

## Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми

У роботі представлено огляд сучасних наукових досліджень процесу механічного оброблення сплавів Ni-Ti (нітинолів). Ці функціональні матеріали зазнають мартенситних перетворень, які визначають їх особливі фізико-механічні властивості (ефект пам'яті форми, надпружність, високу демпфуючу здатність та ін.). Описано фізико- та термомеханічні властивості сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми, а також явища, які супроводжують процес різання та обумовлюють низьку оброблюваність цих матеріалів. Проведено огляд раціональних інструментальних матеріалів, режимів різання та умов оброблення, які пропонуються сучасними практиками та дослідниками. Проаналізовано результати відомих робіт із визначення сил різання, температур, стійкості інструментів, шорсткості та мікротвердості оброблених поверхонь, глибини зміцненого шару та залишкових напружень. Обговорюються результати експериментальних досліджень процесу торцевого фрезерування нітинолів в умовах сухої, криогенної обробки та обробки із мінімальним змащуванням. Виявлено недостатність ґрунтовних і масштабних досліджень процесів торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми різних марок для призначення умов їх гарантовано ефективного оброблення. Обґрунтована необхідність подальших наукових пошуків перспективних шляхів підвищення ефективності торцевого фрезерування нітинолів із забезпеченням високої якості поверхневого шару виробів.

**Ключові слова:** нітинол; фазовий перехід; аустеніт; мартенсит; режими різання.

**Актуальність теми.** В останні двадцять років широкого поширення набувають конструкційні матеріали нового покоління, так звані інтелектуальні матеріали. До них належать матеріали з ефектом пам'яті форми (ЕПФ). Ефект пам'яті форми – це відновлення початкової форми конструктивного елемента при температурі фазового перетворення під час нагрівання. За рахунок фазового перетворення відновлюється до 6...8 % пластичної деформації (нікелід титану). Рівень реактивних напружень деяких матеріалів з ЕПФ може досягати 1000...1300 МПа. Особливістю сплавів з ЕПФ є чітка залежність властивостей від їх структури.

Сплави з ЕПФ привернули інтерес наукової спільноти, головним чином, завдяки своїм особливим властивостям, які роблять їх ідеальними матеріалами для застосування в автомобільній, аерокосмічній промисловості, медицині, приладобудуванні, у будівництві трубопроводів, морських суден та інших галузях. Сфера їх використання постійно розширюється, і вже існують численні комерційні застосування.

Сплав Ni-Ti (нікелід титану, нітинол) є найбільш часто використовуваним сплавом з ЕПФ. Він знаходиться в мартенситній фазі за низьких температур і в аустенітній фазі – за високих температур, що і визначає особливості його оброблення. Механічна обробка нікелідів титану характеризується низькою стійкістю різальних інструментів, утворенням задирок та білого шару на обробленій поверхні тощо. Це пов'язано з ефектом пам'яті форми, ефектом надпружності, високою пластичністю і великим деформаційним зміцненням у процесі зрізання стружки. Модуль пружності цих матеріалів може змінюватися в різні моменти процесу обробки, що впливає на оброблюваність матеріалу та якість готового продукту.

Більшість сучасних наукових досліджень процесу фрезерування нікелідів присвячена мікрофрезеруванню твердосплавними фрезами. Однак торцеве фрезерування застосовується для виготовлення авіаційних, автомобільних деталей та великих пластин, які використовуються для з'єднання кісток у медицині. Тому аналіз особливостей механічного оброблення сплавів Ni-Ti з ЕПФ на предмет пошуку шляхів підвищення ефективності торцевого фрезерування матеріалів цієї групи є актуальним завданням сучасного машинобудування.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спирається автор.** Значний внесок у дослідження матеріалів з ЕПФ і розширення областей їх використання зробили С.П. Беляєв, С.В. Добаткін, В.Г. Курдюмов, В.А. Ліхачев, Ю.М. Коваль, Л.Ф. Головка, О.В. Бродовий, С.Г. Бунчук, С.М. Вейман, Я. Ван-Хумбек, Д.І. Лі, С.Міязакі, К.Ооцука та ін.

На сьогодні відомо про обмежену кількість ґрунтовних робіт по аналізу процесів механічного оброблення сплавів Ni-Ti з ЕПФ. Серед таких робіт варто виокремити дослідження E.Kaival та ін. [1],

C.Velmurugan та ін. [2]. Експериментальні дослідження процесу торцевого фрезерування нікелідів титану проводив E.Altas та ін. [3, 4].

Інформаційну основу літературного огляду, представленого в цій роботі, становлять результати досліджень зазначених вище авторів.

**Метою статті** є дослідження впливу режимів різання, умов охолодження і змащення, а також інструментального матеріалу на оброблюваність, якісні та експлуатаційні характеристики оброблених поверхонь зі сплавів Ni-Ti з ЕПФ при торцевому фрезеруванні.

**Викладення основного матеріалу.**

**Властивості нітинолів.** Найбільш перспективними сплавами з ЕПФ для практичного застосування є сплави Ni-Ti. Нітиноли – це сплави високого демпфування, які являють собою тверді розчини на базі інтерметалідного з'єднання мононікеліда титана із вмістом близько 55 % Ni. Вихідна структура нікелід титана – стабільна об'ємоцентрична кубічна ґратка типу CsCl, яка при деформації витримує термопружне мартенситне перетворення з утворенням фази низької симетрії [5].

Нікелід титана характеризується дуже високою корозійною стійкістю, високою міцністю, хорошою біологічною сумісністю, високою демпфуючою здатністю (табл. 1). Разом з тим, цей матеріал має низьку технологічність, оброблюваність та високу вартість.

Таблиця 1

## Фізико-механічні властивості нітинолів

Властивість, од. вим.	Значення
Густина, с/см <sup>3</sup>	6,45...6,55
Температура плавлення, °С	1240...1310
Питома теплоємність, кал/моль·°С	6...15
Інтервал температур перетворень, °С	-60...+160
Частково відновлювана деформація, %	8...15
Теплопровідність, Вт/см·град	0,01
Коефіцієнт лінійного розширення, град <sup>-1</sup>	$6 \times 10^{-6} \dots 14 \times 10^{-6}$
Модуль нормальної пружності при T = 100 °С, МПа	50000...74000
Модуль зсуву при T = 100 °С, МПа	22000...25000
Коефіцієнт Пуассона	0,33...0,48
Межа текучості, МПа	250...1100
Відносне подовження, %	10...55
Деформація, обернена при нагріванні, %	8...10
Ступінь відновлення форми, %	92...100
Реактивне напруження, Н/мм <sup>2</sup>	400...950
Температурний інтервал відновлення форми, °С	30...15

Ефект пам'яті форми сплавів Ni-Ti ґрунтується на мартенситних перетвореннях двох видів – прямого і зворотного. Кожне із перетворень має свій температурний інтервал:  $M_n$  і  $M_k$  – початок і кінець прямого мартенситного перетворення при охолодженні,  $A_n$  і  $A_k$  – початок і кінець зворотного мартенситного перетворення при нагріві (табл. 2). Температура мартенситних перетворень строго залежить від хімічного складу сплаву. Навіть мінімальні зміни хімічного складу, в тому числі через брак при виготовленні, призводять до кардинального зсуву цих температур.

Цілеспрямована зміна структури та функціонально-механічних властивостей сплавів Ni-Ti значною мірою обумовлюється термічною та механічною обробкою. Найбільше на функціональні властивості та температурний інтервал прояву мартенситної непружності впливають: хімічний склад сплаву; параметри термо- або термомеханічної обробки; технологічна спадковість, що визначається доданими зовнішніми впливами (напруження, історія навантажень тощо).

Таблиця 2

## Температура мартенситних перетворень нітинолів

Мартенситне перетворення	50 % Ni	50,5 % Ni	51 % Ni
	Температура мартенситних перетворень, °С		
$M_n - M_k$	40...65	-5...-20	-95...-65
$A_n - A_k$	95...105	25...55	-30...10

Ефект термопружних бездифузійних мартенситних перетворень не є єдиною нетривіальною характеристикою нітинолів. Великий практичний інтерес, крім ЕПФ, становить також явище надпружності. Надпружність – властивість матеріалу, підданого навантаженню до напруження, що значно перевищує межу текучості, повністю відновлювати початкову форму після зняття навантаження. Цей ефект можна проілюструвати таким чином (рис. 1). Зразок зі сплаву з ЕПФ при температурі вище за  $A_c$  (в аустенітному стані) навантажується і потім охолоджується. В інтервалі температур ( $M_n...M_s$ ) спостерігається інтенсивне накопичення деформації в результаті прямої мартенситної реакції. Після зняття навантаження деформація зберігається. При подальшому нагріванні деформованого зразка деформація зникає, що є демонстрацією ЕПФ.

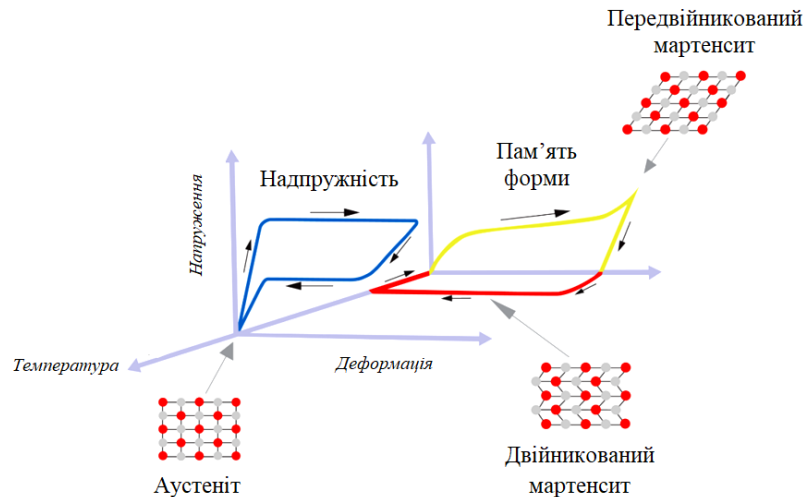


Рис. 1. Термомеханічні властивості нітинолів [6]

**Оброблюваність сплавів Ni-Ti з ЕПФ.** Для виробництва точних і якісних деталей із сплавів Ni-Ti застосовуються операції механічної обробки. Однак нітиноли належать до важкооброблюваних матеріалів через високе деформаційне зміцнення, особливі пружно-деформаційні характеристики, сильну адгезію та складне стружкоутворення. Такі властивості матеріалу, як низька теплопровідність, висока питома теплоємність і низький ефективний модуль пружності, вважаються додатковими обмеженнями. Всі згадані фактори призводять до низької оброблюваності, яка супроводжується високою питомою енергією та силами різання [7], сильним зношуванням інструменту [8] та надмірним утворенням задирок [9], а це в свою чергу може негативно вплинути на характеристики цілісності та якості поверхневого шару готового виробу.

Фазове перетворення відіграє велику роль у механічній обробці сплавів Ni-Ti. Температурний інтервал фазових перетворень нітинолів досить вузький (близько 80 °C) і залежить від хімічного складу матеріалу, попередньої термічної обробки, способу виробництва та ін. Навіть незначна зміна температури в процесі різання може істотно змінити властивості матеріалу, тому оброблюваність матеріалу є досить чутливою навіть до невеликих змін умов обробки.

Наприклад, сплав Ni-Ti із симетричною кубічною кристалічною ґраткою в аустенітній фазі відрізняється вищою пружністю і міцністю ( $\sigma_T = 100...800$  МПа,  $E = 75...80$  ГПа). Однак, коли він знаходиться у фазі мартенситу із несиметричною ґраткою, то він характеризується меншою пружністю і нижчою міцністю ( $\sigma_T = 50...300$  МПа,  $E = 28$  ГПа) [10]. Це призводить до вузького діапазону раціональних параметрів обробки [11], які найчастіше визначаються експериментальними дослідженнями для конкретних умов різання.

Експлуатаційні характеристики сплавів Ni-Ti з ЕПФ мають велике значення. Показано, що вони можуть залежати від умов механічної обробки [12], що пояснюється впливом прикладених навантажень і температур на структуру цих сплавів. Високі температури та пластичні деформації діють на поверхневі та підповерхневі шари заготовки із різною інтенсивністю залежно від режимів та умов різання. Відповідно, це впливає на властивості фазових перетворень і у свою чергу на експлуатаційні характеристики виробів.

Як зазначено вище, механічна обробка Ni-Ti є дуже складною через високе деформаційне зміцнення, низьку теплопровідність, високу питому теплоємність і низький ефективний модуль пружності. Усі ці фактори роблять властивості цих сплавів унікальними та призводять до сильного зносу інструменту, високих сил та температур різання, несприятливих умов стружкоутворення і стружковідведення. Враховуючи той факт, що оброблюваність цих сплавів є унікальною та ще недостатньо вивченою,

необхідні широкі експериментальні дослідження процесів різання сплавів Ni-Ti різного хімічного складу при змінних умовах обробки.

**Інструментальні матеріали для обробки сплавів Ni-Ti з ЕПФ.** Інструментальні матеріали, такі як тверді сплави із різними видами покриттів, різальна кераміка, кубічний нітрид бору (CBN) і полікристалічний алмаз (PCD), демонструють задовільні результати при обробці важкооброблюваних матеріалів (нержавіюча сталь, жароміцні сплави, титанові сплави) за умови застосування раціональних умов і режимів різання. Процес механічної обробки сплавів Ni-Ti міг би бути подібним до обробки жароміцних сплавів на основі нікелю (наприклад, Inconel 718) або титанових сплавів (наприклад, Ti6Al4V). Проте практичний досвід свідчить про істотні відмінності в оброблюваності цих матеріалів. Основна причина – це унікальна поведінка сплавів нікелідів титану при фазових перетвореннях, спричинених механічною обробкою.

Вибір інструментального матеріалу базується на його здатності зберігати твердість, ударну в'язкість і хімічну стабільність за високих температур. Подібно до жароміцних сплавів на основі нікелю та деяких титанових сплавів під час обробки сплавів Ni-Ti спостерігалися надвисокі температури різання, зосереджені в зоні вершини різального інструменту. Основними причинами такої концентрації тепла є низька теплопровідність і відносно висока питома теплоємність матеріалу.

Відома велика кількість досліджень щодо ефективності застосування різних інструментальних матеріалів для обробки жароміцних сплавів на основі нікелю та титанових сплавів. Однак на сьогоднішній день все ще не достатньо аналогічних ґрунтовних досліджень з механічної обробки саме сплавів Ni-Ti з ЕПФ.

Інструменти з карбіду вольфраму (WC) довели свою перевагу майже у всіх процесах обробки нікелевих і титанових сплавів [13]. Відомо, що склад і мікроструктура сильно впливають на продуктивність твердосплавних інструментів. Комерційні твердосплавні інструменти містять сполучну фазу кобальту в діапазоні від 3 до 12 %, а розмір зерна карбіду цих інструментів коливається від 0,5 до 5 мкм. Як правило, збільшення розміру зерна або вмісту кобальту призводить до зниження стійкості, стирання та підвищення ударної в'язкості. Одним із недоліків твердосплавних інструментів є їх низька термохімічна стійкість. При температурах вище за 700 °C твердосплавні інструменти часто виходять з ладу внаслідок термічного розм'якшення кобальтової фази та подальшої пластичної деформації різальної кромки [14]. Дослідження показали, що максимальна температура в зоні контакту інструмента і стружки може досягати 1300 °C при обробці нікелевих сплавів [15] і 1000 °C при обробці титанових сплавів [16]. Тому, наявними на сьогоднішній день твердосплавними інструментами не виявляється можливим обробляти сплави Ni-Ti при високих швидкостях різання (вище 100 м/хв).

Впровадження твердосплавних інструментів із PVD (фізичне осадження) та CVD (хімічне осадження) покриттями дозволило здійснювати різання важкооброблюваних матеріалів на вищих швидкостях різання зі зменшеним зносом інструменту. При цьому також забезпечуються нижчі сили та температури різання внаслідок меншого коефіцієнта тертя та вищої теплопровідності матеріалів покриттів.

Процес PVD здійснюється при нижчих температурах, ніж CVD. Нижча температура осадження забезпечує зменшення зернистості шару покриття шляхом запобігання утворенню η-фази [17]. Утворення η-фази та/або залишкових напружень у CVD-покриттях зменшило межу міцності на згин твердосплавних інструментів на 30 % порівняно з PVD-покриттями [17, 18]. Експерименти з токарної обробки Inconel 718 показали, що твердосплавні пластини з багат шаровим PVD покриттям продемонстрували вищу абразивну стійкість інструменту порівняно із пластинами з багат шаровим CVD-покриттям [19]. Подібна поведінка очікується і при механічній обробці Ni-Ti.

Результати обробки сплавів Ni-Ti за допомогою твердосплавних інструментів виявилися дуже подібними до результатів обробки жароміцних сплавів на основі нікелю. Значення швидкості різання від 50 до 90 м/хв [20–22] та 25–50 м/хв [22, 23] були запропоновані для отримання найвищої стійкості інструменту при обробці твердосплавними інструментами з та без PVD-покриттів відповідно. Швидкість різання до 150 м/хв була успішно застосована при високошвидкісному фрезеруванні сплаву Ti6Al4V твердосплавними інструментами з PVD-покриттям [24].

Кріогенна обробка є одним із широко використовуваних методів підвищення механічних властивостей різального інструменту. У процесі кріогенної обробки матеріали витримуються при невеликих або глибоких від'ємних температурах та поступово нагріваються до кімнатної температури. Кріогенна обробка (< -190 °C) забезпечує перетворення залишкової аустенітної фази інструментального матеріалу на мартенситну, меншу та однорідну зернисту структуру. Отже, за допомогою кріогенної обробки можна виконувати модифікацію зернистої структури матеріалів та отримати значне покращення їх механічних властивостей (таких, як твердість, зносостійкість і втомна міцність) [25, 26].

Керамічні інструменти мають високу твердість при підвищених температурах і хімічну інертність із більшістю конструкційних матеріалів. Однак їх ударна в'язкість і теплопровідність значно нижчі, ніж у твердих сплавів. Для різальних інструментів використовуються переважно три види кераміки: оксид

алюмінію ( $Al_2O_3$ ); армована кераміка ( $Al_2O_3 + SiC_w$ ),  $SiAlON$  ( $S_3N_4 + Al_2O_3$ ). Дослідження показали, що жароміцні сплави на основі нікелю можна обробляти керамічним інструментом зі швидкостями до 250–500 м/хв з мінімальним зносом інструменту [27]. Тому в багатьох застосуваннях різальна кераміка замінила твердосплавні інструменти при обробці сплавів на основі нікелю. І навпаки, при обробці титанових сплавів різальна кераміка не показала найкращих результатів через її низьку теплопровідність та реакційну здатність із титаном [13]. На сьогодні не існує комерційно доступного керамічного інструменту для обробки титану.

У роботі [28] досліджувалася оброблюваність сплавів Ni-Ti за допомогою  $Al_2O_3$  та змішаної кераміки ( $Al_2O_3 + TiC$ ). Авторами було встановлено, що досліджувані керамічні матеріали не здатні ефективно обробляти нікеліди титану. Армована кераміка може дати кращі результати, оскільки вона має вищу теплопровідність і вищу ударну в'язкість порівняно з оксидною керамікою.

Надтверді інструментальні матеріали (CBN і PCD) показали хороші результати при обробці нікелевих і титанових сплавів.

CBN використовується для обробки різних важкооброблюваних матеріалів, таких як загартована сталь, чавун, жароміцні сплави на основі нікелю та титанові сплави. Інструменти із CBN демонструють вищу міцність та теплопровідність, порівняно з різальною керамікою. Інструменти із CBN, як правило, складаються з 50...90 % CBN і керамічних зв'язок (TiC, TiN). Основним недоліком цих інструментальних матеріалів є їх висока вартість. Однак витрати на обробку жароміцних сплавів на основі нікелю за допомогою інструментів із CBN можуть бути виправдані підвищенням продуктивності обробки [28]. Механічна обробка Inconel 718 інструментами із CBN при швидкостях різання 300...350 м/хв дала позитивні результати щодо сил різання, якості поверхні, стійкості інструменту та залишкових напружень [29]. Крім того, спостерігалися менші залишкові напруження розтягу при обробці Inconel 718 порівняно з керамічними різальними інструментами [30]. При обробці  $Ti_6Al_4V$  різальні інструменти із CBN за швидкості різання 200...250 м/хв продемонстрували більшу стійкість порівняно з твердосплавними інструментами [31].

Інструменти із CBN без зв'язки продемонстрували високу стійкість інструменту при обробці титанових сплавів [32]. Цей результат, ймовірно, пов'язаний із кращими механічними і термічними властивостями CBN без зв'язки порівняно зі звичайним CBN. Таким чином, одним із перспективних напрямів досліджень є вивчення можливості застосування інструментів із CBN без зв'язки для різних методів механічної обробки нітинолів.

Різальні інструменти із PCD, на додаток до високої твердості, демонструють високі показники теплопровідності та виняткову зносостійкість. Однак інструменти із PCD хімічно активні із чорними металами при помірних температурах і піддаються графітизації. Дослідження показали, що при обробці сплаву  $Ti_6Al_4V$  інструментами із PCD спостерігалася триразове збільшення стійкості інструменту, краща якість поверхні і більша продуктивність порівняно з твердосплавними інструментами [33]. Оптимальне значення швидкості різання знаходиться в межах від 180 до 250 м/хв для процесів точіння [34] і фрезерування [35]. Такі результати пояснюються високою теплопровідністю і надзвичайною твердістю PCD, оскільки при механічній обробці титану основною проблемою є висока хімічна реакційна здатність титану при підвищених температурах. Разом з тим відомо, що використання різальних інструментів із PCD (92 % PCD, 8 % Co) при обробці сплавів Ni-Ti призвело до утворення високого зносу інструменту [28].

**Особливості фрезерування сплавів Ni-Ti.** Механіка фрезерування відрізняється переривчастим характером, який зумовлює особливості цього виду оброблення. Варто зауважити, що більшість наукових робіт з фрезерування сплавів Ni-Ti з ЕПФ сфокусовані на процесі кінцевого фрезерування. Питання ж торцевого фрезерування є недостатньо вивченими і потребують подальших ґрунтовних експериментальних досліджень.

У [36] досліджувався вплив швидкості різання, подачі та глибини різання на силу різання, характеристики обробленої поверхні та знос інструменту при кінцевому фрезеруванні сплаву Ni-Ti (50,6 % Ni, 49,4 % Ti) в аустенітній фазі. В діапазоні швидкостей різання 50...200 м/хв спостерігалися мінімальні сили різання (2...5 Н) з низьким рівнем зносу інструменту та найменшою шорсткістю поверхні (0,1 мкм, Ra). Ймовірно, причиною цього є зменшення товщини стружки та термічне розм'якшення оброблюваного матеріалу. Діапазон швидкості різання від 200 до 500 м/хв дав аналогічні результати щодо значень шорсткості поверхні, однак спостерігалися дещо вищі сили різання (5...7 Н) із сильним зносом інструменту. Це можна пояснити малою товщиною стружки та хімічною взаємодією інструментального та оброблюваного матеріалів. Збільшення подачі та глибини різання викликали збільшення сили різання, шорсткості поверхні і швидкості зношування твердосплавного інструменту. У всіх досліджуваних випадках автори встановили, що мікротвердість фрезерованих поверхонь (310...350 кг/мм<sup>2</sup>) була більшою ніж до обробки (220 кг/мм<sup>2</sup>). Подача та глибина різання не справили значного впливу на мікротвердість поверхні. Авторами встановлено, що глибина зміцненого шару

збільшувалася зі зменшенням швидкості різання. XRD-спектри зразка свідчать про відсутність зміни фаз оброблюваного матеріалу в процесі фрезерування.

У [10] досліджувалися характеристики якості поверхні сплаву Ni-Ti (50,8 % Ni, 49,2 % Ti) після обробки твёрдосплавною однозубою фрезою із покриттям AlTiN / TiN. Автори спостерігали знос, характерний для трибохімічного розчинення за високих температур. Найбільше утворення задирок спостерігалося при найвищому значенні подачі, що може пояснюватися високою пластичністю матеріалу, а не результатом фазового перетворення. Область під білим шаром мала двійникову структуру мартенситу. Товщина утворення підповерхневого білого шару також була найбільшою при найменшій подачі. Це пояснюється високими механічними навантаженнями при низькій подачі, що у свою чергу призводить до глибшого фазового перетворення, викликаного напруженнями. Ця підвищена твердість пояснюється утворенням аустенітної структури після зняття напружень різання після того, як велика пластична деформація спричинила роздвоєну мартенситну структуру.

Подібні результати були отримані в [37]. Результати цього дослідження свідчать про те, що термічне розм'якшення матеріалу може відбуватися за підвищених значень подачі. Коли високі температури різання переважали механічні деформації спостерігалося утворення більш вузького білого шару.

Відома незначна кількість досліджень процесу торцевого фрезерування сплаву Ni-Ti з ЕПФ (55,8 % Ni, 44,09 % Ti). Автори [3] виконували торцеве фрезерування в умовах сухого різання твёрдосплавними пластинами без покриття з різними радіусами заокруглення різальної кромки (0,4 і 0,8 мм). У результаті експериментів було встановлено, що збільшення радіуса заокруглення різальних кромок зменшує як знос бокової поверхні пластин, так і шорсткість поверхні. Вузький діапазон умов різання в згаданій роботі зумовлює необхідність подальших досліджень у цьому напрямі. Також варто підкреслити відсутність ґрунтовних робіт з дослідження впливу геометричних параметрів інструментів на характеристики процесу торцевого фрезерування нікелідів.

У [4] досліджувалася цілісність поверхні сплавів Ni-Ti з ЕПФ (55,8 % Ni, 44,09 % Ti) після процесів торцевого фрезерування кріогеннообробленими та необробленими твёрдосплавними різальними інструментами в умовах сухого різання та мінімальної кількості мастила. Визначено, що найбільша товщина зміцненого шару та найвища мікротвердість поверхні були отримані при обробці термічно необробленою фрезою з пластинами марки H13A в сухих умовах при швидкості різання 20 м/хв і подачі 0,14 мм/зуб.

Найменша товщина зміцненого шару і найменша мікротвердість поверхні отримані за допомогою фрези із пластинами S40T із покриттям CVD з глибокою кріогенною термічною обробкою (-196 °C) за мінімальної кількості мастила зі швидкістю різання 50 м/хв та подачею 0,03 мм/зуб. Характер отриманих результатів свідчить про фазові переходи в оброблюваному матеріалі за різних умов різання. Автори пояснюють отримані результати тим, що різальний інструмент після кріогенної обробки (-196 °C) був здатний поглинути більше тепла із зони різання, а це зменшувало мікроструктурні зміни в заготовці [38, 26]. Зменшення термічних і механічних навантажень породжує меншу зону деформації під обробленою поверхнею.

Відомі роботи, в яких з метою збереження мартенситної структури нітинолу в процесі різання застосовувалося кріогенне охолодження. Такий підхід призвів до меншого зносу інструменту та зменшення сили різання через більш м'яку структуру та нижчу межу текучості мартенситу.

Разом з тим було встановлено зростання пластичних деформацій, зміщення температур зворотного перетворення та збільшення поверхневого зміцнення, порівняно зі зразками після обробки в сухих умовах [39, 40].

Такий стан і результати досліджень зумовлюють необхідність подальшого вивчення фізико-хімічних процесів, які супроводжують торцеве фрезерування сплавів Ni-Ti з ЕПФ в широкому діапазоні факторів впливу (хімічний склад сплаву, вихідний стан сплаву, режими різання, попередня термічна обробка, інструментальний матеріал та покриття, умови змащування, геометричні параметри інструменту, стратегія обробки тощо).

**Висновки та перспективи подальших досліджень.** На основі проведеного аналізу досліджень можна зауважити такі особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ЕПФ.

Враховуючи область застосування (біомедична, аерокосмічна, автомобільна, приладобудівна галузі тощо), вироби із нікеліду титана мають бути високоточними, мати високу якість поверхонь та хороші експлуатаційні характеристики. Тому ступінь оброблюваності сплавів Ni-Ti слід оцінювати не тільки звичайними факторами оброблюваності (режими різання, стійкість інструменту, сили і температури різання, шорсткість і цілісність поверхні), але також і функціональною поведінкою виробів після обробки.

Особливостями механічної обробки нітинолів є інтенсивне зношування інструменту, висока питома енергія різання, високе деформаційне зміцнення, високі температури в зоні різання, можливі фазові переходи оброблюваного матеріалу в процесі оброблення (аустенітна або мартенситна фаза). Навіть незначні зміни умов різання можуть призвести до значних змін структури та властивостей матеріалу.

Знос інструменту є одним із основних обмежуючих факторів при високошвидкісній обробці сплавів Ni-Ti через підвищення температури в зоні різання. Застосування багат шарових CVD-покриттів твёрдосплавних різальних інструментів і криогенного охолодження здатні частково вирішити цю проблему за більш високих значень швидкості різання.

Одним із перспективних інструментальних матеріалів для обробки сплавів Ni-Ti із ЕПФ може бути CBN без зв'язки, проте необхідні ґрунтовні дослідження для оцінки доцільності його застосування.

Якщо основною метою є забезпечення стійкості інструменту за відносно високих швидкостей різання, а експлуатаційні характеристики обробленої поверхні не мають великого значення, то застосування криогенного охолодження, ймовірно, дасть сприятливі результати за рахунок ефектів охолодження та змащення. Також очікується, що застосування до області різання охолодженого повітря або мінімальної кількості мастила і охолодженого повітря разом (змащування та охолодження) дасть подібні результати. Разом з тим варто очікувати інтенсивного зміцнення поверхневого шару оброблюваного матеріалу.

Оптимальними режимами різання сплавів Ni-Ti з ЕПФ для забезпечення мінімальної шорсткості поверхні при сухому торцевому фрезеруванні твёрдосплавним інструментом без покриття є швидкість різання 20 м/хв і подача 0,03 мм/зуб. