

Вплив швидкості різання на знос інструменту, шорсткість та мікроструктуру обробленої поверхні при фрезеруванні сплавів NiTi: аналітичний огляд

Сплави на основі нікелю та титану характеризуються поєднанням високої міцності, корозійної стійкості, супереластичності та здатності до оборотних мартенситно-аустенітних перетворень, що забезпечує ефект пам'яті форми. Водночас ці ж властивості ускладнюють процес механічної обробки сплавів NiTi, оскільки виникають значні термомеханічні навантаження та локальний перегрів у зоні різання, а також через інтенсивний знос інструменту. У статті представлено результати аналізу та узагальнення сучасних експериментальних досліджень впливу швидкості різання у широкому діапазоні значень (20...400 м/хв) на стійкість інструменту, шорсткість поверхні, мікроструктуру та температури фазових перетворень при фрезеруванні сплавів NiTi. Встановлено, що збільшення швидкості різання до 400 м/хв сприяє покращенню якості поверхні та зменшенню глибини термомеханічно зміненого шару. Доведено, що використання інструментів із CBN та армованої кераміки за високошвидкісних режимів забезпечує мінімальну втрату ентальпії фазових переходів, а отже, і збереження ефекту пам'яті форми. Разом із тим підвищення швидкості різання інтенсифікує знос інструменту, що потребує застосування високостійких матеріалів і ефективних систем охолодження. Сформовано рекомендації щодо вибору режимів фрезерування сплавів NiTi. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації технологічних процесів обробки нітинолу у медичному, авіаційному та машинобудівному виробництві, де збереження функціональних властивостей матеріалу є критично важливим.

Ключові слова: сплав NiTi; фрезерування; швидкість різання; ефект пам'яті форми; функціональні властивості.

Актуальність теми. Сплави NiTi (нітинол) посідають особливе місце серед матеріалів із ефектом пам'яті форми (ЕПФ) завдяки поєднанню високої міцності, корозійної стійкості, біосумісності та здатності до оборотних фазових перетворень. Ці властивості забезпечують широке застосування нітинолу в медицині (стенди, ортодонтичні дроти, імплантати), а також у авіакосмічній, робототехнічній та енергетичній галузях.

Разом із тим лезове оброблення нітинолу (зокрема фрезерування) залишається надзвичайно складним через поєднання низької теплопровідності, високої в'язкості, схильності до адгезійного налипання й термоіндукованих фазових перетворень у зоні різання. Зміна умов оброблення може призвести до перетворення аустеніту у мартенсит або навпаки, що впливає на мікроструктуру, твердість і функціональні властивості обробленої поверхні.

Одним із ключових параметрів, що визначає ефективність процесу різання, є швидкість різання (V_c). Її вибір впливає не лише на якість обробленої поверхні, але й на стан приповерхневого шару, фазовий склад, а відтак на збереження ефекту пам'яті форми. Оптимізація цього параметра є необхідною умовою для забезпечення балансу між продуктивністю процесу, стійкістю інструменту та функціональною цілісністю матеріалу.

Попри значний прогрес у технологіях обробки важкооброблюваних матеріалів, питання забезпечення стабільної якості поверхні та збереження функціональних властивостей сплавів NiTi під час фрезерування залишається відкритим. Вплив швидкості різання на знос інструменту, шорсткість, мікроструктурний стан та ефект пам'яті форми обробленої поверхні досліджено недостатньо.

Узагальнення результатів сучасних експериментальних досліджень дозволяє визначити закономірності взаємодії технологічних параметрів і фізичних процесів у зоні різання, що має важливе практичне значення для розроблення оптимальних режимів фрезерування сплавів NiTi, спрямованих на збереження їх унікальних функціональних властивостей. Саме тому проведення такого комплексного аналітичного дослідження є актуальним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Дослідження оброблюваності сплавів NiTi упродовж останнього десятиліття стали одним із ключових напрямів розвитку технологій оброблення матеріалів з ефектом пам'яті форми. Складність обробки нітинолів полягає у поєднанні високої в'язкості, низької теплопровідності та здатності до оборотних фазових перетворень, які істотно впливають на сили і температури у зоні контакту, а також на стан приповерхневого шару.

