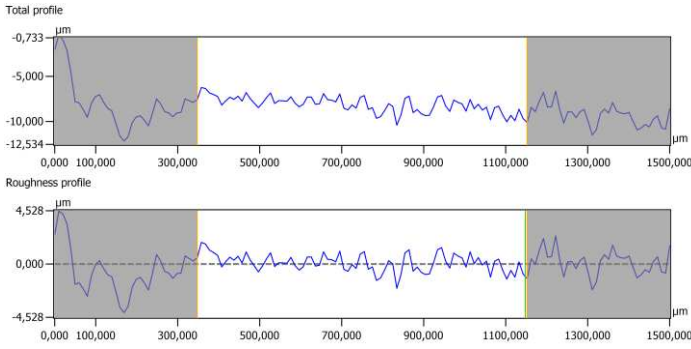
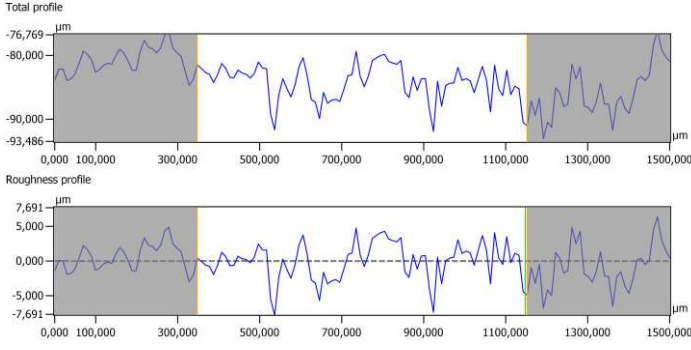
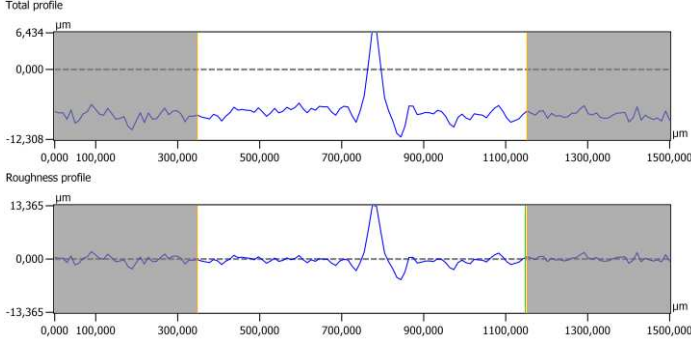
Номер експерим.		Фреза діаметром 0,5 мм		
№1 t=0,03 мм Sz=0,001 мм/зуб V=10 м/хв				
			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,684	4,345
		Max.	0,95	5,921
		Min.	0,539	3,168
		Std. DV	0,153	0,989
		Line 1	0,568	3,168
		Line 2	0,578	4,167
		Line 3	0,539	3,340
		Line 4	0,814	4,242
Line 5	0,8	5,921		
Line 6	0,54	3,914		
Line 7	0,95	5,662		
№2 t=0,1 мм Sz=0,001 мм/зуб V=10 м/хв				
			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,211	8,882
		Max.	1,455	14,340
		Min.	0,957	5,414
		Std. DV	0,204	3,015
		Line 1	1,455	8,950
		Line 2	1,004	7,733
		Line 3	1,006	6,621
		Line 4	1,42	14,340
Line 5	0,957	5,414		
Line 6	1,396	12,244		
Line 7	1,236	6,870		

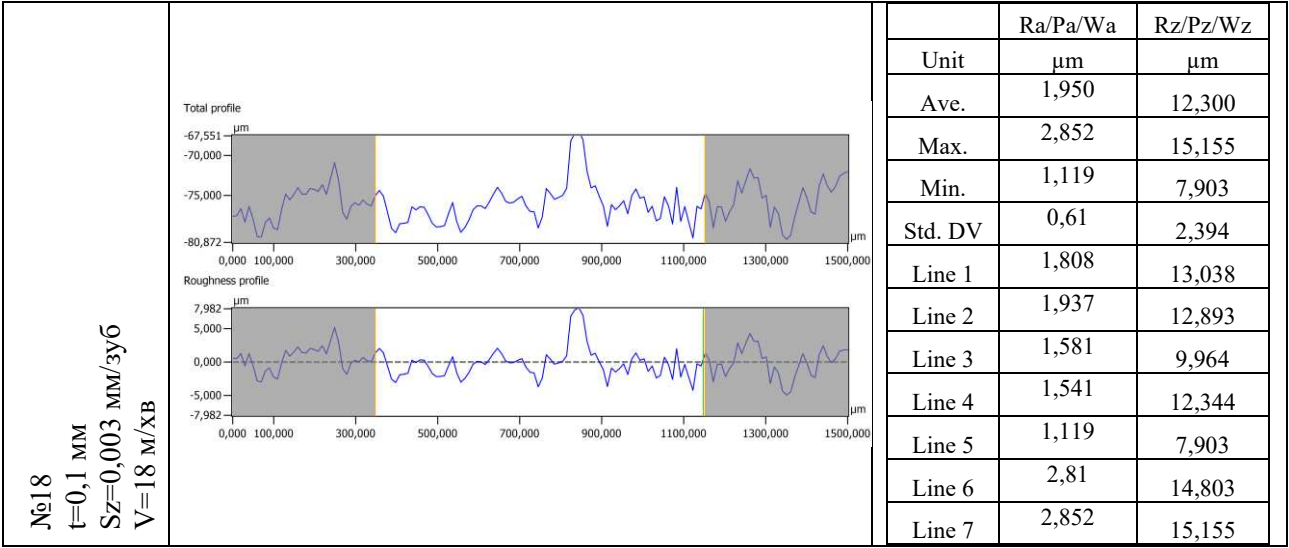
№3 $t=0,03$ MM $Sz=0,002$ MM/3yб $V=10$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,724	4,944
		Max.	0,82	5,966
		Min.	0,615	3,377
		Std. DV	0,068	0,922
		Line 1	0,82	5,684
		Line 2	0,656	5,966
		Line 3	0,615	3,377
		Line 4	0,782	5,195
№4 $t=0,1$ MM $Sz=0,002$ MM/3yб $V=10$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,376	10,257
		Max.	1,61	12,473
		Min.	1,236	7,349
		Std. DV	0,113	1,581
		Line 1	1,353	9,319
		Line 2	1,382	11,840
		Line 3	1,413	12,473
		Line 4	1,236	7,349
№5 $t=0,03$ MM $Sz=0,003$ MM/3yб $V=10$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,763	4,648
		Max.	0,859	5,592
		Min.	0,7	3,352
		Std. DV	0,058	0,809
		Line 1	0,749	5,271
		Line 2	0,702	3,835
		Line 3	0,859	5,592
		Line 4	0,753	5,587
		Line 5	0,819	4,412
		Line 6	0,758	4,488
		Line 7	0,7	3,352

