

Технологічні особливості мікрофрезерного текстурювання поверхонь сплаву NiTi

Сплави NiTi характеризуються ефектом пам'яті форми, псевдопружністю, корозійною стійкістю та біосумісністю, що зумовлює їх широке застосування в медицині, приладо-, машинобудуванні та багатьох інших галузях промисловості. Змінюючи топографію поверхні, можна впливати на функціональні властивості поверхонь виробів. Механічне текстурювання, на відміну від інших методів модифікації поверхні, здатне забезпечити широку варіативність топології поверхневих текстур, меншу глибину індукованого поверхневого шару, надійність та геометричну точність поверхневих текстур без деградації їх функціональних властивостей у часі, а також екологічність та економічну ефективність. Це зумовлює необхідність розробки технологій мікроефективного модифікації поверхонь виробів зі сплавів NiTi, які відрізняються дуже низькою оброблюваністю через інтенсивне утворення задирок, низьку стійкість мікрофрез, фазові перетворення в приповерхневому шарі обробленої поверхні. Робота присвячена експериментальному дослідженню мікрофрезерного текстурювання поверхонь аустенітного сплаву $\text{Ni}_{56,5}\text{Ti}_{43,5}$ твердосплавними мікрофрезами з покриттям TiAlN діаметрами 0,2, 0,5 та 1 мм. У роботі перевіряється технологічна можливість мікрофрезерування нітинолів на оброблюваних центрах звичайної швидкості. Аналізуються сигнали сил різання та знос інструменту при мікрофрезеруванні текстур різної форми, а також їх топографія. Обговорюються явища, що супроводжують процес мікрорізання та викликають інтенсивне зношування інструменту та утворення задирок. Порівнюється технологічність виготовлення поверхневих мікротекстур різного типу: мікропази, мікростовпчики та мікроямки. Розробляються основні принципи технології мікрофрезерного текстурювання поверхонь сплаву NiTi із застосуванням універсального обробного центру із підтримкою технології шліфування. Отримані результати поглиблюють розуміння процесів мікрофрезерування поверхонь сплавів NiTi.

Ключові слова: технологія текстурювання; мікрофрезерування; NiTi; сили різання; топографія поверхні.

Актуальність теми. Сплави на основі нікелю та титану (NiTi, нітинол) посідають особливе місце серед сучасних матеріалів завдяки унікальним властивостям – ефекту пам'яті форми, псевдопружності, високій корозійній стійкості та біосумісності. Ці характеристики роблять їх надзвичайно привабливими для застосування у медицині (ортодонтичні дуги, ендодонтичні інструменти, кардіостенти, імпланти), а також у приладо-, машинобудуванні та інших галузях промисловості [1]. Разом із тим ефективне використання сплавів NiTi значною мірою залежить від стану їх поверхні, що визначає експлуатаційні властивості виробів [2].

Серед сучасних методів модифікації поверхні особливу увагу приділяють технологіям текстурювання, які дозволяють цілеспрямовано формувати поверхневий мікрорельєф, впливаючи на умови тертя, адгезії, змочування тощо, і таким чином покращувати функціональні характеристики поверхонь виробів – зносостійкість, біосумісність та ін. Лазерне [3, 4], електрохімічне [5, 6] та механічне [7, 8] текстурювання є сьогодні найбільш розповсюдженими методами. Недоліками перших двох методів модифікації є нестабільність топографії поверхні (анодування, плазмова обробка, хімічна функціоналізація), а також глибокі термічні та структурні пошкодження (лазерне текстурювання, електроерозійна обробка).

Метод мікрофрезерного текстурювання поверхонь заслуговує на окремий розгляд, оскільки він забезпечує: широку варіативність топології поверхневих текстур; меншу глибину індукованого поверхневого шару; надійність та геометричну точність поверхневих текстур без деградації їх функціональних властивостей у часі; екологічність та економічну ефективність [8]. Разом із тим мікрофрезерування сплавів NiTi супроводжується низкою технологічних труднощів, пов'язаних із високою пружністю матеріалу, його низькою теплопровідністю та схильністю до налипання на різальну кромку інструменту. Це суттєво впливає на якість обробленої поверхні, зносостійкість інструменту та стабільність процесу [9–11]. Отже, дослідження технологічних особливостей мікрофрезерного текстурювання сплаву NiTi, яке допоможе визначити умови ефективного формування поверхневих мікроструктур, є актуальним науково-технічним завданням.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор. Сучасні наукові праці свідчать про зростаючий інтерес до технології мікрофрезерного текстурювання сплавів NiTi.

Основні напрями досліджень охоплюють: аналітичні огляди основних технологічних проблем при мікрофрезеруванні сплавів NiTi; експериментальні дослідження сил різання, зношування мікрофрез,

шорсткості та мікротвердості оброблених поверхонь, утворення задирок, мікроструктурних змін у поверхневому шарі обробленої поверхні; чисельне моделювання процесу мікрофрезерування та ін.

Оглядові праці [1, 12] систематизують сучасний стан досліджень у галузі мікрофрезерування сплавів NiTi і виділяють основні проблеми, такі як інтенсивне утворення задирок, низька стійкість мікрофрез, фазові перетворення в приповерхневому шарі обробленої поверхні, а також обговорюють вплив режимів різання та різних методів охолодження зони різання на якість обробки і стійкість інструменту.

У [13–17] описано результати експериментальних досліджень окремих аспектів мікрофрезерування сплавів NiTi. Оптимізація режимів різання з метою зменшення сил різання та утворення задирок при мікрофрезеруванні сплаву NiTi на високошвидкісному обробному центрі була виконана в [13]. Найнижчі сили різання та найменші задирки були забезпечені при швидкості різання 15 м/хв, при цьому спостерігалось фазове перетворення в приповерхневому шарі заготовки з аустенітної фази в мартенситну.

Вплив режимів різання на утворення задирок при мікрофрезеруванні нітинолу на високошвидкісному обробному центрі був досліджений в роботі [14]. Автори встановили, що висота верхніх задирок може досягати значень, близьких до значень глибини різання. Збільшення подачі на зуб та зменшення ширини різання мають тенденцію до зменшення висоти та ширини верхніх задирок. У приповерхневому шарі обробленої поверхні мартенситного NiTi спостерігалось фазове перетворення. Більші задирки утворювалися під час обробки мартенситного нітинолу.

У [15] досліджувалось використання охолодженого повітря для впливу на оброблюваність при мікрофрезеруванні мартенситного NiTi на ультрапрецизійному обробному центрі. Результати показали, що фрезерування із охолодженням повітрям та мінімальним змашуванням значно покращило продуктивність обробки, зменшуючи знос інструменту, утворення задирок та покращуючи якість поверхні. Охолодження повітрям значно знизило температуру заготовки нижче критичного рівня для перетворення в аустеніт, зберігаючи заготовку в мартенситній фазі.

У [16] розглянуто гальмівний вплив зміцнення та пластичної деформації на пружне відновлення матеріалу, що пояснює механізм змін топографії обробленої поверхні. Результати показують, що ступінь зміцнення збільшується зі збільшенням радіальної глибини різання.

Роботи [9–11] демонструють потенціал застосування скінченно-елементного моделювання для дослідження мікрофрезерування сплавів NiTi. У [9–11] описано розробку скінченно-елементних моделей мікрофрезерування нітинолів в аустенітному та мартенситному фазових станах, проведено порівняльний аналіз як складових, так і питомих сил і температур різання. Це дозволило встановити прийнятні межі для масштабного коефіцієнта (відношення товщини зрізу до радіуса заокруглення різальної кромки інструменту) та мінімальної товщини зрізу. На основі цього було визначено рекомендоване співвідношення радіуса різальної кромки мікрофрези до мінімальної товщини зрізу, що повинно становити не менше 10 % (при можливості більше 50 %). Це забезпечить менші енергетичні витрати та більш стабільні умови формування стружки.

Всі згадані вище роботи розглядають мікрофрезерування поздовжніх пазів і лише робота [17] присвячена надточному мікрофрезерному текстуруванню сплаву NiTi, виготовленого методом селективного лазерного плавлення. Автори дослідження виготовили поверхневі текстири у вигляді як поздовжніх паралельних пазів, так і квадратних виступів, що були утворені за рахунок послідовної обробки із подачею у двох перпендикулярних напрямках. Середні похибки обробки для масиву мікроканалок та масиву мікростовпчиків становлять 0,7 та 1,51 %, що демонструє високу точність обробки. Також було проаналізовано сили різання, знос інструменту та морфологія стружки. Автори зазначають, що амплітуда сил різання не перевищувала 1 Н, помітного зносу інструменту не спостерігалось, а стружка мала стрічкоподібну форму, що підтверджує доцільність запропонованого процесу для поверхневого текстурування сплавів NiTi. Разом з тим ультрапрецизійна мікрообробка передбачала застосування фінішних режимів різання (частота обертання шпинделя 60000 об/хв, подача 300 мм/хв, глибина різання 0,01 мм), а також ультрапрецизійного верстата мод. «UVM-450C», що визначає і відносно низьку продуктивність обробки та часто технічну складність реалізації цієї технології через доступ до обладнання такого рівня.

Оскільки рекомендована швидкість різання нітинолів складає 15...50 м/хв, то для мікрофрезерного текстурування цього матеріалу також можуть бути застосовані не лише високошвидкісні обробні центри, а і центри звичайної швидкості, але високої точності. В роботі [11] доведено технологічну можливість мікрофрезерування нітинолів на обробному центрі мод. «DMG DMU 80 eVo». Разом з тим цей верстат не дозволяє виконувати попередню обробку поверхонь методом шліфування, що створює необхідність шліфування на спеціалізованих шліфувальних верстатах. Це своєю чергою зумовлює виникнення похибок, пов'язаних із переустановкою заготовок, що може бути критичним і призводити до нахилу оброблюваної поверхні при мікрофрезеруванні і, як наслідок, до різної висоти поверхневих текстур, нерівномірності навантаження на різальний інструмент і навіть до поломки фрези. Тому в цій роботі було розроблено технологію мікрофрезерного текстурування поверхонь нітинолу, що передбачає застосування

високоточного універсального обробного центру з ЧПК з функціями фрезерування і шліфування при одній установці заготовки.

Метою статті є експериментальне дослідження технологічних особливостей процесу мікрофрезерного текстурювання поверхонь сплаву $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$ для визначення типу найбільш технологічних поверхневих текстур і розроблення основних принципів технології мікрофрезерного текстурювання поверхонь сплаву $NiTi$.

