

БАЛИЦЬКА НАТАЛІЯ

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>e-mail: tmkts_nno@ztu.edu.ua**ТОМАШЕВСЬКИЙ ОЛЕГ**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-2639-1866>e-mail: kmi_too@ztu.edu.ua

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИЛ І ТЕМПЕРАТУР РІЗАННЯ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВІВ NITi В АУСТЕНИТНОМУ ТА МАРТЕНСИТНОМУ ФАЗОВИХ СТАНАХ НА ОСНОВІ СКІНЧЕННО- ЕЛЕМЕНТНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

На сьогодні мікрофрезерування активно застосовується в багатьох галузях промисловості через стрімко зростаючий попит на мініатюрні високоточні вироби. Порівняно зі звичайним фрезеруванням мікрофрезерування характеризується значно складнішими умовами стружкоутворення та кардинально вищими питомими силами різання. Низька оброблюваність сплавів NiTi спричиняє високі питомі енергії різання, сили та температури різання, інтенсивне зношування інструменту та надмірне утворення заусенців при мікрофрезеруванні. Кристалографічна структура та фізико-механічні властивості сплаву NiTi залежать від його фазового стану і впливають на характеристики процесу різання. Метою роботи є порівняльний аналіз сил та температур різання, а також дослідження залежності питомої сили різання від масштабного коефіцієнта при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплавів NiTi за допомогою скінченно-елементного моделювання. Для дослідження було застосовано скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування пазів на заготовках із сплавів NiTi фрезою діаметром 0,5 мм при змінних режимах різання в програмному середовищі DEFORM-3D. Адекватність розробленої скінченно-елементної моделі підтверджена порівнянням результатів моделювання і експериментальних досліджень сил різання. Отримано закономірності зміни складових сил і температур різання залежно від значення подачі, а також залежності питомих сил різання залежно від масштабного коефіцієнта. Порівняльний аналіз даних дозволив встановити тенденції зміни сил і температур різання при змінних умовах обробки сплаву NiTi в аустенітному і мартенситному фазовому стані, що має практичне значення для обґрунтованого призначення режимів різання. Отримані результати сприятимуть підвищенню ефективності виготовлення виробів з мікроелементами та вдосконаленню технологій мікрофрезерування сплавів NiTi.

Ключові слова: технології мікрорізання, мікрофреза, аустеніт, мартенсит, масштабний коефіцієнт.

BALYTSKA NATALIYA**TOMASHEVSKYI OLEH**

Zhytomyr Polytechnic State University

COMPARATIVE ANALYSIS OF CUTTING FORCES AND TEMPERATURES IN MICRO- MILLING OF AUSTENITIC AND MARTENSITIC NITi ALLOYS BASED ON FINITE ELEMENT MODELLING

Today, micromilling is actively used in many industries due to the rapidly growing demand for miniature, high-precision products. Compared to conventional milling, micromilling is characterised by much more difficult chip formation conditions and dramatically higher specific cutting forces. The low machinability of NiTi alloys results in high specific cutting energy, cutting forces and temperatures, high tool wear and excessive burr formation during micromilling. The crystallographic structure and the physical and mechanical properties of the NiTi alloy depend on its phase state and influence the characteristics of the cutting process. This article compares the physical, mechanical and functional properties of austenitic and martensitic NiTi alloys. The aim of the work is to compare cutting forces and temperatures and to investigate the dependence of the specific cutting force on the scale coefficient during micromilling of austenitic and martensitic NiTi alloys using finite element modelling. For the investigation, finite element modelling of the process of micromilling grooves on NiTi alloy workpieces with a 0.5 mm diameter milling cutter under variable cutting conditions was applied in the DEFORM-3D software environment. The adequacy of the developed finite element model was confirmed by comparing the results of modelling and experimental measurements of cutting forces. The dependence of the components of the cutting forces and cutting temperatures on the feed rate and the dependence of the specific cutting forces on the scale factor were obtained. A comparative analysis of the data made it possible to identify trends in the variation of cutting forces and temperatures under variable machining conditions for NiTi alloy in the austenitic and martensitic phase state, which is of practical importance for the justified selection of cutting conditions. The results obtained will help to increase the efficiency of manufacturing products with micro-elements and improve the technology of micro-milling of NiTi alloys.

Keywords: microcutting technology, micro milling cutter, austenite, martensite, scale coefficient.

Стаття надійшла до редакції / Received 11.04.2025

Прийнята до друку / Accepted 26.04.2025

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Мікрофрезерування є однією з найбільш універсальних технологій мікрообробки металів і сплавів, що дозволяє виготовляти мініатюрні конструктивні елементи високої точності та складної

геометрії [1]. Останнім часом ця технологія набуває все більшого поширення для обробки сплавів з пам'яттю форми, зокрема NiTi, який широко застосовується в біомедичній, аерокосмічній та мікроелектромеханічній галузях. Однак через високе деформаційне зміцнення, низьку теплопровідність, високу питому теплоємність і низький ефективний модуль пружності різання цього матеріалу супроводжується інтенсивним зношуванням інструменту, високими силами та температурами різання, несприятливими умовами стружкоутворення і стружковідведення, надмірним утворенням заусенців тощо [2, 3]. Одним із ключових факторів, що визначає характеристики процесу різання NiTi, є фазовий стан матеріалу [4]. Сплав NiTi в аустенітному чи мартенситному фазовому стані має різну кристалографічну структуру та фізико-механічні властивості, що безпосередньо впливає на значення сил та температур різання, стійкість інструменту тощо.