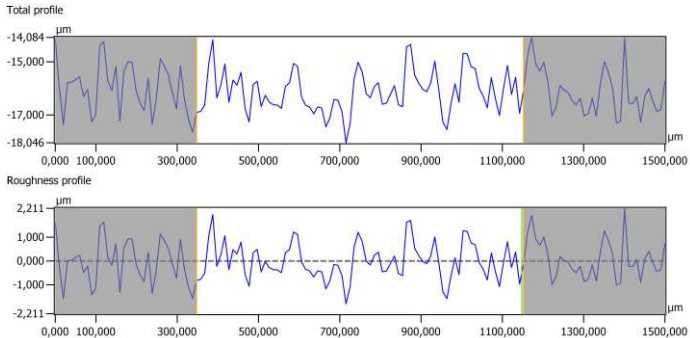
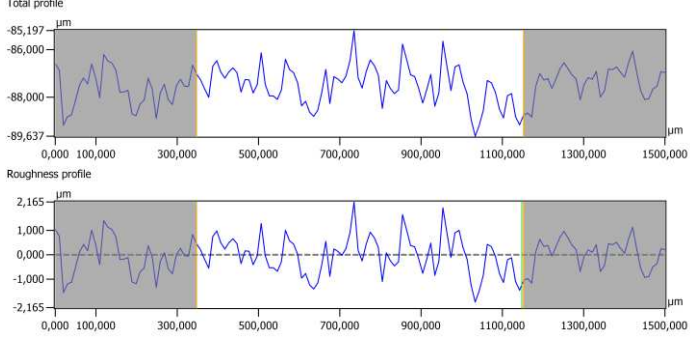
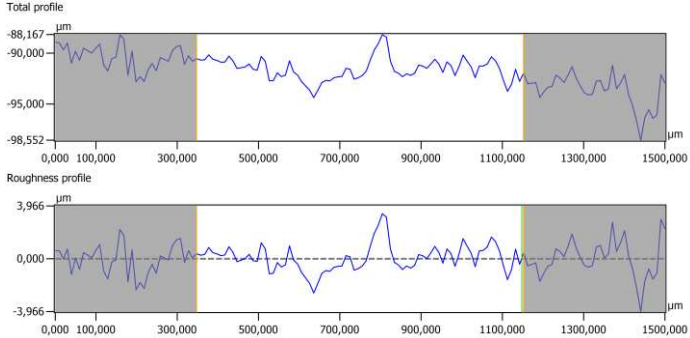
№6 $t=0,1$ MM $Sz=0,003$ MM/3y6 $V=10$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,542	10,475
		Max.	3,735	24,261
		Min.	0,661	5,090
		Std. DV	1,118	7,237
		Line 1	0,785	5,393
		Line 2	0,661	5,090
		Line 3	0,732	5,388
		Line 4	0,915	6,199
№7 $t=0,03$ MM $Sz=0,001$ MM/3y6 $V=14$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,704	4,744
		Max.	0,925	7,811
		Min.	0,563	3,017
		Std. DV	0,115	1,446
		Line 1	0,563	3,017
		Line 2	0,573	4,523
		Line 3	0,714	5,296
		Line 4	0,636	3,488
№8 $t=0,1$ MM $Sz=0,001$ MM/3y6 $V=14$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,284	9,008
		Max.	2,021	13,411
		Min.	1,024	6,014
		Std. DV	0,378	2,634
		Line 1	1,039	6,431
		Line 2	1,05	7,969
		Line 3	1,028	7,397
		Line 4	1,024	6,014

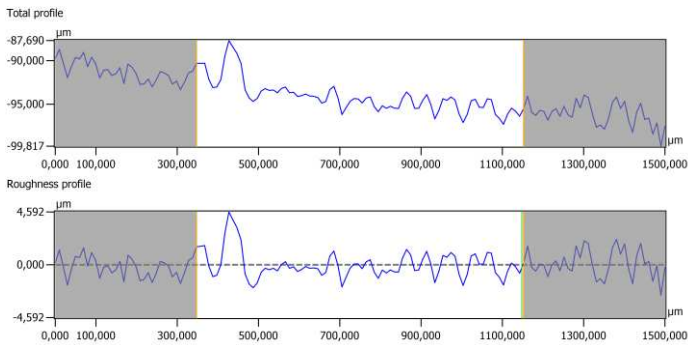
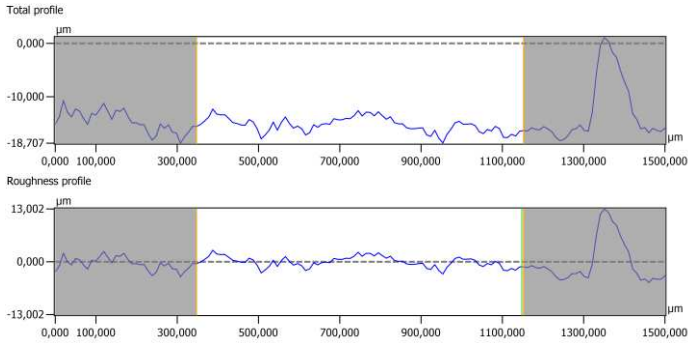
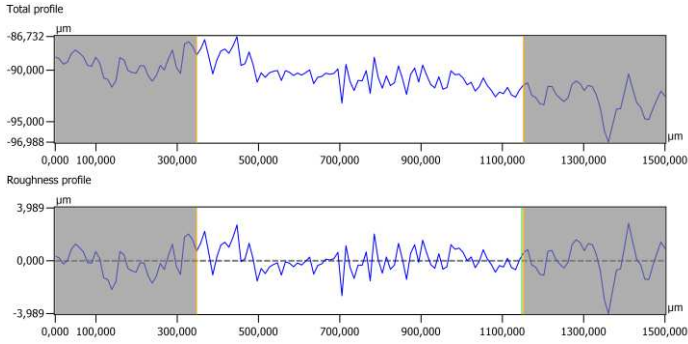
№9 $t=0,03$ MM $Sz=0,002$ MM/3y6 $V=14$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,750	4,818
		Max.	0,976	6,892
		Min.	0,529	3,889
		Std. DV	0,134	0,897
		Line 1	0,805	4,848
		Line 2	0,745	3,889
		Line 3	0,976	6,892
		Line 4	0,722	4,409
№10 $t=0,1$ MM $Sz=0,002$ MM/3y6 $V=14$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,514	11,820
		Max.	2,368	20,801
		Min.	1,01	7,553
		Std. DV	0,47	4,373
		Line 1	2,368	20,801
		Line 2	1,161	10,621
		Line 3	1,192	7,857
		Line 4	1,332	9,166
№11 $t=0,03$ MM $Sz=0,003$ MM/3y6 $V=14$ M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,809	5,529
		Max.	1,41	11,150
		Min.	0,539	3,695
		Std. DV	0,289	2,537
		Line 1	0,622	3,870
		Line 2	0,65	3,811
		Line 3	0,539	3,695
		Line 4	0,609	3,981

№12 t=0,1 MM Sz=0,003 MM/3yб V=14 M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,745	12,047
		Max.	5,089	29,136
		Min.	0,892	6,503
		Std. DV	1,434	7,273
		Line 1	1,274	9,077
		Line 2	1,286	10,123
		Line 3	0,892	6,503
		Line 4	1,198	7,380
№13 t=0,03 MM Sz=0,001 MM/3yб V=18 M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,715	4,944
		Max.	0,81	5,966
		Min.	0,605	3,377
		Std. DV	0,068	0,922
		Line 1	0,81	5,684
		Line 2	0,646	5,966
		Line 3	0,605	3,377
		Line 4	0,762	5,195
№14 t=0,1 MM Sz=0,001 MM/3yб V=18 M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,341	8,531
		Max.	2,27	12,379
		Min.	0,837	4,794
		Std. DV	0,415	2,477
		Line 1	1,451	9,513
		Line 2	1,121	6,702
		Line 3	1,169	6,284
		Line 4	1,167	10,454
		Line 5	0,837	4,794
		Line 6	1,369	9,589
		Line 7	2,27	12,379