Викладення основного матеріалу. Обладнання і матеріали. У дослідженні як матеріал використовувався комерційно доступний сплав $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$ (мас. %). Зразки було отримано у вигляді кубічних заготовок розміром $30 \times 30 \times 30$ мм, що попередньо були оброблені торцевим фрезеруванням. У таблицях 1–2 наведено хімічний склад матеріалу та його основні механічні та теплофізичні властивості.

Таблиця 1

Хімічний склад сплаву $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$ (мас. %)

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

Таблиця 2

Механічні та теплофізичні властивості сплаву $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$ (мас. %) [11, 18]

Властивість	Одиниці вимірювання	Значення (при 20 °C)
Твердість	HV	310
Теплопровідність	Вт·(м·°C) ⁻¹	20
Коефіцієнт лінійного розширення	×10 ⁻⁶	11,3
Модуль Юнга	ГПа	83
Коефіцієнт Пуассона	–	0,3
Питома теплоємність	Дж/кг·К	230...314
Межа плинності	МПа	280
Границя міцності на розтяг	МПа	630

Мікроструктуру матеріалу зразків у вихідному стані було визначено за допомогою металографічного аналізу на цифровому мікроскопі «KEYENCE VHX». Рентгеноструктурний аналіз отриманих зразків проводився за допомогою рентгенодифрактометра «Bruker D8 Discover». Як показав металографічний (рис. 1) та рентгеноструктурний аналіз, матеріал заготовок за кімнатної температури перебував переважно в аустенітному стані і містив пори.

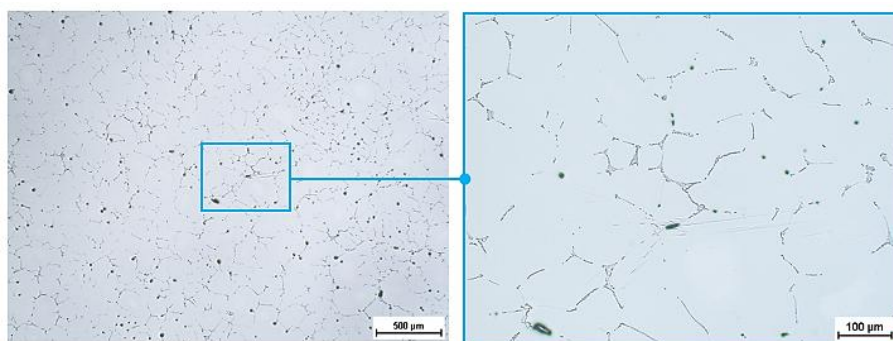


Рис. 1. Мікроструктура оброблюваного матеріалу

Для проведення механічної обробки було застосовано п'ятиосьовий вертикальний обробний центр «DMU monoblock 65 FDS» 2-го покоління. Першим етапом обробки було чорнове шліфування поверхонь за допомогою шліфувального круга $200 \times 40 \times 2$ A60K6V до шорсткості R_a 1,5 мкм. Другим етапом було мікрофрезерування поверхневих текстур, що здійснювалося твердосплавними мікрофрезами «GARANT Master Titan» з покриттям TiAlN діаметрами 0,2, 0,5 та 1 мм з охолодженням повітрям та застосуванням мінімальної кількості мастила (рис. 2). Обидві операції проводилися при одній установці заготовки.



Рис. 2. Оброблювальна система

Мікрофрезеруванням формувалися поверхневі текстури різного типу: прямокутні мікропази, квадратні мікростовпчики та циліндричні мікроямки різних розмірів. Для фрези діаметром 0,2 мм застосовувалася багатопрхідна обробка мікропазів та мікростовпчиків. Режими різання, застосовані для обробки, наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

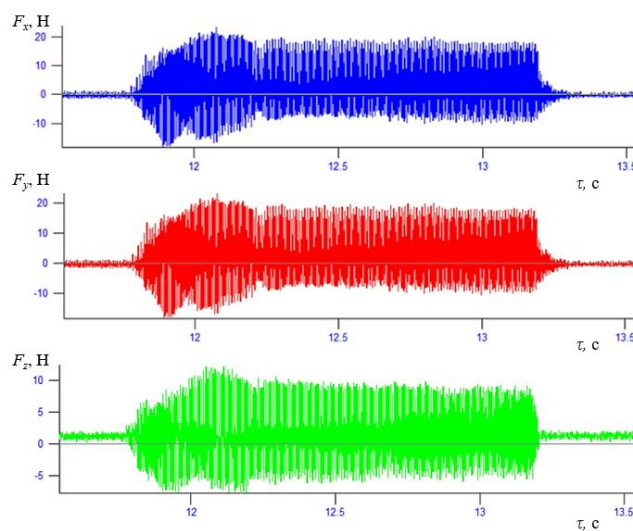
Режими різання

Діаметр мікрофрези, мм	Тип текстури	Швидкість різання V , м/хв	Подача S_z , мм/зуб	Глибина різання t , мм
0,2	Мікростовпчики	12,5	0,000025	0,033
	Мікроямки			0,1
0,5	Мікропази та мікростовпчики	20	0,10	
	Мікроямки			
1,0	Мікропази та мікростовпчики		0,15	
	Мікроямки			

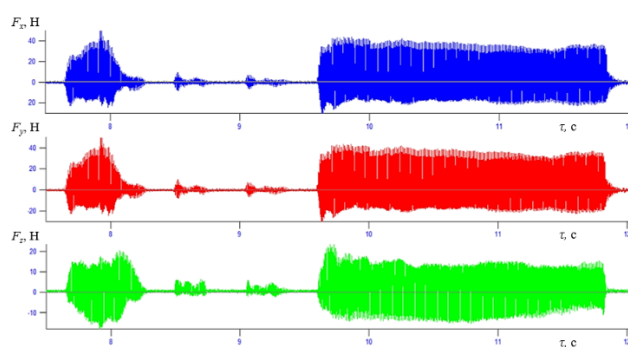
Для вимірювання складових сили різання F_x , F_y та F_z у системі координат верстата використовувався багатокомпонентний динамометр «Kistler 9257B». Аналоговий вихідний сигнал підсилювався за допомогою підсилювача заряду «Kistler 5070», а потім оцифровувався за допомогою цифрового аналогового перетворювача «Goldammer USB-Basic G0S-1034-4». Подальша фільтрація та обробка сигналів виконувалися за допомогою програмного пакета «National Instruments DIAdem».

Сили різання. Отримані сигнали складових сили різання представлені на рисунку 3.

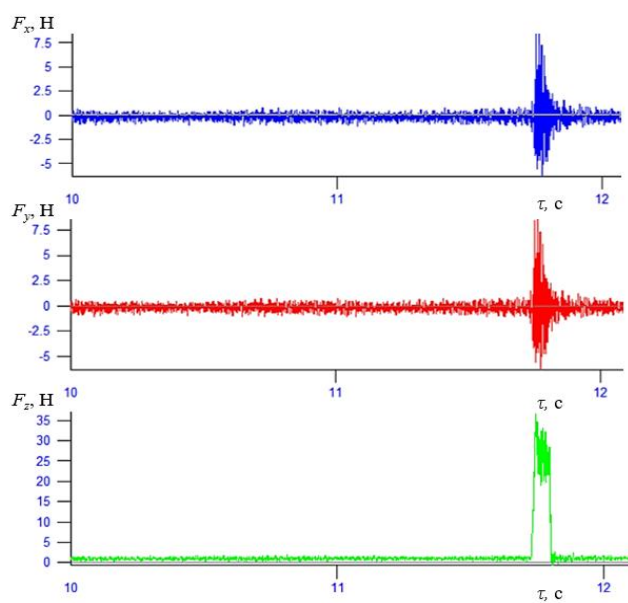
Аналіз отриманих результатів (рис. 3) свідчить, що під час мікрофрезерування поздовжніх пазів, переривчастої обробки мікростовпчиків і осьової обробки мікроямок характер сил різання суттєво відрізняється через зміну кінематики контакту між інструментом і матеріалом. Під час фрезерування поздовжніх пазів (рис. 3, а) процес різання безперервний, із постійною глибиною і шириною різання. В цьому випадку домінує зсувний механізм різання і забезпечується краща рівномірність навантаження та зносу, порівняно із обробкою мікростовпчиків. При переривчастому різанні мікростовпчиків (рис. 3, б) фреза контактує із заготовкою лише періодично, що спричиняє імпульсні пікові навантаження, високі градієнти сил різання та вібрації, і призводить до нерівномірного зносу інструменту. При осьовому фрезеруванні мікроямок (рис. 3, в) подача здійснюється вздовж осі інструмента, переважає осьова складова сили різання, процес супроводжується наростанням навантаження з глибиною занурення та ризиком адгезійного налипання оброблюваного матеріалу в центрі фрези, де швидкість різання наближається до нуля.



а



б



в

Рис. 3. Сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi фрезою діаметром 1 мм:
а – обробка мікропазів, б – обробка мікростовпчиків, в – обробка мікроямок
(F_x – сила подачі, F_y – сила, перпендикулярна до напрямку подачі, F_z – осьова сила)

За однакових геометричних умов (висота / глибина текстур і діаметр мікрофрези) найбільш технологічною виявляється обробка мікроямок, оскільки навантаження на інструмент спрямоване вздовж його осі, що забезпечує мінімальні згинальні деформації й найвищу стійкість фрези. Крім того, в цьому разі траєкторія обробки найкоротша, тому і час обробки є найменшим. Поздовжнє фрезерування пазів характеризується більшими згинальними навантаженнями на інструмент та довшою траєкторією обробки, що подовжує час обробки і знижує стійкість інструмента. Переривчасте різання мікростовпчиків супроводжується ударним характером процесу, вібраціями, високими і періодичними згинальними навантаженнями інструменту, через що воно потребує найбільших витрат часу і є найменш технологічним.

Знос інструменту. Стан фрез після 5 хв обробки поздовжніх пазів показано на рисунку 4. Найбільший знос продемонстрували мікрофрези найменшого діаметра (0,2 мм). Це пояснюється тим, що вони мають значно меншу жорсткість, а тому зростають пружні деформації, нерівномірність навантаження й ефекти тертя; працюють переважно в режимі «оранки» через складність виконання умови мінімальної товщини зрізу; гірше відводять тепло; навантаження концентрується на меншій площі різальної кромки. Усе це призводить до швидшого розвитку зносу мікрофрез меншого діаметра навіть за однакових режимів різання.

Після мікрофрезерування виконувалося ручне зачищення задирок за допомогою алмазного надфіля.