Фрезерування сплавів NiTi може бути операцією як попередньої, так і фінішної обробки. Це зумовлює необхідність ретельного дослідження процесів фрезерування нітинолів. Однак більшість сучасних

досліджень процесів лезової обробки нітинолів фокусуються на процесах точіння [1, 2] або мікрофрезерування [1, 3, 4]. На сьогодні відомо про обмежену кількість робіт з дослідження саме процесу фрезерування сплавів NiTi [5–8]. Згадані роботи становлять інформаційну основу цього аналітичного огляду. Короткий аналіз згаданих праць представлено в таблиці 1.

Таблиця 1

Аналіз наукових праць щодо визначення впливу швидкості різання на стан обробленої поверхні та знос інструменту при фрезеруванні сплавів NiTi

Джерело	Умови обробки					Основні результати			
	Швидкість різання V_c , м/хв	Подача S_z , мм/зуб	Глибина різання t , мм	Охолодження	Різальні пластини	Шорсткість R_a , мкм	Знос	Мікроструктура поверхневого шару	ЕПФ
Altas E. та ін. [5]	20...50	0,03...0,14	0,7	Сухе різання	Прямокутні, WC	0,43...0,69, залежить від V_c	Боковий знос	–	–
Balytska N. та ін. [8]	20...50	0,05...0,15	0,5...1,0	Сухе різання	Круглі, WC	0,46...1,43, істотно не залежить від V_c	Знос по передній поверхні	Мартенситне перетворення	–
Altas E. та ін. [6]	20...50	0,03...0,14	0,7	Сухе різання, MQL (EG, EG + % 5 BX)	Прямокутні, WC, WC + TiAlN, WC + TiN/Al ₂ O ₃ /TiCN	0,28...0,72, залежить від V_c	Боковий знос	Мартенситне перетворення	–
Кауа Е. та ін. [7]	25...400	0,05	0,2	Сухе різання	Круглі, WC, WC-PVD, армована кераміка, CBN	0,28...0,68, залежить від V_c	Знос по передній поверхні	Мартенситне перетворення	Гістерезис фазових перетворень

Примітка:

MQL (minimum quantity lubrication) – «мінімальна кількість мастила», в зону різання подається аерозольна суміш мастила й повітря;
 EG – етиленгліколь;
 EG + % 5 BX – етиленгліколь з додаванням бору;
 WC + TiAlN – твердосплавні різальні пластини з покриттям TiAlN;
 WC + TiN/Al₂O₃/TiCN – твердосплавні різальні пластини з тришаровим покриттям TiN/Al₂O₃/TiCN;
 WC-PVD – твердосплавні різальні пластини з покриттям, отриманим методом фізичного осадження;
 ЕПФ – ефект пам'яті форми;
 CBN (cubic boron nitride) – кубічний нітрид бору

Незважаючи на істотний прогрес у дослідженні процесів фрезерування нітинолів в останні роки, на сьогодні все ще відсутня систематизація експериментальних даних, що б дозволила чітко визначити оптимальні режими фрезерування NiTi. Таким чином, існує потреба в узагальненому аналізі впливу швидкості різання на стан обробленої поверхні та знос інструменту при фрезеруванні сплавів NiTi.

Метою статті є аналіз та узагальнення впливу швидкості різання на знос різального інструменту, шорсткість поверхні, мікроструктурні зміни та збереження ефекту пам'яті форми при фрезеруванні сплавів NiTi.

Викладення основного матеріалу.

Фізико-механічні та функціональні властивості сплавів NiTi. Сплави NiTi характеризуються унікальним поєднанням високої міцності, пружності, корозійної стійкості та здатності до зворотних фазових перетворень (табл. 2). Саме ці властивості забезпечують ефект пам'яті форми та супереластичність (надпружність), але водночас істотно ускладнюють процес механічної обробки.

Під час фрезерування нітинолу виникають значні термомеханічні навантаження, як на різальний інструмент, так і на поверхневий шар оброблюваного матеріалу, пов'язані з низькою теплопровідністю, високим коефіцієнтом тертя та схильністю до адгезійного зношування інструменту. Через це основна частина тепла, що утворюється у зоні різання, не відводиться стружкою, а концентрується у приповерхневих шарах заготовки. У результаті спостерігається локальне підвищення температури, що може призвести до фазових перетворень – утворення або розпаду мартенситу. Додатково на процес обробки впливає пружне відновлення матеріалу після зняття навантаження, що спричиняє вібрації та неточність геометрії поверхні. Таким чином, фрезерування нітинолу потребує ретельного вибору умов оброблення, які забезпечать збереження функціональних властивостей оброблюваного матеріалу.

Фізико-механічні та функціональні властивості сплавів NiTi [1, 9–11]

Властивість	Одиниця вимірювання	Аустенітний фазовий стан (B2)	Мартенситний фазовий стан (B19')
Кристалічна структура		Кубічна об'ємноцентрована	Моноклінна
Густина	г/см ³	≈ 6,45	
Температура фазового переходу	°C	Вище за A_f^* (≈ 20–100 °C)	Нижче 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		Парамагнетик	
Стійкість до корозії		Висока	Висока, але в деформованому стані чутливість до корозії може бути вищою
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	Значна, легко змінює форму
Стійкість до зношування		Висока	Нижча
Застосування		Ортодонтичні дуги, стенти, супереластичні деталі, датчики температури	Деформівні деталі, фіксатори, медичні зшивачі, механізми з ефектом пам'яті

Примітка:

 A_f^* – температура завершення аустенітного перетворення; M_f^{**} – температура завершення мартенситного перетворення

Вплив швидкості різання на знос різальних пластин, шорсткість поверхні, мікроструктуру та температуру фазових перетворень при фрезеруванні сплавів NiTi. Особливості термомеханічної поведінки нітинолу зумовлюють тісний взаємозв'язок між параметрами фрезерування та основними технологічними характеристиками процесу. На відміну від більшості конструкційних сплавів, NiTi реагує на зміни режимів не лише механічно, а й через фазові перетворення, що робить його поведінку під час різання складною для прогнозування.

Знос різальних пластин. Інтенсивне налипання оброблюваного матеріалу, високі сили та температури різання, а також циклічні термомеханічні навантаження обумовлюють інтенсивний знос інструменту при

фрезеруванні NiTi. При цьому виникають такі пошкодження, як відколи різальної кромки, відшарування, виїмки, термічні тріщини та нарост. У [8] було встановлено, що основними механізмами зносу є адгезійний та абразивний.

На рисунку 1 представлено графік залежності зносу твердосплавних різальних пластин від швидкості різання на при торцевому фрезеруванні сплаву NiTi [5]. Зі збільшенням швидкості різання боковий знос інструменту V_b зростає. Такі результати цілком узгоджуються із результатами, отриманими в роботі [7] (рис. 2). Автори пов'язують це із інтенсифікацією тертя та температурного впливу в зоні різання: за вищих швидкостей зростає температура контакту й утворюються адгезійні зони, що прискорюють спрацювання різальної кромки. Разом із тим збільшення радіуса при вершині інструменту ($r = 0,8$ мм) частково знижує інтенсивність зношування завдяки більш рівномірному розподілу навантаження по різальній кромці (рис. 1) [5].

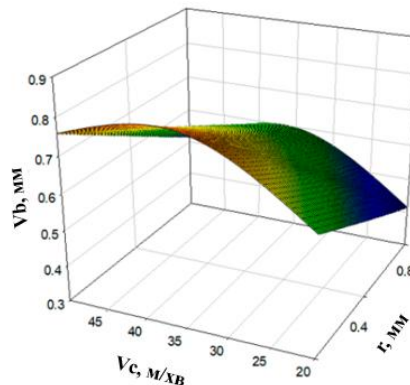


Рис. 1. Вплив швидкості різання на боковий знос твердосплавних різальних пластин при торцевому фрезеруванні сплаву NiTi [5]

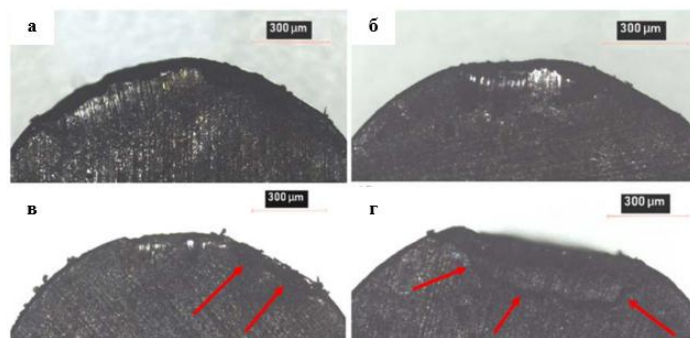


Рис. 2. Вплив швидкості різання на знос по передній поверхні твердосплавних різальних пластин з PVD-покриттям при торцевому фрезеруванні сплаву NiTi [7]:

- а – $V = 50$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,2$ мм;
- б – $V = 75$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,2$ мм;
- в – $V = 100$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,2$ мм;
- г – $V = 200$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,2$ мм

Шорсткість поверхні. Опубліковані дані щодо впливу швидкості різання на шорсткість фрезерованих поверхонь нітинолів є дещо суперечливими. Автори [8] виконали дослідження процесу торцевого фрезерування із застосуванням твердосплавних круглих пластин у діапазоні швидкостей різання 20...50 м/хв, яке не встановило істотного впливу швидкості різання на шорсткість обробленої поверхні:

$$R_a = 0,442 + 0,53 \cdot S_z - 0,23 \cdot t - 0,001 \cdot V_c \cdot t + 7,37 \cdot S_z \cdot t.$$

Автори ж [5] встановили залежність шорсткості фрезерованої поверхні від швидкості різання та радіуса при вершині різальної кромки двозубої твердосплавної фрези (рис. 3). В цілому зі збільшенням швидкості різання спостерігається підвищення шорсткості поверхні R_a . Автори пояснюють такі результати підвищенням температури у зоні різання, що спричиняє локальне розм'якшення матеріалу й утворення адгезійних нашарувань на різальній кромці. Збільшення радіуса вершини інструмента ($r = 0,8$ мм) частково компенсує цей ефект, забезпечуючи більш плавний зріз і зменшення пікових значень R_a порівняно з інструментом з $r = 0,4$ мм.

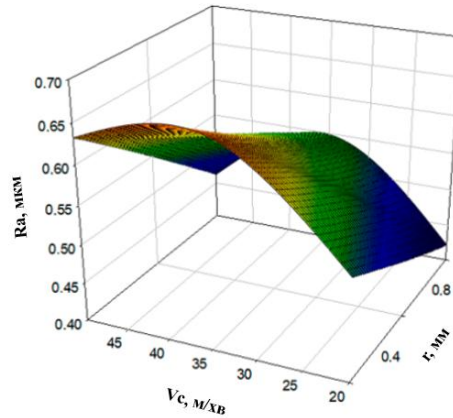


Рис. 3. Вплив швидкості різання та радіуса при вершині різальної пластини на шорсткість поверхні R_a при торцевому фрезеруванні сплаву $NiTi$ двозубою твердосплавною фрезою [5]

У [7] виконане дослідження шорсткості поверхні при фрезеруванні із широким діапазоном швидкостей різання (25...400 м/хв), результати якого наведені на рисунку 4. Автори змогли продемонструвати вплив матеріалу різальних пластин і швидкості різання на шорсткість фрезерованої поверхні. При цьому найнижчі значення шорсткості були отримані при застосуванні різальних пластин із кубічного нітриду бору (CBN) при швидкостях різання вище 100 м/хв та при застосуванні твердосплавних пластин із PVD-покриттям при швидкостях 50...75 м/хв.

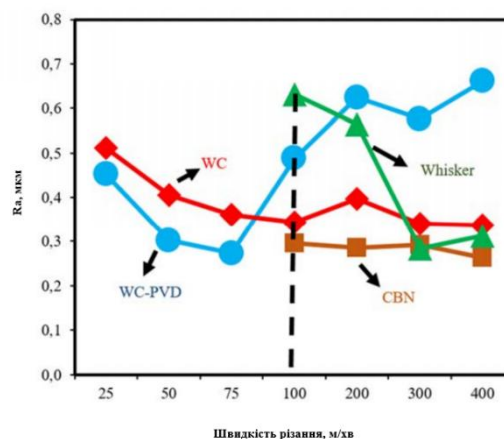


Рис. 4. Вплив швидкості різання на шорсткість поверхні R_a при торцевому фрезеруванні сплаву $NiTi$ із застосуванням різальних пластин з різних матеріалів [7]

Вплив швидкості різання на мікроструктуру та температуру фазових перетворень сплавів $NiTi$. Фазовий стан і мікроструктура приповерхневих шарів сплавів $NiTi$ після фрезерування суттєво залежать від поєднання термічного та механічного впливу, зумовленого режимами різання. Оскільки $NiTi$ здатний до оборотних мартенситних перетворень, зміни температури й напружень у зоні різання безпосередньо визначають співвідношення фаз $B2$ (аустеніт) та $B19'$ (мартенсит).