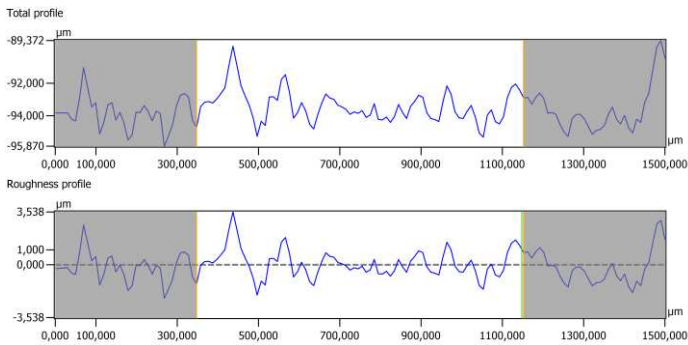
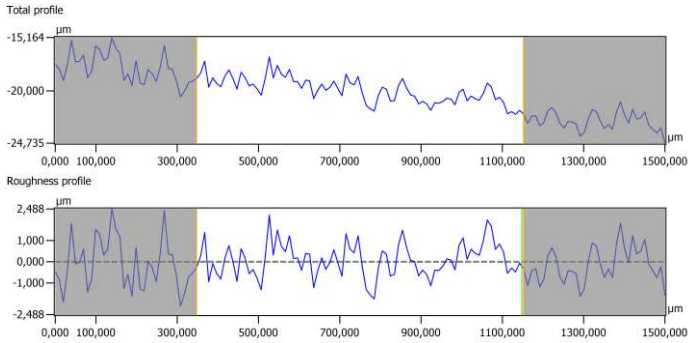
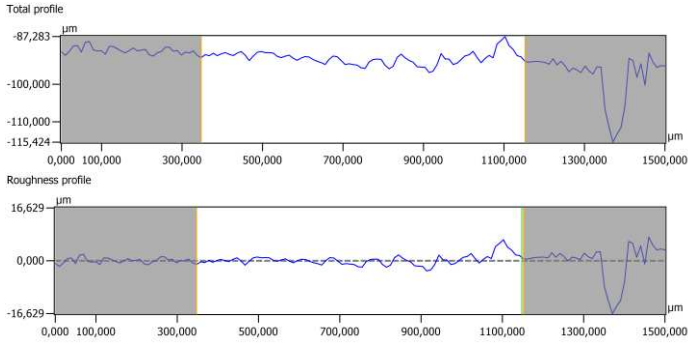
№15 t=0,03 MM Sz=0,002 MM/3yб V=18 M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,782	5,576
		Max.	0,926	7,574
		Min.	0,586	3,903
		Std. DV	0,112	1,090
		Line 1	0,874	6,335
		Line 2	0,926	5,220
		Line 3	0,781	5,543
		Line 4	0,586	3,903
№16 t=0,01 MM Sz=0,002 MM/3yб V=18 M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,644	11,254
		Max.	2,027	14,979
		Min.	1,354	8,848
		Std. DV	0,243	1,971
		Line 1	1,617	10,227
		Line 2	1,578	12,055
		Line 3	1,422	8,848
		Line 4	1,984	12,621
№17 t=0,03 MM Sz=0,003 MM/3yб V=18 M/XB			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,852	7,539
		Max.	1,289	18,643
		Min.	0,63	4,278
		Std. DV	0,253	4,724
		Line 1	0,63	4,278
		Line 2	0,657	4,440
		Line 3	0,73	5,497
		Line 4	1,289	18,643
		Line 5	0,76	6,396
		Line 6	0,687	5,032
		Line 7	1,209	8,487



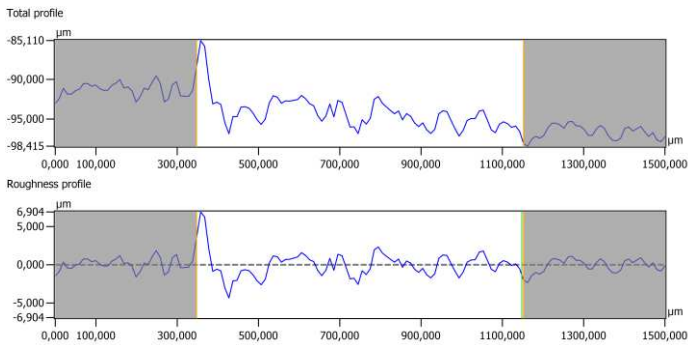
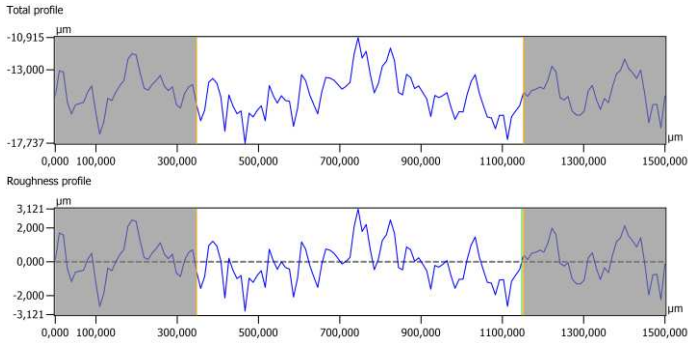
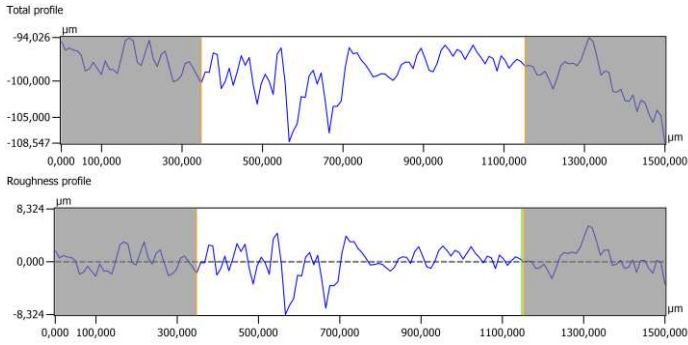
Номер експерим	Фреза діаметром 1 мм		
№1 t=0,03 мм Sz=0,001 мм/зуб V=10 м/хв			
		Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm
		Ave.	0,620
		Max.	0,729
		Min.	0,555
		Std. DV	0,052
		Line 1	0,729
		Line 2	0,640
		Line 3	0,593
		Line 4	0,555
		Line 5	0,609
		Line 6	0,585
№2 t=0,1 мм Sz=0,001 мм/зуб V=10 м/хв			
		Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm
		Ave.	0,780
		Max.	1,998
		Min.	0,477
		Std. DV	0,441
		Line 1	1,998
		Line 2	0,835
		Line 3	0,640
		Line 4	0,704
		Line 5	0,624
		Line 6	0,601
№3 t=0,03 мм Sz=0,002 мм/зуб V=10 м/хв			
		Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm
		Ave.	0,785
		Max.	0,938
		Min.	0,716
		Std. DV	0,069
		Line 1	0,753
		Line 2	0,767
		Line 3	0,735
		Line 4	0,771
		Line 5	0,716
		Line 6	0,938
		Line 7	0,818

№4 t=0,1 MM Sz=0,002 MM/3yб V=10 M/xb			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,880	5,914
		Max.	1,862	14,026
		Min.	0,570	3,287
		Std. DV	0,362	3,135
		Line 1	1,862	14,026
		Line 2	0,748	5,120
		Line 3	0,570	3,287
		Line 4	0,633	4,567
№5 t=0,03 MM Sz=0,003 MM/3yб V=10 M/xb			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,760	5,493
		Max.	1,030	7,888
		Min.	0,611	3,464
		Std. DV	0,115	1,243
		Line 1	0,687	7,888
		Line 2	0,611	3,464
		Line 3	0,753	5,866
		Line 4	0,835	5,193
№6 t=0,1 MM Sz=0,003 MM/3yб V=10 M/xb			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,980	6,911
		Max.	1,304	11,313
		Min.	0,691	4,244
		Std. DV	0,196	2,084
		Line 1	1,304	11,313
		Line 2	1,033	8,489
		Line 3	1,233	8,593
		Line 4	1,011	6,668