На сьогодні відсутні ґрунтовні дослідження впливу фазового стану сплаву NiTi на силові та температурні характеристики при мікрорізанні. Така невизначеність ускладнює розробку ефективних технологій мікрофрезерування нітинолів та зумовлює необхідність досліджень в цьому напрямку. Розробка скінченно-елементної моделі (СЕМ) процесу мікрофрезерування сплавів NiTi в різних фазових станах дозволяє прогнозувати сили та температури різання без необхідності проведення великої кількості дорогавартісних та складних експериментів [5].

При мікрофрезеруванні NiTi мають місце специфічні ефекти, які визначають особливості цього процесу різання. Ефект мінімальної товщини зрізу проявляється у різкому підвищенні сил різання, коли подача на зуб стає меншою за критичне значення товщини зрізу, що змінює механізм різання. У таких випадках матеріал не зрізається, а деформується, що знижує ефективність обробки та може призвести до утворення дефектів на поверхні. Цей ефект, у свою чергу, пов'язаний з масштабним ефектом. При зменшенні розмірів різального інструменту або глибини різання, питома сила, що діє на одиницю об'єму матеріалу, зростає через більшу частку пластичних деформацій і мікроруйнувань порівняно зі звичайним різанням. Це відбувається тому, що при малих розмірах контактної зони інструмента з матеріалом значний вплив мають мікроструктурні неоднорідності, такі як розташування зерен, міжзернові зв'язки та мікротріщини.

Врахування вищезгаданих ефектів процесу мікрофрезерування і особливостей оброблюваності нітинолів є надзвичайно важливим для розробки ефективних технологій їх мікрофрезерування для різних галузей промисловості. Тому розробка СЕМ процесу мікрофрезерування сплавів NiTi в різних фазових станах, що дозволить визначити сили та температурами різання, залежність питомої сили різання від масштабного коефіцієнта, а також рекомендоване співвідношення радіуса заокруглення різальної кромки мікрофрези до мінімальної товщини зрізу, є важливою науково-технічною задачею.

Аналіз досліджень та публікацій

Проблеми механічної обробки сплавів NiTi [2, 4, 6], зокрема мікрофрезеруванням [3, 5, 7], активно досліджуються в останні десятиліття. Однак питання залежності сил і температур різання під час мікрофрезерування від фазового стану оброблюваного сплаву NiTi, залишаються недостатньо вивченими.

Фізико-механічні та функціональні властивості аустенітного та мартенситного сплавів NiTi наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика фізико-механічних та функціональних властивостей аустенітного та мартенситного сплавів NiTi [2, 6, 8]

Властивість	Аустенітний NiTi (високотемпературна фаза)	Мартенситний NiTi (низькотемпературна фаза)
Кристалічна структура	Кубічна об'ємноцентрована (В2)	Моноклінна (В19)
Густина (г/см ³)	≈ 6,45	≈ 6,45
Температура фазового переходу (°C)	Вище за A_f^* (≈ 20–100 °C)	Ниже за M_f^{**} (≈ -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

Продовження таблиці 1		
Властивість	Аустенітний NiTi (високотемпературна фаза)	Мартенситний NiTi (низькотемпературна фаза)
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

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

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

На рис. 1 представлено мікроструктуру сплаву NiTi у двох фазових станах, які демонструють характерні особливості будови кожної фази. Аустенітна мікроструктура (рис. 1а) характеризується чіткими межами зерен, мартенситна фаза (рис. 1б) — вираженою пластинчастою структурою з характерними зонами розділення та перетворення зерен.

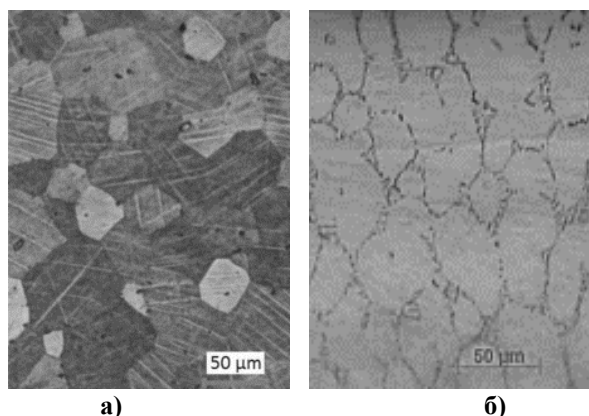


Рис. 1. Мікроструктура сплаву: а) – Ni_{50,8}Ti_{49,2} в аустенітному стані [2]; б) – Ni₅₅Ti₄₅ в мартенситному стані [9]

Відомо про окремі дослідження процесу мікрофрезерування аустенітного та мартенситного сплавів NiTi [9–12] із заданим хімічним складом, в яких визначалися оптимальні режими різання, що забезпечували зниження сил різання та утворення заусенців [13], підвищення зносостійкості інструменту та покращення якості обробленої поверхні в кожному конкретному випадку.