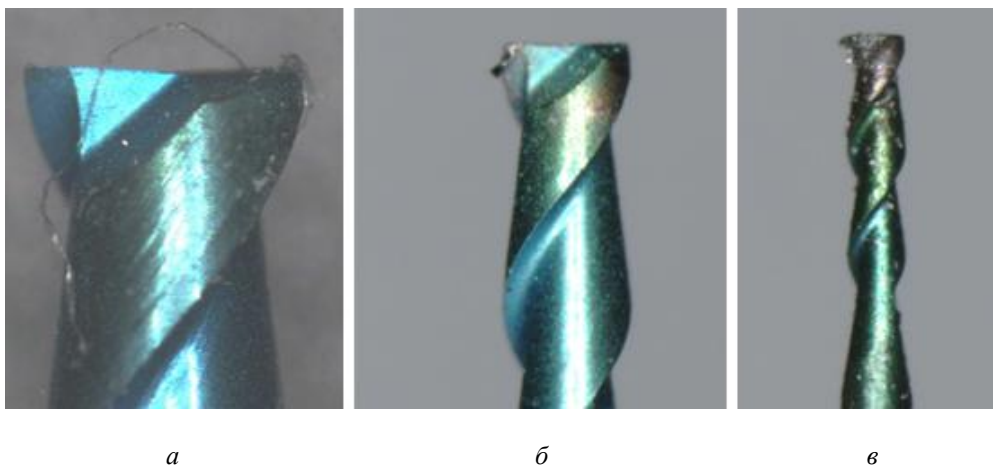


Рис. 4. Фото мікрофрез після різання сплаву NiTi протягом 5 хв:
а – фреза $\varnothing 1$ мм; б – фреза $\varnothing 0,5$ мм; в – фреза $\varnothing 0,2$ мм

Топографія текстурованих поверхонь. Для дослідження топографії текстурованих поверхонь застосовувався оптичний профілометр «KEYENCE VR-6000».

Процес мікрофрезерування сплаву NiTi характеризується інтенсивним утворенням задирок, особливо з боку виходу фрези із дуги контакту (рис. 5). При цьому ширина задирок досягає половини ширини фрезерування.



Рис. 5. Задирки при обробці сплаву NiTi фрезою діаметром 1 мм

Фотографії поверхневих текстур, виготовлених фрезою діаметром 1 мм, до та після видалення задирок, а також їх усереднений за 5 рядів профіль, наведено на рисунку 6.

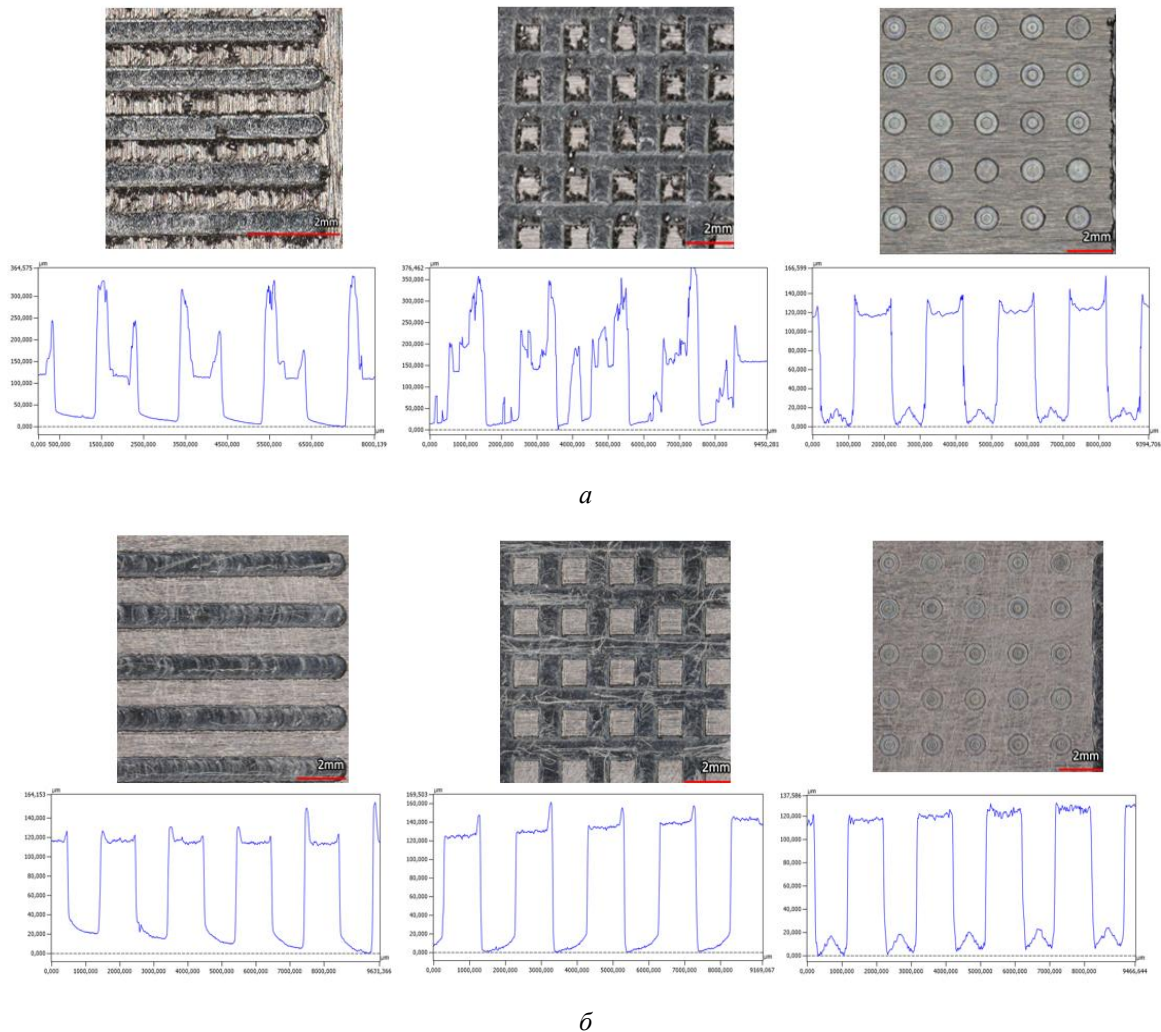


Рис. 6. Поверхні текстури, виготовлені мікрофрезою діаметром 1 мм, на поверхнях сплаву NiTi:
а – мікрофрезеровані поверхні текстури;
б – поверхні текстури після видалення задирок

Як видно з рисунка 6, топографія поверхневих текстур після мікрофрезерування характеризується наявністю значних поверхневих задирок. Для мікропазів та мікростовпчиків усіх розмірів найбільшими є верхні задирки з боку входу зуба фрези у контакт із заготовкою. Задирки текстур, виготовлених за допомогою фрези діаметром 1 мм, є найбільшими, при чому їх висота може вдвічі перевищувати висоту самих текстур, як при обробці мікропазів (до 240 мкм), так і мікростовпчиків (до 220 мкм). При обробці фрезою діаметром 0,5 мм розмір верхніх задирок досягає 140 мкм (мікропази) та 90 мкм (мікростовпчики). При обробці мікростовпчиків фрезою діаметром 0,2 мм верхні задирки не перевищують 15 мкм. Обробка ж мікроямок відрізняється утворенням мінімальних задирок (до 7 мкм при обробці фрезою діаметром 0,2 мм, до 20 мкм при обробці фрезою діаметром 0,5 мм та до 40 мкм для фрези діаметром 1 мм). Це пояснюється відмінною кінематикою обробки, іншими умовами стружкоутворення та стружковідведення в такому випадку, оскільки подача інструменту спрямована вздовж його осі. Профіль дна мікроямок, на відміну від інших текстур, відрізняється конічними виступами, що пояснюється адгезією оброблюваного матеріалу, оскільки на цій ділянці контактної зони швидкість різання наближається до нуля. Як видно з рисунка 6 ручне видалення задирок не забезпечило їх повне видалення.

Основні принципи технології мікрофрезерного текстурювання поверхонь сплаву NiTi. На основі викладеного вище було розроблено основні принципи технології мікрофрезерного текстурювання поверхонь сплаву NiTi. Технологія передбачає виготовлення на виробі зі сплаву NiTi методом мікрофрезерування із наступним видаленням задирок поверхневих мікротекстур різного типу, які змінюють поверхневий мікрорельєф і внаслідок цього зумовлюють зміни функціональних властивостей поверхонь.

Технологія передбачає застосування універсального обробного центра з інтегрованим шпинделем для високошвидкісного точіння та фрезерування, що підтримує технологію «In-Process Grinding» (шліфування на обробних центрах).

Всі операції виконуються при одній установці заготовки.

Послідовність обробки:

1. Попередня обробка із застосуванням мінімальної кількості мастила і охолодження повітрям торцевою фрезою;
2. Механічне зняття задирок;
3. Шліфування поверхні із застосуванням МОР;
4. Очищення поверхні;
5. Мікрофрезерування твердосплавними мікрофрезами із покриттям із одночасним застосуванням мінімальної кількості мастила з контролем тиску рідини і охолодження повітрям. Застосовується цикл високоточної контурної обробки та автоматична компенсація теплових деформацій. Перевага надається виготовленню мікротекстур у вигляді мікроямок. Виготовлення мікропазових та мікростовпчикових текстур здійснюється багатопрхідною обробкою. Врізання фрези виконується із плавним зростанням подачі;
6. Плоске шліфування для видалення верхніх задирок із застосуванням МОР.

Висновки та перспективи подальших досліджень. На основі експериментального дослідження мікрофрезерування визначено технологічні особливості мікрофрезерного текстурування поверхонь сплаву $\text{Ni}_{56,5}\text{Ti}_{43,5}$ та встановлено зазначене далі:

- доведено технологічну можливість мікрофрезерування нітинолів на обробних центрах звичайної швидкості;
- з'ясовано, що обробка поверхневих текстур у вигляді мікроямок є більш технологічною за основним часом обробки та стійкістю інструменту;
- розроблено основні принципи технології мікрофрезерного текстурування поверхонь сплаву NiTi , що передбачає застосування універсального обробного центра, що підтримує технологію шліфування.

Отримані результати поглиблюють розуміння процесів мікрофрезерування поверхонь сплавів NiTi і стануть основою для вдосконалення технологій мікроемеханічного текстурування поверхонь з цього матеріалу. Можливим напрямом подальших наукових пошуків може бути дослідження мікрофрезерування із застосуванням радіусних мікрофрез та мікросвердл у ширшому діапазоні діаметрів та режимів різання; оптимізація умов різання за критеріями максимізації стійкості інструменту, продуктивності та якості обробки.

Дослідження виконано в рамках реалізації НДР Міністерства освіти і науки України «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстуруванням» (№ 0123U102013).

Список використаної літератури:

1. Kaya E. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective // E.Kaya, I.Kaya // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2019. – Vol. 100, № 7. – P. 2045–2087. DOI: 10.1007/s00170-018-2868-4.
2. Altas E. Surface integrity of NiTi shape memory alloy in milling with cryogenic heat treated cutting tools under different cutting conditions // E.Altas, M.Altin Karatas, H.Gokkaya // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2021. – Vol. 30, № 12. – P. 9426–9439. DOI: 10.1007/s11665-021-06177-4.
3. Myronyuk O. UV resistance of super-hydrophobic stainless steel surfaces textured by femtosecond laser pulses // O.Myronyuk, D.Baklan, A.M. Rodin // Photonics. – 2023. – Vol. 10, № 9. DOI: 10.3390/photonics10091005.
4. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance // Q.Zhang, J.Dong, M.Peng and other // Materials Science and Engineering. – 2020. – Vol. 111. DOI: 10.1016/j.msec.2020.110847.
5. Li X.-M. What do we need for superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces // X.-M. Li, D.Reinhoudt, M.Crego-Calama // Chemical Society Reviews. – 2007. – Vol. 36. – P. 1350–1368. DOI: 10.1039/B602486F.
6. Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges // J.Jeevahan, M.Chandrasekaran, G.Britto Joseph, R.B. Durairaj // Journal of Coatings Technology and Research. – 2018. – Vol. 15, № 2. – P. 231–250. DOI: 10.1007/s11998-017-0011-x.
7. Chakraborty A. Superhydrophobic surfaces by microtexturing: A critical review // A.Chakraborty, A.T. Mulroney, M.C. Gupta // Progress in Adhesion and Adhesives. – 2021. – Vol. 9, № 1. – P. 35–64. DOI: 10.1002/9781119846703.ch14.
8. Балицька Н.О. Мікрофрезерування, як спосіб текстурування поверхонь сплавів NiTi для модифікації змочуваності // Н.О. Балицька, П.П. Мельничук // Вісник Хмельницького національного університету. – 2025. – № 347 (1). – С. 478–485 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://heraldts.khmnmu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1287/1364>.
9. Балицька Н.О. Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станах на основі скінченно-елементного моделювання // Н.О. Балицька, О.О. Томашевський // Вісник Хмельницького національного університету. – 2025. – Вип. 351 (3.1). – С. 35–43 [Електронний ресурс]. – Режим доступу : <https://heraldts.khmnmu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1656>.

10. 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, № 1. – P. A20–A27. DOI: 10.21272/jes.2025.12(1)-A20.
11. Томашевський О.О. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу // О.О. Томашевський, Н.О. Балицька, О.І. Прилико // *Технічна інженерія*. – 2024. – Вип. 1 (93). – С. 81–88. DOI: 10.36910/technical-engineering.2024.93.11.
12. 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 // S.Dutta, D.K. Sarma, J.Vora and other // *Journal of Manufacturing and Materials Processing*. – 2025. – Vol. 9, № 6. – 183 p. DOI: 10.3390/jmmp9060183.
13. Kuppuswamy R. High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys // R.Kuppuswamy, A.Yui // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. DOI: 10.1007/s00170-015-7598-9.
14. Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation // R.Piquard, A.D'Acunto, P.Laheurte, D.Dudzinski // *Precision Engineering*. – 2014. – Vol. 38, № 2. – P. 356–364. DOI: 10.1016/j.precisioneng.2013.11.006.
15. Biermann D. Micromilling of NiTi shape-memory alloys with ball nose cutters // D.Biermann, F.Kahleyss, T.Surmann // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2009. – Vol. 24, № 12. – P. 1266–1273. DOI: 10.1080/10426910903129935.
16. Residual height of surface topography in milling nickel-titanium shape memory alloy using a small-diameter cutter // L.Gao, J.Wang, H.Huo and other // *Materials Letters*. – 2024. – Vol. 361. DOI: 10.1016/j.matlet.2024.136105.
17. Feasibility study on ultraprecision micro-milling of the additively manufactured NiTi alloy for generating microstructure arrays // H.Du, C.Wu, D.Li and other // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 55–67. DOI: 10.1016/j.jmrt.2023.05.214.
18. Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting process of super-elastic NiTi alloy // H.Yang, K.Sakai, H.Shizuka and other // *International Journal of Automation Technology*. – 2021. – Vol. 15, № 1. – P. 24–33. DOI: 10.20965/ijat.2021.p0024.

References:

1. Kaya, E. and Kaya, I. (2019), «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. 7, pp. 2045–2087, doi: 10.1007/s00170-018-2868-4.
2. Altas, E., Altin Karatas, M. and Gokkaya, H. (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/s11665-021-06177-4.
3. Myronyuk, O., Baklan, D. and Rodin, A.M. (2023), «UV resistance of super-hydrophobic stainless steel surfaces textured by femtosecond laser pulses», *Photonics*, Vol. 10, No. 9, doi: 10.3390/photonics10091005.
4. Zhang, Q., Dong, J., Peng, M. et al. (2020), «Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance», *Materials Science and Engineering*, Vol. 111, doi: 10.1016/j.msec.2020.110847.
5. Li, X.-M., Reinhoudt, D. and Crego-Calama, M. (2007), «What do we need for superhydrophobic surface? A review on the recent progress in the preparation of superhydrophobic surfaces», *Chemical Society Reviews*, Vol. 36, pp. 1350–1368, doi: 10.1039/B602486F.
6. Jeevahan, J., Chandrasekaran, M., Britto Joseph, G. and Durairaj, R.B. (2018), «Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges», *Journal of Coatings Technology and Research*, Vol. 15, No. 2, pp. 231–250, doi: 10.1007/s11998-017-0011-x.
7. Chakraborty, A., Mulrone, A.T. and Gupta, M.C. (2021), «Superhydrophobic surfaces by microtexturing: A critical review», *Progress in Adhesion and Adhesives*, Vol. 9, No. 1, pp. 35–64, doi: 10.1002/9781119846703.ch14.
8. Balytska, N.O. and Melnychuk, P.P. (2025), «Мікрофрезерування, як спосіб текстуровання поверхонь сплавів NiTi для модифікації змочуваності», *Вісник Хмельницького національного університету*, No. 347 (1), pp. 478–485, [Online], available at: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1287/1364>
9. Balytska, N.O. and Tomashevskiy, O.O. (2025), «Порівняльний аналіз сил і температур різання при мікрофрезеруванні сплавів NiTi в аустенітному та мартенситному фазових станках на основі скінченно-елементного моделювання», *Вісник Хмельницького національного університету*, Issue 351 (3.1), pp. 35–43 [Online], available at: <https://heraldts.khmnu.edu.ua/index.php/heraldts/article/view/1656>
10. 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 (Ukraine)*, Vol. 12, No. 1, pp. A20–A27, doi: 10.21272/jes.2025.12(1)-A20.
11. Tomashevskiy, O.O., Balytska, N.O. and Prylypko, O.I. (2024), «Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу», *Технічна інженерія*, Issue 1 (93), pp. 81–88, doi: 10.36910/technical-engineering.2024.93.11.
12. Dutta, S., Sarma, D.K., Vora, J. et al. (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*, Vol. 9, No. 6, 183 p., doi: 10.3390/jmmp9060183.
13. Kuppuswamy, R. and Yui, A. (2015), «High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, doi: 10.1007/s00170-015-7598-9.

14. Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P. and Dudzinski, D. (2014), «Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation», *Precision Engineering*, Vol. 38, No. 2, pp. 356–364, doi: 10.1016/j.precisioneng.2013.11.006.
15. Biermann, D., Kahleyss, 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.
16. Gao, L., Wang, J., Huo, H. et al. (2024), «Residual height of surface topography in milling nickel-titanium shape memory alloy using a small-diameter cutter», *Materials Letters*, Vol. 361, doi: 10.1016/j.matlet.2024.136105.
17. Du, H., Wu, C., Li, D. et al. (2023), «Feasibility study on ultraprecision micro-milling of the additively manufactured NiTi alloy for generating microstructure arrays», *Journal of Materials Research and Technology*, Vol. 25, pp. 55–67, doi: 10.1016/j.jmrt.2023.05.214.
18. Yang, H., Sakai, K., Shizuka, H. et al. (2021), «Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting process of super-elastic NiTi alloy», *International Journal of Automation Technology*, Vol. 15, No. 1, pp. 24–33, doi: 10.20965/ijat.2021.p0024.

Балицька Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>.

Наукові інтереси:

- дослідження процесів механічної обробки важкооброблюваних матеріалів;
- забезпечення експлуатаційних характеристик виробів формуванням періодичної текстури поверхонь;
- проектування різальних інструментів.

Balytska N.O.

Technological peculiarities of micromilling texturing of NiTi alloy surfaces

NiTi alloys are characterized by shape memory effect, pseudoelasticity, corrosion resistance, and biocompatibility, which determines their wide application in medicine, instrumentation, mechanical engineering, and many other industries. By altering the surface topography, it is possible to modify the functional properties of product surfaces. Mechanical texturing, unlike other surface modification methods, can provide a wide variety of surface texture topologies, a shallower induced surface layer, reliability, and geometric accuracy of surface textures without degrading their functional properties over time, as well as environmental friendliness and cost-effectiveness. This necessitates the development of technologies for micromechanical modification of surfaces of NiTi alloy products, which are characterized by very low machinability due to intense burr formation, low micromilling cutter stability, and phase transformations in the surface layer of the machined surface. This work is devoted to experimental investigation of micromilling texturing of surfaces of austenitic alloy Ni_{56,5}Ti_{43,5} by TiAlN-coated carbide micromilling cutters with diameters of 0,2, 0,5, and 1 mm. The work verifies the technological feasibility of micromilling nitinol on conventional speed machining centers. The cutting force signals and tool wear during micromilling of textures of various shapes, as well as their topography, are analyzed. The phenomena accompanying the microcutting process and causing intensive tool wear and burr formation are discussed. The manufacturability of different types of surface microtextures is compared, i.e. microgrooves, micropillars, and microdimples. The basic principles of the technology of micromilling texturing of NiTi alloy surfaces applying a universal machining center with grinding technology support are developed. The results obtained deepen the understanding of the processes of micromilling of NiTi alloy surfaces.

Keywords: texturing technology; micromilling; NiTi; cutting forces; surface topography.

Стаття надійшла до редакції 01.09.2025.