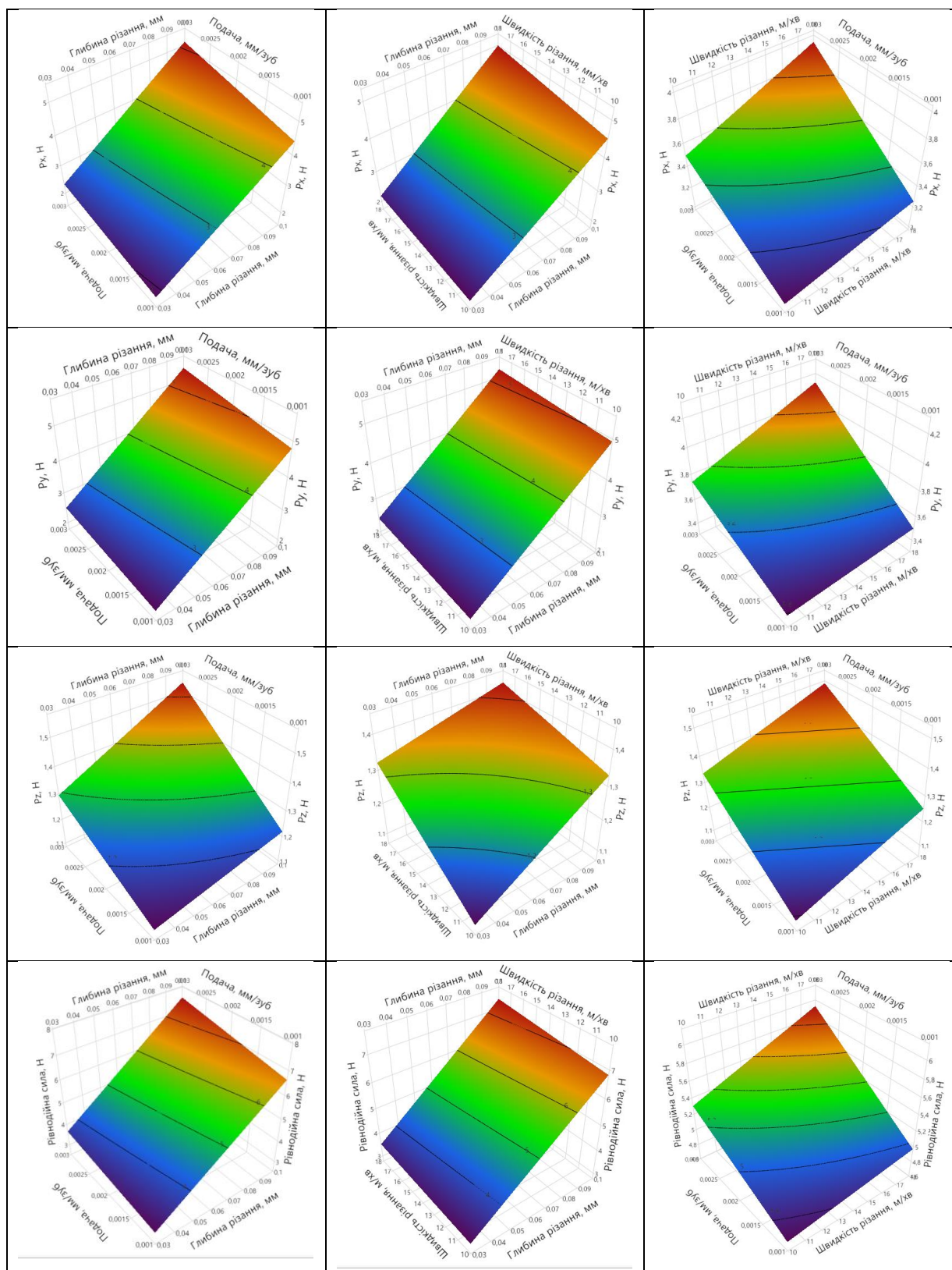
№7 t=0,03 mm Sz=0,001 mm/3yб V=14 м/хВ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,655	4,487
		Max.	0,701	6,159
		Min.	0,605	3,288
		Std. DV	0,032	0,792
		Line 1	0,605	4,910
		Line 2	0,671	4,729
		Line 3	0,694	4,780
		Line 4	0,701	4,118
№8 t=0,1 mm Sz=0,001 mm/3yб V=14 м/хВ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,823	5,486
		Max.	1,067	7,461
		Min.	0,720	4,464
		Std. DV	0,112	0,841
		Line 1	0,728	4,871
		Line 2	0,720	4,741
		Line 3	0,942	5,946
		Line 4	1,067	7,461
№9 t=0,03 mm Sz=0,002 mm/3yб V=14 м/хВ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,752	4,381
		Max.	0,873	5,637
		Min.	0,681	3,586
		Std. DV	0,067	0,667
		Line 1	0,704	5,113
		Line 2	0,873	3,670
		Line 3	0,774	4,194
		Line 4	0,851	5,021

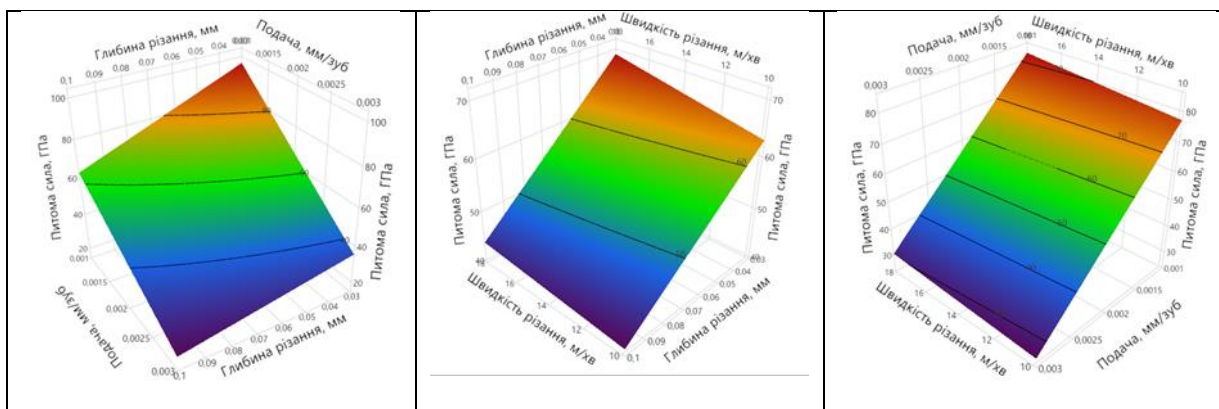
№10 $t=0,1$ MM $Sz=0,002$ MM/3yб $V=14$ M/xb			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,956	10,409
		Max.	2,765	51,959
		Min.	0,583	3,471
		Std. DV	0,646	14,743
		Line 1	0,846	8,017
		Line 2	0,64	3,471
		Line 3	0,741	3,984
		Line 4	0,79	5,230
№11 $t=0,03$ MM $Sz=0,003$ MM/3yб $V=14$ M/xb			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,865	7,090
		Max.	1,398	16,819
		Min.	0,631	3,946
		Std. DV	0,217	3,664
		Line 1	0,813	5,021
		Line 2	0,865	6,975
		Line 3	0,785	5,615
		Line 4	0,679	4,897
№12 $t=0,1$ MM $Sz=0,003$ MM/3yб $V=14$ M/xb			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,091	10,380
		Max.	2,108	28,752
		Min.	0,577	4,102
		Std. DV	0,536	8,368
		Line 1	0,722	4,772
		Line 2	0,577	4,965
		Line 3	0,671	4,339
		Line 4	0,770	4,102

№13 t=0,03 mm Sz=0,001 mm/3yб V=18 м/хВ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,680	4,285
		Max.	0,792	5,608
		Min.	0,544	3,444
		Std. DV	0,067	0,689
		Line 1	0,657	4,177
		Line 2	0,683	4,215
		Line 3	0,742	4,094
		Line 4	0,544	3,444
№14 t=0,1 mm Sz=0,001 mm/3yб V=18 м/хВ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,866	5,686
		Max.	1,099	6,788
		Min.	0,647	4,036
		Std. DV	0,139	0,885
		Line 1	0,647	5,097
		Line 2	0,684	4,036
		Line 3	0,829	5,214
		Line 4	1,004	6,610
№15 t=0,03 mm Sz=0,002 mm/3yб V=18 м/хВ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,806	6,351
		Max.	1,098	9,949
		Min.	0,631	4,566
		Std. DV	0,147	1,890
		Line 1	0,749	5,465
		Line 2	0,869	9,263
		Line 3	0,796	4,741
		Line 4	1,098	9,949

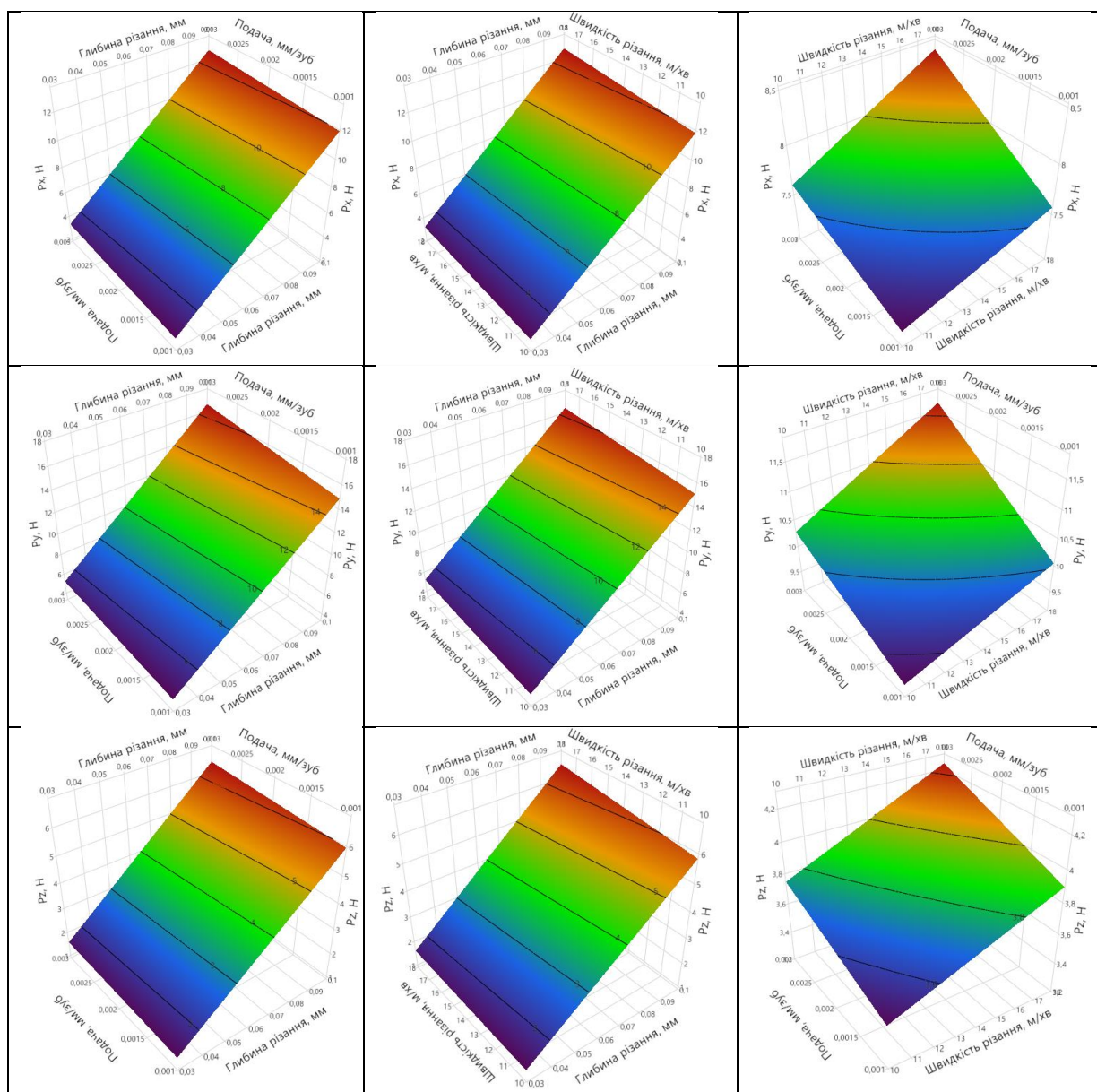
№16 $t=0,01$ мм $Sz=0,002$ мм/3yб $V=18$ м/хБ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,038	7,744
		Max.	1,657	15,050
		Min.	0,667	4,255
		Std. DV	0,326	3,401
		Line 1	0,726	4,396
		Line 2	0,718	4,280
		Line 3	0,667	4,255
		Line 4	0,845	7,622
№17 $t=0,03$ мм $Sz=0,003$ мм/3yб $V=18$ м/хБ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	0,938	5,986
		Max.	1,232	8,284
		Min.	0,606	3,922
		Std. DV	0,199	1,184
		Line 1	0,831	5,851
		Line 2	0,743	5,361
		Line 3	0,606	3,922
		Line 4	0,854	5,211
№18 $t=0,1$ мм $Sz=0,003$ мм/3yб $V=18$ м/хБ			Ra/Pa/Wa	Rz/Pz/Wz
		Unit	μm	μm
		Ave.	1,218	8,989
		Max.	1,928	17,415
		Min.	0,714	4,608
		Std. DV	0,408	4,094
		Line 1	0,817	5,215
		Line 2	1,362	17,415
		Line 3	1,928	11,886
		Line 4	1,519	9,545

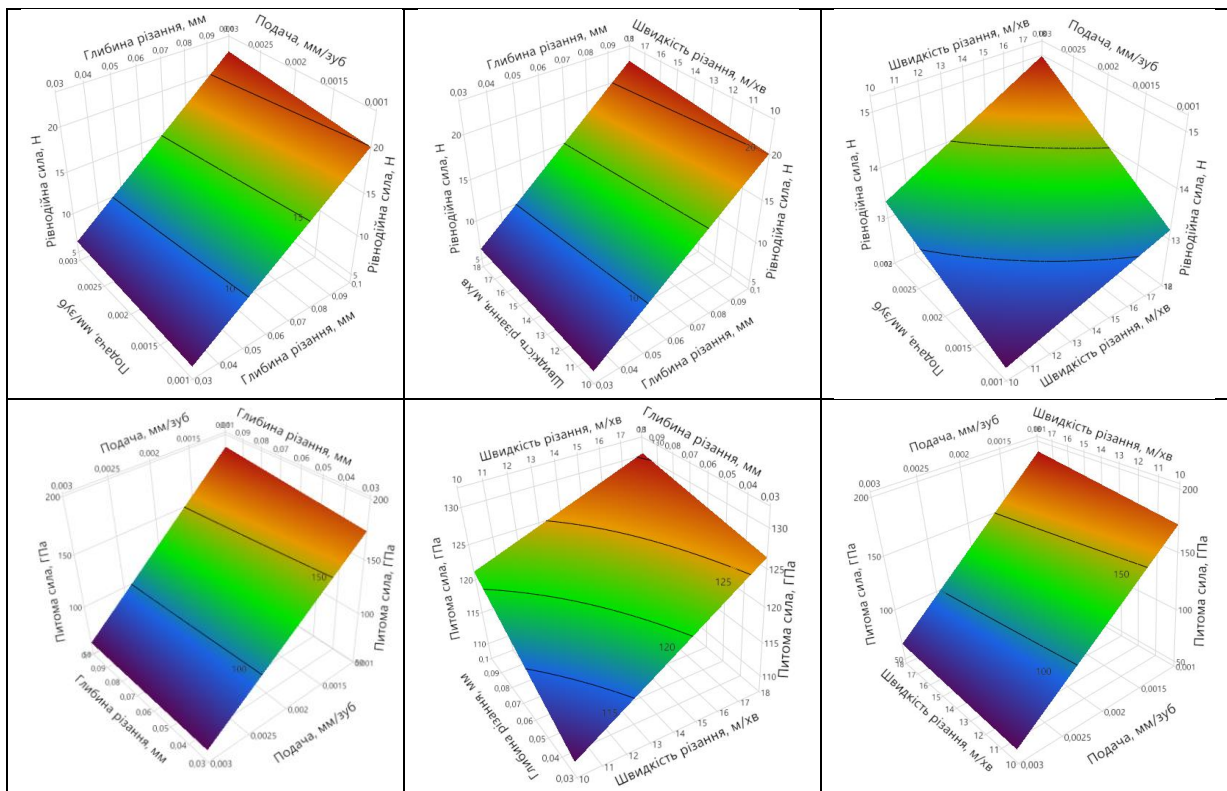
3D-графіки залежностей сил різання, рівнодійної та питомої сили різання від зміни режимів різання при мікрофрезеруванні фрезою 0,5 мм





3D-графіки залежностей сил різання, рівнодійної та питомої сили різання від зміни режимів різання при мікрофрезеруванні фрезою 1 мм





ДОДАТОК Є

Результати дисперсійного аналізу показників геометричної точності пазів для
фрези діаметром 0,5

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	p-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
Δb						
t	4872,4572	1	43,9526	<0,0001	4872,4572	58,190
S_z	1208,8964	1	10,9050	0,0070	1208,8964	14,437
V	242,8650	1	2,1908	0,1669	242,8650	2,900
$t \times S_z$	265,7572	1	2,3973	0,1498	265,7572	3,174
$t \times V$	372,4214	1	3,3595	0,0940	372,4214	4,448
$S_z \times V$	191,5120	1	1,7276	0,2155	191,5120	2,287
Залишок	1219,4267	11			110,86	14,563
Разом	8373,3360	17				100,000
Δh						
t	11,913708	1	19,0622	0,0011	11,913708	51,983
S_z	0,735075	1	1,1761	0,3013	0,735075	3,207
V	1,063861	1	1,7022	0,2186	1,063861	4,642
$t \times S_z$	1,212216	1	1,9396	0,1912	1,212216	5,289
$t \times V$	0,425257	1	0,6804	0,4270	0,425257	1,856
$S_z \times V$	0,693253	1	1,1092	0,3148	0,693253	3,025
Залишок	6,874918	11			0,62499	29,998
Разом	22,918287	17				100,000
b_{min}						
t	5224,3961	1	16,8255	0,0018	5224,3961	33,162
S_z	6107,9395	1	19,6710	0,0010	6107,9395	38,770
V	334,6887	1	1,0779	0,3215	334,6887	2,124
$t \times S_z$	139,6805	1	0,4498	0,5162	139,6805	0,887
$t \times V$	499,6429	1	1,6091	0,2308	499,6429	3,171
$S_z \times V$	32,2525	1	0,1039	0,7533	32,2525	0,205
Залишок	3415,557	11			310,51	21,680
Разом	15754,157	17				100,000
b_{max}						
t	6,1355	1	0,0789	0,7839	6,1355	0,216
S_z	1882,1819	1	24,2182	0,0005	1882,1819	66,121
V	7,3461	1	0,0945	0,7642	7,3461	0,258
$t \times S_z$	20,1010	1	0,2586	0,6211	20,1010	0,706
$t \times V$	9,3298	1	0,1200	0,7355	9,3298	0,328
$S_z \times V$	66,5800	1	0,8567	0,3745	66,5800	2,339

Залишок	854,8930	11			77,718	30,032
Разом	2846,5673	17				100,000
h_{min}						
t	21777,428	1	6463,709	<0,0001	21777,428	99,715
S_z	0,00853333	1	0,0025	0,9608	0,00853333	0,000
V	16,373	1	4,8596	0,0497	16,373	0,075
$t \times S_z$	3,030	1	0,8993	0,3633	3,030	0,014
$t \times V$	3,622	1	1,0751	0,3220	3,622	0,017
$S_z \times V$	2,129	1	0,6319	0,4435	2,129	0,010
Залишок	37,061	11			3,37	0,170
Разом	21839,652	17				100,000
h_{max}						
t	22808,208	1	4388,076	<0,0001	22808,208	99,568
S_z	0,902	1	0,1735	0,6850	0,902	0,004
V	25,784	1	4,9606	0,0478	25,784	0,113
$t \times S_z$	8,075	1	1,5536	0,2385	8,075	0,035
$t \times V$	6,530	1	1,2563	0,2862	6,530	0,029
$S_z \times V$	0,392	1	0,0755	0,7886	0,392	0,002
Залишок	57,175	11			5,2	0,250
Разом	22907,067	17				100,000
α_L						
t	2180,7289	1	59,0800	<0,0001	2180,7289	66,077
S_z	382,8101	1	10,3710	0,0082	382,8101	11,599
V	6,1834	1	0,1675	0,6902	6,1834	0,187
$t \times S_z$	265,6725	1	7,1976	0,0213	265,6725	8,050
$t \times V$	57,3344	1	1,5533	0,2385	57,3344	1,737
$S_z \times V$	1,5243	1	0,0413	0,8427	1,5243	0,046
Залишок	406,0262	11			36,911	12,303
Разом	3300,2798	17				100,000
α_R						
t	949,57915	1	23,6855	0,0005	949,57915	62,975
S_z	25,24160	1	0,6296	0,4443	25,24160	1,674
V	4,79435	1	0,1196	0,7360	4,79435	0,318
$t \times S_z$	13,76878	1	0,3434	0,5697	13,76878	0,913
$t \times V$	68,79877	1	1,7161	0,2169	68,79877	4,563
$S_z \times V$	4,68792	1	0,1169	0,7388	4,68792	0,311
Залишок	441,0035	11			40,091	29,247
Разом	1507,8741					100,000
r_L						
t	9,65069	1	0,2292	0,6415	9,65069	0,582
S_z	326,01060	1	7,7418	0,0178	326,01060	19,661
V	26,34996	1	0,6257	0,4456	26,34996	1,589
$t \times S_z$	470,48911	1	11,1728	0,0066	470,48911	28,375
$t \times V$	49,70284	1	1,1803	0,3005	49,70284	2,998
$S_z \times V$	312,70003	1	7,4257	0,0198	312,70003	18,859

Залишок	463,2145	11			42,110	27,936
Разом	1658,1177	17				100,000
r_R						
t	20,5013	1	0,2303	0,6407	20,5013	0,616
S_z	873,2332	1	9,8073	0,0095	873,2332	26,219
V	203,1987	1	2,2821	0,1591	203,1987	6,101
$t \times S_z$	127,5573	1	1,4326	0,2565	127,5573	3,830
$t \times V$	50,4218	1	0,5663	0,4675	50,4218	1,514
$S_z \times V$	1076,2016	1	12,0869	0,0052	1076,2016	32,313
Залишок	979,4278	11			89,039	29,407
Разом	3330,5417	17				100,000

Результати дисперсійного аналізу показників геометричної точності пазів для
фрези діаметром 1 мм

Фактор	Сума квадратів відхилень SS	Число ступенів вільності df	Критерій Фішера F	р-значення для F-критерію $p > F$	Середній квадрат MS	Внесок, %
Δb						
t	11345,050	1	52,6613	<0,0001	11345,050	78,125
S_z	138,829	1	0,6444	0,4391	138,829	0,956
V	272,110	1	1,2631	0,2850	272,110	1,874
$t \times S_z$	0,197	1	0,0009	0,9764	0,197	0,001
$t \times V$	119,316	1	0,5538	0,4724	119,316	0,822
$S_z \times V$	276,466	1	1,2833	0,2814	276,466	1,904
Залишок	2369,777	11			215,43	16,319
Разом	14521,744	17				100,000
Δh						
t	11,279667	1	14,0394	0,0032	11,279667	30,233
S_z	0,490456	1	0,6105	0,4511	0,490456	1,315
V	8,820245	1	10,9782	0,0069	8,820245	23,641
$t \times S_z$	0,072696	1	0,0905	0,7692	0,072696	0,195
$t \times V$	7,795632	1	9,7029	0,0098	7,795632	20,895
$S_z \times V$	0,012960	1	0,0161	0,9012	0,012960	0,035
Залишок	8,837735	11			0,80343	23,688
Разом	37,309393	17				100,000
b_{min}						
t	26506,457	1	55,8349	<0,0001	26506,457	79,265
S_z	96,549	1	0,2034	0,6608	96,549	0,289
V	940,189	1	1,9805	0,1870	940,189	2,812
$t \times S_z$	15,017	1	0,0316	0,8621	15,017	0,045
$t \times V$	9,409	1	0,0198	0,8906	9,409	0,028
$S_z \times V$	650,865	1	1,3710	0,2664	650,865	1,946