Автори [11] виявили, що висока пластичність аустенітного NiTi в поєднанні з сильною адгезійною здатністю робить процес мікрофрезерування складним. Було запропоновано при застосуванні кінцевих фрез діаметром 0,4 мм обмежувати глибину різання 10 мкм, подачу на зуб 12 мкм, швидкість різання 47 м/хв та використовувати мінімальну кількість мастила (при цьому активна складова сили різання досягала 14 Н). Автори встановили, що висока швидкість подачі в поєднанні з відносно великою шириною різання сприяє кращому утворенню стружки, що призводить до зростання стійкості інструменту та покращення якості обробки.

Для ефективного мікрофрезерування аустенітного NiTi товщина зрізу повинна бути не менше 30% від радіуса кромки інструменту при рекомендованих режимах різання (подача на зуб 0,5 мкм, глибина різання 25 мкм, швидкість різання від 5 м/хв) [12].

При мікрофрезеруванні мартенситного сплаву NiTi в роботі [9] рекомендується одночасне застосування охолодженого повітря та мінімальної кількості мастила для зниження сили різання та зносу бокової поверхні, а також значного зменшення ширини заусенців.

Температура різання відіграє важливе значення у процесі мікрофрезерування нітинолів, оскільки високі температури можуть негативно впливати на якість обробленої поверхні та знижувати стійкість інструмента. Однак літературний огляд свідчить про відсутність достатньої кількості досліджень цього питання. Зокрема в роботі [14] застосовувався метод термопари для вимірювання

температури різання при ортогональному точінні аустенітного сплаву NiTi. Було встановлено, що температура різання зростала від 500 до 950 °C при збільшенні швидкості різання від 5 до 100 м/хв. Як стверджують автори, високе внутрішнє тертя і стійкість до деформації є причинами високої температури під час різання сплаву NiTi.

Одним із основних характеристик процесу різання є питома сила різання, яка характеризує силу, що виникає при взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом, і вимірюється на одиницю площі контакту. На сьогоднішній день існує обмежена кількість наукової літератури, присвяченої дослідженню питомих сил різання при лезовій обробці сплавів NiTi. Так, в роботі [15] експериментально встановлено відмінність питомих сил різання при точінні сплавів NiTi в різних фазових станах. Наприклад, питома сила різання при точінні аустенітного $\text{Ni}_{51}\text{Ti}_{49}$ досягає 5000 Па, а при точінні мартенситного $\text{Ni}_{50}\text{Ti}_{50}$ – 3000 Па. Автори [9] досліджували вплив масштабного ефекту на питомі сили різання при мікрофрезеруванні мартенситного сплаву $\text{Ni}_{55}\text{Ti}_{45}$ за допомогою кінцевої фрези діаметром 0,5 мм з середнім радіусом різальної кромки, який становив 0,99 мкм. Було встановлено, що питомі сили різання збільшуються із зменшенням масштабного коефіцієнту k_m і складають 1625 ГПа при $k_m = 0,4$. Для порівняння питомі сили різання при $k_m = 3$ досягають 100 ГПа. Автори пояснюють це масштабним ефектом, при якому зменшення розміру ділянки контакту збільшує опір матеріалу до фазових перетворень, що в свою чергу збільшує питомі сили різання при менших глибинах різання.

На сьогодні відомо про дуже обмежену кількість робіт із СЕМ процесів механічної обробки NiTi [6, 16], особливо при мікрофрезеруванні [5, 17]. Значні труднощі при проведенні СЕМ зумовлені неповнотою інформації про значення параметрів рівняння поведінки оброблюваного матеріалу та параметрів моделі його руйнування в залежності від фазового складу.

Вплив режимів різання на процес точіння аустенітного сплаву NiTi досліджено в роботі [6]. Процес ортогональної обробки був змодельований на основі СЕМ з використанням програмного забезпечення ANSYS/LS-DYNA. Експеримент показав, що сили різання досягали максимальних значень близько 180 Н при швидкості подачі 0,05 мм, глибині різання 0,2 мм та швидкості різання 20 і 180 м/хв. На основі СЕМ автори встановили, що при швидкості різання 109 м/хв результуюче напруження було найнижчим – близько $3,6 \cdot 10^9$ Н/м². У роботі [16] представлені результати СЕМ процесу ортогонального різання аустенітного сплаву NiTi, яке виконувалося в DEFORM 2D. Автори встановили, що при підвищенні швидкості різання від 12,5 до 100 м/хв максимальна температура різання зростала від 358 до 1140 °C, а середня сила різання змінювалася від 189 до 222 Н.