Результати [8] показують, що швидкість різання найбільше впливає на глибину мартенситних перетворень в аустенітному нітинолі після торцевого фрезерування (рис. 5). Зі збільшенням швидкості різання від 20 до 50 м/хв загальна глибина t зміненого шару значно зменшується (до 42,5 %). Це узгоджується з результатами, отриманими авторами [6, 7], де більш високі швидкості також призводять до утворення менш глибоких зон деформації через термічне розм'якшення оброблюваного матеріалу (рис. 6–7).

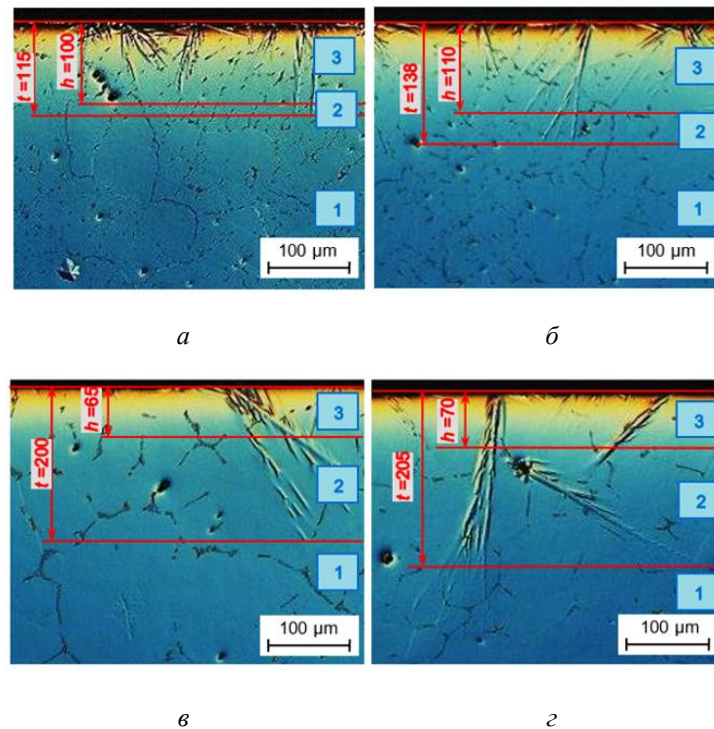


Рис. 5. Мікроструктура обробленої поверхні сплаву NiTi після торцевого фрезерування аустенітного сплаву NiTi фрезою з 8-ма круглими пластинами ($V_c = 20$ м/хв) [8]:

а – $V = 20$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм;

б – $V = 20$ м/хв, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 1,0$ мм;

в – $V = 50$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,5$ мм;

г – $V = 50$ м/хв, $S_z = 0,15$ мм/зуб, $t = 1,0$ мм

Результати [6] демонструють вплив швидкості різання, інструментального матеріалу та умов охолодження на глибину термомеханічно зміненого шару при фрезеруванні сплаву NiTi (рис. 6). Із одночасним підвищенням швидкості різання від 20 до 50 м/хв, покращенням умов охолодження (від сухої обробки до MQL з EG + 5 % BX) та криогенною обробкою інструменту, а також із застосуванням сучасних зносостійких покриттів спостерігається помітне зменшення товщини зміненого шару – від 120 до 30 мкм. Така тенденція зумовлена покращенням відведення тепла, що обмежує розвиток пластичних деформацій та фазових перетворень у приповерхневій зоні.



Рис. 6. Мікроструктура обробленої поверхні сплаву NiTi після торцевого фрезерування однозубим інструментом при різних умовах різання ($t = 0,7$ мм) [6]:

H13A – твердий сплав (WC + Co), без покриття, виробник – Sandvik Coromant;

S30T – твердий сплав (WC+Co) з покриттям TiCN + Al₂O₃ + TiN, виробник – Sandvik Coromant;

S40T – твердий сплав (WC+Co) з CVD-покриттям TiCrN + Al₂O₃ + TiN, виробник – Sandvik Coromant

Аналогічні ефекти були виявлені також авторами [7] при фрезеруванні нітинолу на високих швидкостях різання (рис. 7). При збільшенні швидкості різання від 100 до 400 м/хв глибина термомеханічно зміненого шару зменшилася вдвічі від 150 до 75 мкм. Отже, збільшення швидкості різання сприяє збереженню структурної цілісності сплаву NiTi.