Залишок	5222,024	11			474,73	15,616
Разом	33440,509	17				100,000
b_{max}						
t	3169,1149	1	25,9886	0,0003	3169,1149	65,109
S_z	3,8284	1	0,0314	0,8626	3,8284	0,079
V	200,6963	1	1,6458	0,2259	200,6963	4,123
$t \times S_z$	11,7731	1	0,0965	0,7618	11,7731	0,242
$t \times V$	61,7123	1	0,5061	0,4917	61,7123	1,268
$S_z \times V$	78,9396	1	0,6473	0,4381	78,9396	1,622
Залишок	1341,3699	11			121,943	27,558
Разом	4867,4345	17				100,000
h_{min}						
t	22982,322	1	11268,16	<0,0001	22982,322	99,846
S_z	0,460	1	0,2254	0,6442	0,460	0,002
V	5,047	1	2,4743	0,1440	5,047	0,022
$t \times S_z$	1,443	1	0,7074	0,4182	1,443	0,006
$t \times V$	5,307	1	2,6019	0,1350	5,307	0,023
$S_z \times V$	0,756	1	0,3706	0,5550	0,756	0,003
Залишок	22,435	11			2,04	0,097
Разом	23017,769	17				100,000
h_{max}						
t	24011,900	1	13648,94	<0,0001	24011,900	99,897
S_z	1,900	1	1,0800	0,3210	1,900	0,008
V	0,523	1	0,2975	0,5964	0,523	0,002
$t \times S_z$	2,163	1	1,2296	0,2911	2,163	0,009
$t \times V$	0,239	1	0,1356	0,7197	0,239	0,001
$S_z \times V$	0,571	1	0,3245	0,5804	0,571	0,002
Залишок	19,352	11			1,76	0,081
Разом	24036,648	17				100,000
α_L						
t	1035,2160	1	19,5317	0,0010	1035,2160	48,602
S_z	275,3292	1	5,1947	0,0436	275,3292	12,926
V	166,7534	1	3,1462	0,1038	166,7534	7,829
$t \times S_z$	35,2193	1	0,6645	0,4323	35,2193	1,653
$t \times V$	14,6855	1	0,2771	0,6091	14,6855	0,689
$S_z \times V$	19,7632	1	0,3729	0,5538	19,7632	0,928
Залишок	583,0208	11			53,002	27,372
Разом	2129,9873	17				100,000
α_R						
t	698,83157	1	9,0621	0,0119	698,83157	23,353
S_z	890,08465	1	11,5422	0,0060	890,08465	29,744
V	127,32265	1	1,6511	0,2252	127,32265	4,255

$t \times S_z$	377,81107	1	4,8993	0,0489	377,81107	12,625
$t \times V$	47,29858	1	0,6133	0,4501	47,29858	1,581
$S_z \times V$	2,90646	1	0,0377	0,8496	2,90646	0,097
Залишок	848,2723	11			77,116	28,346
Разом	2992,5272	17				100,000
r_L						
t	921,4495	1	8,1791	0,0155	921,4495	20,520
S_z	29,0723	1	0,2581	0,6215	29,0723	0,647
V	609,5295	1	5,4104	0,0401	609,5295	13,574
$t \times S_z$	75,1200	1	0,6668	0,4315	75,1200	1,673
$t \times V$	1616,0195	1	14,3444	0,0030	1616,0195	35,988
$S_z \times V$	0,0049	1	0,0000	0,9949	0,0049	0,000
Залишок	1239,2453	11			112,659	27,597
Разом	4490,4410	17				100,000
r_R						
t	1269,0218	1	8,8243	0,0127	1269,0218	23,904
S_z	31,9056	1	0,2219	0,6468	31,9056	0,601
V	256,0774	1	1,7807	0,2090	256,0774	4,824
$t \times S_z$	1196,0233	1	8,3167	0,0149	1196,0233	22,529
$t \times V$	973,6567	1	6,7704	0,0246	973,6567	18,340
$S_z \times V$	0,2282	1	0,0016	0,9689	0,2282	0,004
Залишок	1581,9145	11			143,81	29,798
Разом	5308,8275	17				100,000

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття опублікована у журналі, що індексується в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science

1. Balytska, N. O., Tomashevskiy, O. O., & Shadura, V. A. (2025). Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling. *Journal of Engineering Sciences*, 12(1), A20–A27. DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3)

Загальний обсяг 0.9 друк. арк., особисто автору належить 0.4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у виконанні скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплавів NiTi, визначенні сил різання та температурних полів, аналізі результатів моделювання, підготовці графічних матеріалів.

Статті у наукових виданнях, включених на дату опублікування до переліку наукових фахових видань України:

2. Томашевський, О. О., & Балицька, Н. О. (2023). Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд. *Технічна інженерія*, 2(92), 74–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88).

Загальний обсяг 1.6 друк. арк., особисто автору належить 0.8 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у проведенні аналізу наукових джерел з проблематики мікрофрезерування металів і сплавів, узагальненні результатів досліджень та підготовці основної частини рукопису статті.)

3. Томашевський, О. О., Балицька, Н. О., & Прилипко, О. І. (2024). Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу. *Технічна інженерія*, 1(93), 81–88. DOI: [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88).

Загальний обсяг 0.7 друк. арк., особисто автору належить 0.3 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у розробленні скінченно-елементної моделі процесу мікрофрезерування нітинолу, постановці задачі моделювання, аналізі сил різання та температурних полів, обробці отриманих результатів, підготовці графічних матеріалів.

4. Балицька Н.О., Томашевський О.О. (2025) Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах на основі скінченно-елементного моделювання. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*, 351 (3.1), 35-43. – DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-351-4>.

Загальний обсяг 0.9 друк. арк., особисто автору належить 0.4 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у проведенні скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах, визначенні сил різання та температурних полів, виконанні порівняльного аналізу отриманих результатів і підготовці графічного матеріалу.

5. Томашевський, О. О. (2026). Експериментальна оцінка вібрацій у процесі мікрофрезерування титанового сплаву. Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences, 363(2), 649–657. DOI: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-85>. (заг. обсяг 0.8 друк. арк.)

Список публікацій, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

1. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Механізм стружкоутворення при мікрофрезеруванні. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: Збірник наукових праць XII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 9–10 листопада 2023 року. – Житомир : Державний університет «Житомирська політехніка», 2023. С 104 – 105 с. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2023/12/povnyj-tekst-1.pdf>.

Загальний обсяг 0.12 друк. арк., особисто автору належить 0.07 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі механізмів стружкоутворення при мікрофрезеруванні та підготовці матеріалів доповіді.

2. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Утворення задирок при мікрофрезеруванні нітинолу. Тези доп. Всеукр. наук.-практ. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2024. С. 125-126. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2024/06/sekcija-6.pdf>.

Загальний обсяг 0.13 друк. арк., особисто автору належить 0.08 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в аналізі причин утворення задирок під час мікрофрезерування нітинолу та підготовці висновків.

3. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Проблеми скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 24-ої Міжнародної науково-технічної конференції, 26–27 червня 2024 р. – Київ: АТМ України, 2024. С. 125 – 127. - URL: https://www.atmu.net.ua/downloads/archive/2-24sb_compressed.pdf.

Загальний обсяг 0.14 друк. арк., особисто автору належить 0.07 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в літературному аналізі та підготовці матеріалів доповіді.

4. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Особливості процесу мікрофрезерування. Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: Матеріали 25-го Міжнародного науково-технічного семінару, 25–26 березня 2025 р. – Київ: АТМ України, 2025. С. 158 – 160. - URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/sb1-25s.pdf>.

Загальний обсяг 0.14 друк. арк., особисто автору належить 0.07 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в узагальненні теоретичних положень щодо процесу мікрофрезерування, аналізі впливу масштабного ефекту на процес різання.

5. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Масштабний ефект при мікрофрезеруванні нітинолів. Тези Всеукраїнської науково-практичної on-line конференції здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки, 12-17 травня 2025 року. Житомир: «Житомирська політехніка», 2025. С.121. – URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/6.pdf>.

Загальний обсяг 0.09 друк. арк., особисто автору належить 0.05 друк. арк.: особистий внесок автора полягає в дослідженні впливу співвідношення товщини зрізаного шару та радіуса округлення різальної кромки на процес мікрофрезерування сплавів NiTi та аналізі отриманих результатів.

6. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Сили і температури різання при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплаву NiTi. Інженерія поверхні та реновація виробів: Матеріали 25-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 10-12 червня 2025 року. Київ : АТМ України, 2025. С. 102-104. – URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/2-25zb.pdf>.

Загальний обсяг 0.08 друк. арк., особисто автору належить 0.05 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у проведенні скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування сплавів NiTi, визначенні сил різання та температурних полів для різних фазових станів матеріалу й аналізі отриманих результатів.

7. Томашевський О.О., Балицька Н.О. Питомі сили різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. Процеси механічної обробки, верстати та інструмент: Матеріали XIII Всеукраїнської науково-технічної конференції з міжнародною участю, 11–13 листопада 2025 року. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2025. С. 128 – 129 с. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/12/128-1.pdf>.

Загальний обсяг 0.11 друк. арк., особисто автору належить 0.06 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у визначенні питомих сил різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi на основі результатів скінченно-елементного моделювання та аналізі прояву масштабного ефекту.

8. Томашевський О.О. Вібрації при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. Сучасні питання виробництва і ремонту в промисловості та на транспорті: Матеріали 26-го Міжнародного науково-технічного семінару, 31 березня – 02 квітня 2025 р. – Київ: АТМ України, 2026. С. 129 – 131. - URL: <https://atmu.net.ua/downloads/archive/sl-26c.pdf>. (заг. обсяг 0.13 друк. арк.)

9. Томашевський О.О., Оліщук Н.О. Фактори, що впливають на якість пазів при мікрофрезеруванні сплавів NiTi. Тези доп. Всеукр. наук.-практ. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки. – Житомир: Державний університет «Житомирська політехніка», 2026. С. 259-260. - URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2026/06/sekcija-6.pdf>.

Загальний обсяг 0.1 друк. арк., особисто автору належить 0.08 друк. арк.: особистий внесок автора полягає у дослідженні факторів, що впливають на якість пазів, аналізі експериментальних результатів.

Звіт подібності дисертації
Томашевського Олега Олеговича
«Технологічне забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану
при мікрофрезеруванні»



Звіт не був оцінений

Метадані

ДОКУМЕНТ

Заголовок

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ПАЗІВ НА ПОВЕРХНЯХ ВИРОБІВ З НІКЕЛІДУ ТИТАНУ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ

Автор

ОЛЕГ ОЛЕГОВИЧ ТОМАШЕВСЬКИЙ

Науковий керівник / Експерт

Zhytomyr Polytechnic

ІД документу

334179234

ОРГАНІЗАЦІЯ

Назва організації

State University "Zhytomyr Polytechnic"

підрозділ

State University "Zhytomyr Polytechnic"

ЗВІТ

Дата звіту

6/4/2026

Дата редагування

Обсяг знайдених подібностей

Коефіцієнт подібності визначає, який відсоток тексту по відношенню до загального обсягу тексту було знайдено в різних джерелах. Зверніть увагу, що високі значення коефіцієнта не автоматично означають плагіат. Звіт має аналізувати компетентна / уповноважена особа.



25

Довжина фрази для коефіцієнта подібності 2

31418

Кількість слів

241318

Кількість символів

Тривога

У цьому розділі ви знайдете інформацію щодо текстових спотворень. Ці спотворення в тексті можуть говорити про МОЖЛИВІ маніпуляції в тексті. Спотворення в тексті можуть мати навмисний характер, але частіше характер технічних помилок при конвертації документа та його збереженні, тому ми рекомендуємо вам підходити до аналізу цього модуля відповідально. У разі виникнення запитань, просимо звертатися до нашої служби підтримки.

Заміна букв		80
Інтервали		0
Мікропробіли		0
Білі знаки		0
Парафрази (SmartMarks)		35

Джерела

Нижче наведений список джерел. В цьому списку є джерела із різних баз даних. Колір тексту означає в якому джерелі він був знайдений. Ці джерела і значення Коефіцієнту Подібності не відображають прямого плагіату. Необхідно відкрити кожне джерело і проаналізувати зміст і правильність оформлення джерела.

10 найдовших фраз

Колір тексту

#	НАЗВА ТА АДРЕСА ДЖЕРЕЛА URL (НАЗВА БАЗИ)	КІЛЬКІСТЬ ІДЕНТИЧНИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
1	мікрофрезерування.pdf 10/26/2023	190 (0.6 %)

State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")		
2	мікрофрезерування.pdf 10/26/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	122 (0.39 %)
3	мікрофрезерування.pdf 10/26/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	92 (0.29 %)
4	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	86 (0.27 %)
5	мікрофрезерування.pdf 10/26/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	78 (0.25 %)
6	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	55 (0.18 %)
7	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	51 (0.16 %)
8	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	21 (0.07 %)
9	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	21 (0.07 %)
10	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	18 (0.06 %)
Домашня база даних (1.59 %)		
#	ЗАГОЛОВОК	кількість ідентичних слів (фрагментів)
1	мікрофрезерування.pdf 10/26/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	487 (5) (1.55 %)
2	Кравчук_дисер.docx 9/21/2023 State University "Zhytomyr Polytechnic" (State University "Zhytomyr Polytechnic")	12 (2) (0.04 %)
Програма обміну базами даних (0.1 %)		
#	ЗАГОЛОВОК	кількість ідентичних слів (фрагментів)
3	ДП25_Рибченко Є.О._ОВ-21-1 6/19/2025 Oles Honchar Dnipro National University (DNUOH)	19 (2) (0.06 %)
4	Підвищення якості утвореної поверхні при фрезеруванні кінцевими фрезами 12/18/2025 National Technical University of Ukraine Igor Sikorskyi Kyiv Politech Institute (MMI, K-ра технології машинобудування)	12 (2) (0.04 %)
Інтернет (1.32 %)		
#	ДЖЕРЕЛО URL	кількість ідентичних слів (фрагментів)
5	https://eztui.r.ztu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/8582/1/81.pdf	325 (12) (1.03 %)
6	http://eztui.r.ztu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/7343/Glembotska.pdf?sequence=1&isAllowed=y	22 (3) (0.07 %)
7	https://uni-sport.edu.ua/sites/default/files/vseDocumenti/blazhko_recenziya_dyachenko_a_yu.pdf	16 (1) (0.05 %)

8	https://ztu.edu.ua/ua/study/files/license/071_vidomosti-phd.pdf	13 (1) (0.04 %)
9	http://dm.inf.ua/_28/28.%202007.pdf	11 (1) (0.04 %)
10	https://npu.edu.ua/images/file/vidil_aspirant/avtoref/D_26.053.08/aref_Zaitseva.pdf	10 (1) (0.03 %)
11	https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2019/11/zbirka.pdf	10 (1) (0.03 %)
12	http://referatu.net.ua/referats/7569/145133	9 (1) (0.03 %)

Список прийнятих фрагментів

#	ЗМІСТ	КІЛЬКІСТЬ ОДНАКОВИХ СЛІВ (ФРАГМЕНТІВ)
---	-------	---------------------------------------