Попередня робота авторів [5] була присвячена розробці спрощеної скінченно-елементної моделі обробки пазу на заготовці з аустенітного сплаву NiTi двозубою кінцевою мікрофрезою діаметром 1 мм, при швидкості різання 20 м/хв, глибині різання 0,2 мм та подачі на зуб 0,003 мм. Скінченно-елементна модель процесу була розроблена за допомогою програми DEFORM-3D. Адекватність розробленої моделі підтверджена порівнянням з результатами експериментальних вимірювань сил різання для аналогічних умов обробки. В результаті проведених досліджень було визначено часові реалізації складових сил різання. Встановлено, що максимальне значення сили P_x досягає 34 Н, P_y – 47 Н, і P_z – 12 Н.

В результаті літературного огляду не було виявлено робіт, присвячених дослідженню процесу мікрофрезерування мартенситного сплаву NiTi, та робіт щодо порівняльного аналізу сил та температур різання в залежності від фазового складу NiTi, що зумовлює необхідність таких досліджень.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є порівняльний аналіз сил та температур різання, а також дослідження залежності питомих сил різання від масштабного коефіцієнта при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплавів NiTi за допомогою скінченно-елементного моделювання.

Виклад основного матеріалу

За допомогою спеціального інженерного програмного комплексу DEFORM-3D було проведено СЕМ процесу сухого мікрофрезерування пазів на заготовках із сплавів NiTi аустенітного і мартенситного фазового складу. Методика розробки скінченно-елементної моделі процесу детально описана в попередній роботі авторів [5]. З метою економії розрахункових ресурсів в програмі SolidWorks були розроблені спрощені 3D-моделі мікрофрези та заготовки з попереднім вирізом (рис. 2).

Адекватність розробленої моделі підтверджено порівнянням з результатами експериментальних вимірювань сил різання для аналогічних умов обробки [5]. Дана робота являє собою порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні аустенітного і мартенситного сплавів NiTi на основі даних попереднього дослідження авторів [17] (аустенітний фазовий стан) та нових результатів моделювання (мартенситний фазовий стан).

СЕМ проводилося для наступних умов: інструмент – твердосплавна двозуба мікрофреза діаметром 0,5 мм [18], радіус заокруглення різальної кромки фрези – 10 мкм, швидкість різання 20 м/хв, глибина різання 0,03 мм, подача 0,001...0,02 мм/зуб. Значення подач для моделювання перевищують практично досяжні і обиралися таким чином, щоб оцінити тенденції зміни сил і температур різання в широкому діапазоні значень.

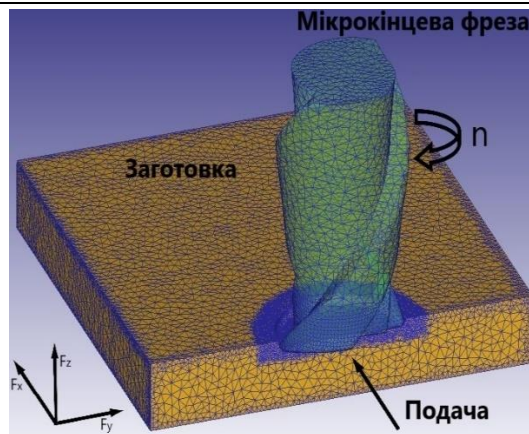


Рис. 2. Схема мікрофрезерування пазу

Параметри моделі поведінки матеріалу заготовки (табл. 2) були взяті з бази даних DEFORM-3D та робіт [4, 19, 20].

Таблиця 2

Параметри моделі поведінки матеріалу заготовки

Параметр	Аустенітний NiTi	Мартенситний NiTi
Деформація, %	0 – 0,6	
Швидкість деформації, 1/с	0,001 – 10	
Температура, °C	850 – 1100	
Твердість (HV)	310	220
Модуль Юнга, МПа	83000	41000
Коефіцієнт Пуассона	0,3	
Початкова температура, °C	20	
Теплопровідність, Вт/(м·К)	18	8,6
Теплоємність, Дж/(г·°C)	0,837	0,320
Коефіцієнт теплового випромінювання	0,7	
Густина, г/м ³	6,45	

Результати моделювання сил різання при мікрофрезеруванні паза в заготовці із сплаву NiTi в аустенітнітному фазовому стані (а-NiTi) та мартенситному фазовому стані (м-NiTi) наведені на рис. 3.

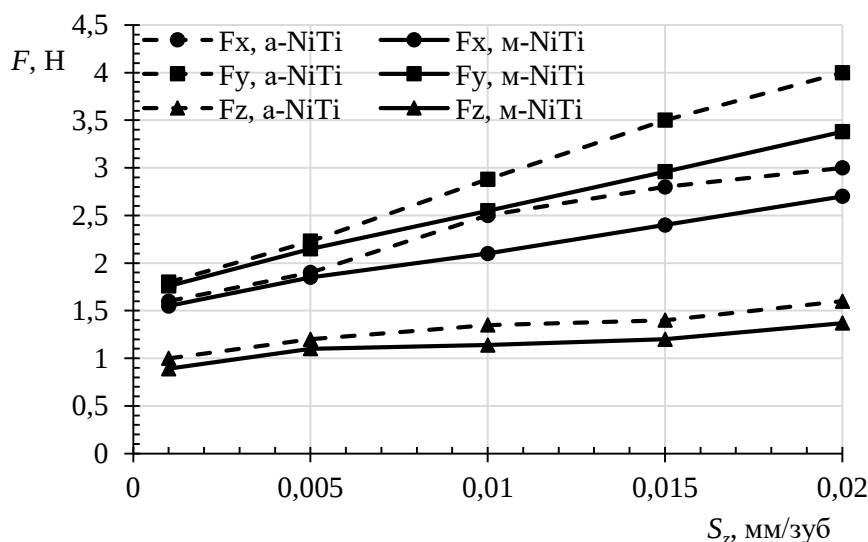


Рис. 3. Сили різання при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного сплавів NiTi

Як видно з рис. 3 вищі сили різання спостерігаються при обробці аустенітного сплаву NiTi, при цьому всі складові сил різання на 15,5...16% вищі, порівняно з мартенситним сплавом. Це можна пояснити тим, що у мартенситного сплаву NiTi твердість, границя міцності та модуль пружності менші, ніж у аустенітного. Загальні тенденції залежності сил різання від подачі виглядають закономірними та відповідають результатам [9], зокрема щодо домінуючої складової сили різання F_y та її значення.

В результаті СЕМ було отримано дані щодо максимальних температур в зоні контактної взаємодії (рис. 4), в залежності від подачі на зуб.

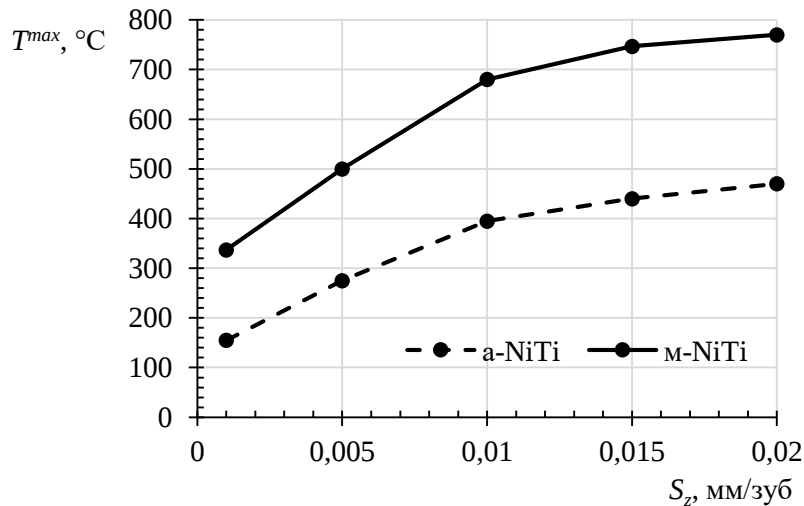


Рис. 4. Залежність температури різання від подачі (час різання – 14 мс)

На рис. 5 наведено температурні поля в зоні різання при подачі на зуб 0,001 мм/зуб через 14 мс різання при мікрофрезеруванні аустенітного та мартенситного NiTi.

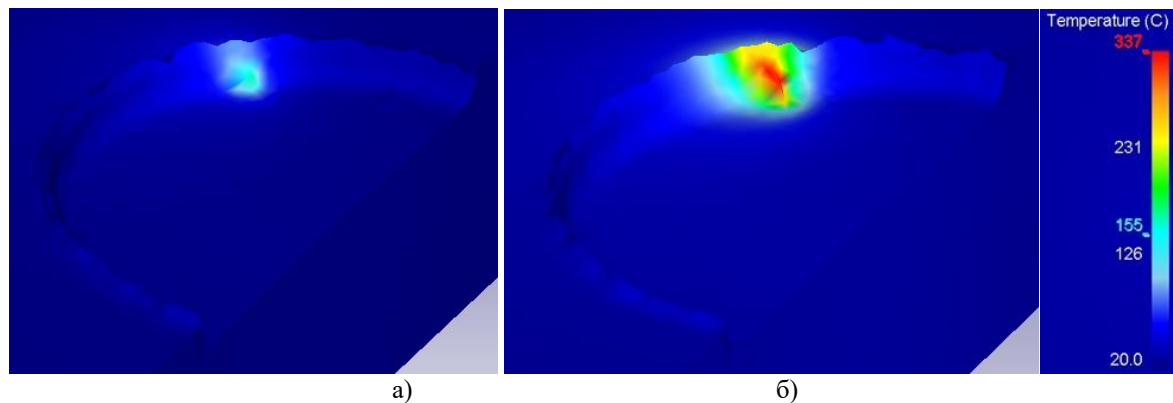


Рис. 5. Температурні поля в зоні різання: а) – аустенітний NiTi, б) – мартенситний NiTi

Аналіз отриманих даних щодо температур різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi (рис. 4) свідчить про тісну кореляцію із значенням подачі. Також було встановлено, що при мікрофрезеруванні мартенситного сплаву NiTi максимальна температура різання до 50% більша за температуру для аустенітного сплаву (рис. 4, 5). Це пов'язано з різними тепловими характеристиками нітинолу в аустенітній та мартенситній фазі (табл. 1). Через відсутність літературних даних неможливо порівняти отримані результати з даними інших авторів. Разом з тим виявлено узгодженість отриманих даних з результатами для ортогонального різання аустенітного NiTi [14]. Оскільки NiTi характеризуються високою схильністю до фазових перетворень, критично важливо забезпечити контроль температури різання. Це можна досягти за рахунок ефективного охолодження зони різання, як рекомендовано в роботах [9, 14] та вибору оптимальних режимів обробки.

Отримані значення складових сил різання дозволили визначити питомі сили різання для різних значень масштабного коефіцієнта (рис. 6). Питому силу різання визначалася за виразом:

$$k_c = \frac{F_p}{A}, \quad (1)$$

де F_p – рівнодійна сила різання ($F_p = \sqrt{F_x^2 + F_y^2 + F_z^2}$), A – площа зрізу ($A = t \cdot S_z$; t – глибина різання, а S_z – подача на зуб).

Відношення товщини зрізу до радіуса різальної кромки називається масштабним коефіцієнтом:

$$k_m = \frac{a}{r}, \quad (2)$$

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

Аналіз отриманих даних свідчить, що при зменшенні значень k_m питомі сили різання значно зростають, досягаючи пікових значень (до 89 ГПа), при цьому питомі сили різання при мікрофрезеруванні аустенітного сплаву NiTi до 15 % більші за питомі сили різання при обробці мартенситного NiTi. 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.

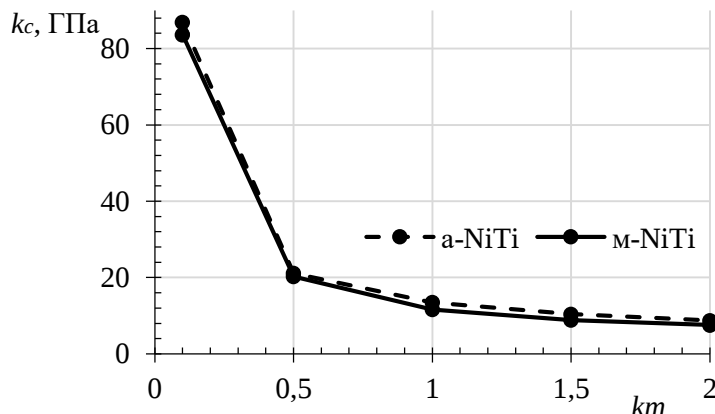


Рис. 6. Залежність питомої сили різання від масштабного коефіцієнта

Отримані дані щодо значень питомих сил різання дозволяють також визначити значення подачі, при яких різання матеріалу характеризуватиметься меншими енергетичними потребами і одночасно може бути реалізоване практично. Так при мікрофрезеруванні нітинолу варто обирати подачу таким чином, щоб масштабний коефіцієнт був більше 0,5 для обробки нітинолу, як в аустенітному так і в мартенситному фазовому стані. Іншими словами це означає, що в інтервалі досліджуваних умов обробки допустима мінімальна товщина зрізу повинна складати більше 50% від радіуса заокруглення різальної кромки мікрофрези. Такі результати в цілому узгоджуються з результатами [12], де наведена наступна рекомендація щодо мінімальної товщини зрізу: 30% радіуса кромки інструмента. Однак автори згаданої роботи отримали такі висновки на основі вимірних значень складових сил різання і оцінки шорсткості обробленої поверхні.

Результати отриманих значень питомих сил різання (рис. 6) демонструють схожі тенденції із результатами, отриманими в [9], але разом із тим спостерігаються кардинальні відмінності щодо значення питомих сил різання. Це може бути пояснено різним радіусом заокруглення різальної кромки мікрофрез (0,99 і 10 мкм), а також різною швидкістю різання (36 і 20 м/хв). Як відомо, зміна радіуса різальної кромки мікрофрези впливає на механізм стружкоутворення, що визначає масштаб геометрії контактної взаємодії інструмента з оброблюваним матеріалом.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування аустенітного та мартенситного сплавів NiTi дозволило порівняти та виявити тенденції зміни сил і температур різання в широкому інтервалі подач. Встановлено, що порівняно із обробкою аустенітного сплаву NiTi, обробка мартенситного сплаву характеризується до 15% меншими значеннями сил різання, та до 50% більшими температурами різання. Це пов'язано із відмінностями у кристалографічній структурі та фізико-механічних властивостях сплавів залежно від їх фазового стану.

Отримані дані щодо значень питомих сил різання дозволяють також визначити значення подачі, при яких різання матеріалу характеризуватиметься меншими енергетичними витратами. Так, при мікрофрезеруванні NiTi варто обирати подачу таким чином, щоб масштабний коефіцієнт при можливості був більше 0,5, як для аустенітного, так і мартенситного сплавів. Практично це означає, що допустима мінімальна товщина зрізу повинна бути більше 50% від радіуса заокруглення різальної кромки мікрофрези.

Отримані дані сприяють кращому розумінню явищ, що мають місце в процесах мікрофрезерування сплавів NiTi. Подальші дослідження будуть спрямовані на підвищення ефективності технологій мікрофрезерування пазів на заготовках з NiTi.

Література

1. Томашевський О. О. Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд / О. О. Томашевський, Н. О. Балицька // Технічна інженерія. – 2023. – № 2(92). – С. 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).
2. Kaya E. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective / E. Kaya, İ. Kaya // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 100, no. 5-8. – P. 2045–2087. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
3. Piquard R. Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation / R. Piquard, A. D'Acunto, P. Laheurte, D. Dudzinski // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38, no. 2. – P. 356–364. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.006>.

4. Балицька Н. О. Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми / Н. О. Балицька // Технічна інженерія. – 2022. – № 2(90). – С. 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).
5. Томашевський О. О. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу / О. О. Томашевський, Н. О. Балицька, О. І. Прилипка // Технічна інженерія. – 2024. – № 1(93). – С. 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).
6. Mehrpouya M. An investigation on the optimum machinability of NiTi based shape memory alloy / M. Mehrpouya, A. M. Shahedin, S. Daood Salman Dawood, A. Kamal Ariffin // Materials and Manufacturing Processes. – 2017. – Vol. 32, no. 13. – P. 1497–1504. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279290>.
7. Балицька Н.О. Мікрофрезерування, як спосіб текстурування поверхонь сплавів Ni-Ti для модифікації змочуваності / Н. О. Балицька, П. П. Мельничук // Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences. – 2025. – №347(1). – С. 478–485. – Doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-65>.
8. Mihálcz I. Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy. / I. Mihálcz // Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering. – 2001. – Vol. 45, no. 1. – P. 75–86.
9. Zainal Abidin Z. Chilled Air System and Size Effect in Micro-milling of Nickel–Titanium Shape Memory Alloys / Z. Zainal Abidin, P.Tarisai Mativenga, G. Harrison // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology. – 2019. – Vol. 7, no. 2. – P. 283–297. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00040-5>.
10. Kuppuswamy R. High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys / R. Kuppuswamy, A. Yui // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 93, no. 1-4. – P. 11–21. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7598-9>.
11. Weinert K. Machining NiTi micro-parts by micro-milling / K. Weinert, V. Petzoldt // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vol. 481-482. – P. 672–675. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.220>.
12. Aslantaş K. Şekil Hafızalı NİTi Alaşımının Mikro Frezelenmesi ve Kritik Talaş Kalınlığının Belirlenmesi / K. Aslantaş, Y. Kaynak // Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. – 2018. – Vol. 2018, no. 18–2. – DOI: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460515>.
13. Zailani Z. A. Effects of Chilled Air on Machinability of NiTi Shape Memory Alloy / Zainal A. Zailani, Paul T. Mativenga // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 45. – P. 207–210. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.156>.
14. Shizuka H. Difficult Cutting Property of NiTi Alloy and Its Mechanism / H. Shizuka, K. Sakai, H. Yang, K. Sonoda, T. Nagare, Y. Kurebayashi, K. Hayakawa, // Journal of Manufacturing and Materials Processing. – 2020. – Vol. 4, no. 4. – P. 124. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>.
15. Kowalczyk M. Comparative Analysis of Machinability of Nitinol Alloy Using Weighted Radar Diagram / M. Kowalczyk, C. Niżankowski // Management and Production Engineering Review. – 2017. – Vol. 8, no. 4. – P. 74–81. – DOI: <https://doi.org/10.1515/mper-2017-0038>.
16. Kaynak Y. Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation / Y. Kaynak, S. Manchiraju, I. S. Jawahir, D. Biermann // CIRP Annals. – 2020. – Vol. 69, no. 1. – P. 85–88. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>.
17. Balytska N. O. Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling / N. O. Balytska, O. O. Tomashevskiy, V. A. Shadura // Journal of Engineering Sciences (Ukraine). – 2025. – Vol. 12, no. 1. – P. A20–A27. – DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3).
18. Hoffmann Group Catalogue. Machining and clamping technology. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. –Rezhym dostupu : <https://surl.li/zhllmq> (Datazvernennia 17.03.2025 r.). –Nazva z ekrana.
19. Yang H. Effect of Cutting Speed on Shape Recovery of Work Material in Cutting Process of Super-Elastic NiTi Alloy / H. Yang, K. Sakai, H. Shizuka, Y. Kurebayashi, K. Hayakawa, T. Nagare, // International Journal of Automation Technology. – 2021. – Vol. 15, no. 1. – P. 24–33. – DOI: <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>.
20. Kaynak Y. Modeling and Simulation of Machining-induced Surface Integrity Characteristics of NiTi Alloy / Y. Kaynak, S. Manchiraju, I. S. Jawahir // Procedia CIRP. – 2015. – Vol. 31. – P. 557–562. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.071>.