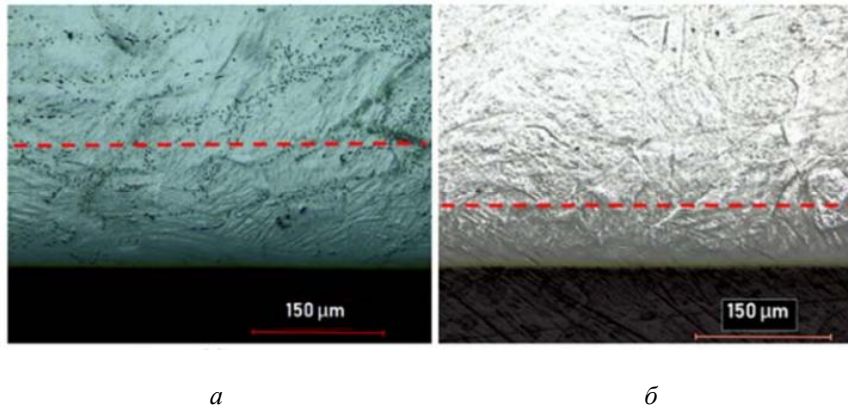


Рис. 7. Мікроструктура поверхні сплаву NiTi після торцевого фрезерування інструментом, оснащеним різальними пластинами із кубічного нітриду бору (CBN) [7]:
 а – $V = 100$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,2$ мм;
 б – $V = 400$ м/хв, $S_z = 0,05$ мм/зуб, $t = 0,2$ мм

У [7] було експериментально досліджено вплив швидкості різання на гістерезис температур фазових перетворень сплаву NiTi після фрезерування із застосуванням різних інструментальних матеріалів (рис. 8). Для всіх типів інструментів спостерігається тенденція до зменшення гістерезису зі зростанням швидкості різання. Це свідчить про менше порушення мікроструктури матеріалу при високошвидкісній обробці. Найбільший гістерезис температур фазових перетворень і, відповідно, найсильніша деградація ефекту пам'яті форми, спостерігається після обробки твердосплавним (WC) інструментом, тоді як найменший гістерезис – при застосуванні CBN. Армована кераміка і твердосплавні пластини з покриттям (WC-PVD) займають проміжне положення. Таким чином, збільшення швидкості різання до 300...400 м/хв, особливо при застосуванні інструментів із CBN або армованої кераміки, забезпечує краще збереження ефекту пам'яті форми за рахунок зменшення термомеханічного впливу на поверхневий шар деталі.

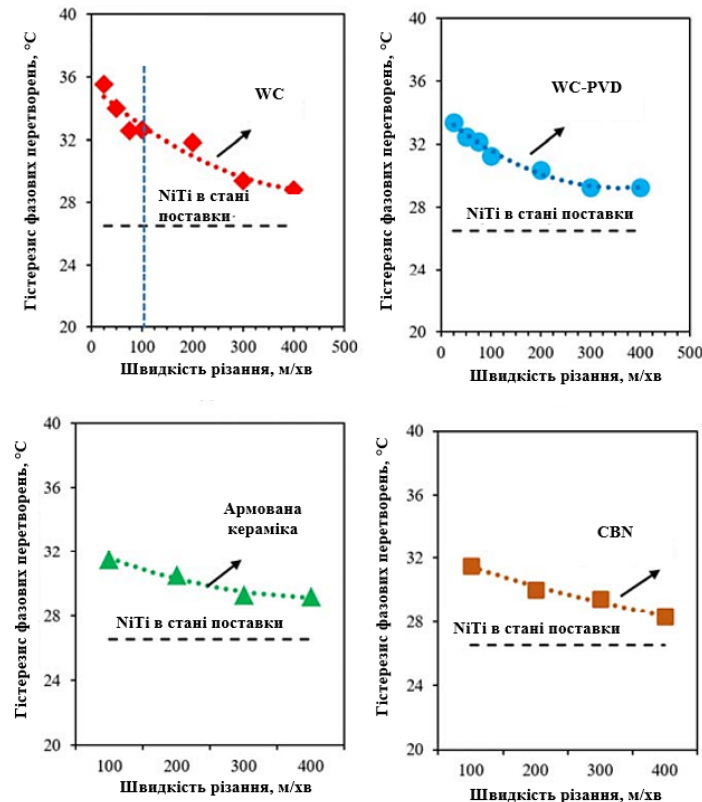


Рис. 8. Вплив швидкості різання на гістерезис температур фазових перетворень сплаву NiTi при фрезеруванні [7]

Практичні рекомендації. Підбір сприятливих режимів фрезерування сплавів NiTi визначає не лише якість обробленої поверхні, продуктивність та ефективність обробки, але й стабільність фазового стану обробленої поверхні, що безпосередньо впливає на його функціональні властивості – ефект пам'яті форми та супереластичність.

На основі виконаного аналізу узагальнено вплив швидкості різання на параметри обробки сплавів NiTi, що викладено в таблиці 3.

Таблиця 3

Вплив швидкості різання на параметри фрезерування сплавів NiTi

	Швидкість різання, м/хв:		
	≤ 30	30...50	≤ 400
Досяжна шорсткість	●●○	●○○	●○○
Знос	●○○	●●○	●●●
Мікроструктурні зміни	●●●	●●○	●○○
Деградація ЕПФ	●●●	●●○	●○○
Умови обробки	Мінімальна кількість мастила (MQL)	Мінімальна кількість мастила (MQL)	Мінімальна кількість мастила (MQL)
	WC, WC + покриття	WC, WC + покриття, WC + покриття + кріообробка	CBN, армована кераміка
	$Sz \approx 0,03$ мм/зуб	$Sz = 0,03...0,05$ мм/зуб	$Sz = 0,03...0,05$ мм/зуб

Примітка (умовно):

- – низький рівень;
- – середній рівень;
- – високий рівень

Отже, перехід до високошвидкісного фрезерування ($V_c = 100...400$ м/хв) дає змогу досягати низької шорсткості поверхні при малій глибині мікроструктурних перетворень і максимальному збереженні ЕПФ. Разом з тим це супроводжується максимальним зносом інструменту, що вимагає застосування високостійких інструментальних матеріалів (CBN, армована кераміка) і спеціальних технологій охолодження.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Фізико-механічні та функціональні властивості сплавів NiTi зумовлюють складність їх механічної обробки. Низька теплопровідність, висока в'язкість і здатність до зворотних фазових перетворень спричиняють значні термомеханічні навантаження в зоні різання, що може призводити до фазових перетворень у приповерхневому шарі оброблених поверхонь та зміни функціональних властивостей сплавів NiTi.

Швидкість різання є одним із ключових технологічних параметрів, який визначає характер поверхневих процесів під час фрезерування NiTi. У низькошвидкісному діапазоні різання (20...30 м/хв) забезпечується мінімальний знос інструменту, проте спостерігається висока шорсткість і глибокі мікроструктурні зміни в приповерхневому шарі обробленого матеріалу. При середніх швидкостях (~50 м/хв) досягається компроміс між якістю обробленої поверхні та зносостійкістю інструменту. Перехід до високошвидкісної обробки (100...400 м/хв) сприяє зменшенню глибини термомеханічно зміненого шару та кращому збереженню ефекту пам'яті форми, але супроводжується інтенсивним зносом інструмента. Для середніх швидкостей різання доцільно застосовувати твердосплавні інструменти з PVD-покриттями та кріообробкою, тоді як для високошвидкісного фрезерування – інструменти з CBN або армованої кераміки, які забезпечують вищу стійкість інструменту.

Перспективними напрямками подальших досліджень є визначення оптимальних умов різання, що забезпечують баланс між якістю поверхні, стійкістю інструмента та збереженням функціональних властивостей сплавів NiTi.

References:

1. Kaya, E. and Kaya, I. (2018), «A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 100, No. 5–8, pp. 2045–2087, doi: 10.1007/s00170-018-2818-8.
2. Kitay, O. and Kaynak, Y. (2021), «The effect of flood, high-pressure cooling, and CO₂-assisted cryogenic machining on microhardness, microstructure, and X-ray diffraction patterns of NiTi shape memory alloy», *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 30, pp. 5799–5810, doi: 10.1007/s11665-021-05854-6.

3. Biermann, D., Kahleys, F. and Surmann, T. (2009), «Micromilling of NiTi shape-memory alloys with ball nose cutters», *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 24, No. 12, pp. 1266–1273, doi: 10.1080/10426910903129935.
4. Balytska, N.O., Tomashevskiy, O.O. and Shadura, V.A. (2025), «Evaluation of cutting forces and temperatures in micro-milling of NiTi alloys using finite element modeling», *Journal of Engineering Sciences*, Vol. 12, No. 1, pp. A20–A27, [Online], available at: <https://jes.sumdu.edu.ua/evaluation-of-cutting-forces-and-temperatures-in-micro-milling-of-niti-alloys-using-finite-element-modeling/>
5. Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M.A. and Ozkan, D. (2020), «Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools», *Coatings*, Vol. 10, No. 12, doi: 10.3390/coatings10121259.
6. Altas, E., Altin Karatas, M., Gokkaya, H. and Akinay, Y. (2021), «Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat treated cutting tools under different cutting conditions», *Journal of Materials Engineering and Performance*, Vol. 30, No. 12, pp. 9426–9439, doi: 10.1007/s11665-021-06095-3.
7. Kaya, E. and Kaya, I. (2023), «The effect of cutting tool and cutting speed on the surface integrity and functional properties in milling of NiTi shape memory alloys», *Journal of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, Vol. 38, No. 4, pp. 2375–2384, doi: 10.17341/gazimmfd.1095871.
8. Balytska, N., Penter, L., Manokhin, A. and Ihlenfeldt, S. (2025), «Face milling performance on austenitic NiTi shape memory alloy», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-025-16777-0.
9. Balytska, N.O. and Tomashevskiy, O.O. (2025), «Porivnialnyi analiz syl i temperatur rizannia pry mikrofrezeruvanni splaviv NiTi v austenitnomu ta martensytnomu fazovykh stanakh na osnovi skinchenno-elementnoho modeliuvannia», *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*, Issue 351 (3.1), pp. 35–43, [Online], available at: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1656>
10. Mehrpouya, M., Shahedin, A.M., Daood, S.S. and Kamal Ariffin, A. (2017), «An investigation on the optimum machinability of NiTi based shape memory alloy», *Materials and Manufacturing Processes*, Vol. 32, No. 13, pp. 1497–1504, doi: 10.1080/10426914.2017.1279290.
11. Mihálcz, I. (2001), «Fundamental characteristics and design method for nickel-titanium shape memory alloy», *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, Vol. 45, No. 1, pp. 75–86.

Калафатова Людмила Павлівна – доктор технічних наук, професор, професор Державного вищого навчального закладу «Донецький національний технічний університет».

Наукові інтереси:

- підвищення ефективності механічної обробки виробів із важкооброблюваних матеріалів;
- розробка та впровадження прогресивних технологічних процесів механічної обробки.

Kalafatova L.P.

The effect of cutting speed on tool wear, roughness, and microstructure of the machined surface when milling NiTi alloys: an analytical review

Nickel- and titanium-based alloys are characterized by a combination of high strength, corrosion resistance, superelasticity, and the ability to undergo reversible martensitic-austenitic transformations, which provides a shape memory effect. At the same time, these same properties complicate the process of machining NiTi alloys, as significant thermomechanical loads and local overheating occur in the cutting zone, as well as due to intensive tool wear. The article presents the results of analysis and generalization of modern experimental studies of the influence of cutting speed in a wide range of values (20...400 m/min) on tool life, surface roughness, microstructure, and phase transformation temperatures when milling NiTi alloys. It has been established that increasing the cutting speed to 400 m/min improves surface quality and reduces the depth of the thermomechanically affected layer. It has been proven that the use of CBN and reinforced ceramic tools in high-speed conditions ensures minimal enthalpy loss during phase transitions and, consequently, preservation of the shape memory effect. At the same time, increasing the cutting speed intensifies tool wear, which requires the use of highly wear-resistant materials and effective cooling systems. Recommendations have been formulated for setting milling conditions for NiTi alloys. The results obtained can be used to optimize technological processes for machining nitinol in medical, aviation, and mechanical engineering industries, where preserving the functional properties of the material is critically important.

Keywords: NiTi alloy; milling; cutting speed; shape memory effect; functional properties.

Стаття надійшла до редакції 10.09.2025.