References

1. Tomashevskiy O. O. Protsey mikrofrezeruvannya metaliv i splaviv: analitychnyi ohliad / O. O. Tomashevskiy, N. O. Balytska // Tekhnichna inzheneriia. – 2023. – № 2(92). – С. 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).
2. Kaya E. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective / E. Kaya, İ. Kaya // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 100, no. 5-8. – P. 2045–2087. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
3. Piquard R. Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation / R. Piquard, A. D'Acunto, P. Laheurte, D. Dudzinski // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38, no. 2. – P. 356–364. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.006>.
4. Balytska N. O. Osoblyvosti tortsevoho frezeruvannya splaviv Ni-Ti z efektom pamiaty formy / N. O. Balytska // Tekhnichna inzheneriia. – 2022. – № 2(90). – С. 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).

5. Tomashevskiy O. O. Skinchenno-elementne modeliuvannya protsesu mikrofrezeruvannya nitynolu / O. O. Tomashevskiy, N. O. Balytska, O. I. Prylypko // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2024. – № 1(93). – S. 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).
6. Mehrpouya M. An investigation on the optimum machinability of NiTi based shape memory alloy / M. Mehrpouya, A. M. Shahedin, S. Daood Salman Dawood, A. Kamal Ariffin // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2017. – Vol. 32, no. 13. – P. 1497–1504. – DOI: <https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1279290>.
7. Balytska N.O. Mikrofrezeruvannya, yak sposib teksturuvannya poverkhon splaviv Ni-Ti dlia modyfikatsii zmochuvanosti / N. O. Balytska, P. P. Melnychuk // *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. – 2025. – №347(1). – S. 478–485. – Doi: <https://doi.org/10.31891/2307-5732-2025-347-65>.
8. Mihálcz I. Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy. / I. Mihálcz // *Periodica Polytechnica, Mechanical Engineering*. – 2001. – Vol. 45, no. 1. – P. 75–86.
9. Zainal Abidin Z. Chilled Air System and Size Effect in Micro-milling of Nickel–Titanium Shape Memory Alloys / Z. Zainal Abidin, P. Tarisai Mativenga, G. Harrison // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. – 2019. – Vol. 7, no. 2. – P. 283–297. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s40684-019-00040-5>.
10. Kuppaswamy R. High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys / R. Kuppaswamy, A. Yui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – Vol. 93, no. 1-4. – P. 11–21. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7598-9>.
11. Weinert K. Machining NiTi micro-parts by micro-milling / K. Weinert, V. Petzoldt // *Materials Science and Engineering: A*. – 2008. – Vol. 481–482. – P. 672–675. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2006.10.220>.
12. Aslantaş K. Şekil Hafızalı NİTİ Alaşımının Mikro Frezelenmesi ve Kritik Talaş Kalınlığının Belirlenmesi / K. Aslantaş, Y. Kaynak // *Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi*. – 2018. – Vol. 2018, no. 18-2. – DOI: <https://doi.org/10.17341/gazimmfd.460515>.
13. Zailani Z. A. Effects of Chilled Air on Machinability of NiTi Shape Memory Alloy / Zainal A. Zailani, Paul T. Mativenga // *Procedia CIRP*. – 2016. – Vol. 45. – P. 207–210. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.156>.
14. Shizuka H. Difficult Cutting Property of NiTi Alloy and Its Mechanism / H. Shizuka, K. Sakai, H. Yang, K. Sonoda, T. Nagare, Y. Kurebayashi, K. Hayakawa, // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2020. – Vol. 4, no. 4. – P. 124. – DOI: <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>.
15. Kowalczyk M. Comparative Analysis of Machinability of Nitinol Alloy Using Weighted Radar Diagram / M. Kowalczyk, C. Niżankowski // *Management and Production Engineering Review*. – 2017. – Vol. 8, no. 4. – P. 74–81. – DOI: <https://doi.org/10.1515/mper-2017-0038>.
16. Kaynak Y. Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation / Y. Kaynak, S. Manchiraju, I. S. Jawahir, D. Biermann // *CIRP Annals*. – 2020. – Vol. 69, no. 1. – P. 85–88. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>.
17. Balytska N. O. Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling / N. O. Balytska, O. O. Tomashevskiy, V. A. Shadura // *Journal of Engineering Sciences (Ukraine)*. – 2025. – Vol. 12, no. 1. – P. A20–A27. – DOI: [https://doi.org/10.21272/jes.2025.12\(1\).a3](https://doi.org/10.21272/jes.2025.12(1).a3).
18. Hoffmann Group Catalogue. Machining and clamping technology. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Rezhym dostupu : <https://surl.li/zhllmq> (Data zvernennia 17.03.2025 r.). – Nazva z ekranu.
19. Yang H. Effect of Cutting Speed on Shape Recovery of Work Material in Cutting Process of Super-Elastic NiTi Alloy / H. Yang, K. Sakai, H. Shizuka, Y. Kurebayashi, K. Hayakawa, T. Nagare, // *International Journal of Automation Technology*. – 2021. – Vol. 15, no. 1. – P. 24–33. – DOI: <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>.
20. Kaynak Y. Modeling and Simulation of Machining-induced Surface Integrity Characteristics of NiTi Alloy / Y. Kaynak, S. Manchiraju, I. S. Jawahir // *Procedia CIRP*. – 2015. – Vol. 31. – P. 557–562. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2015.03.071>.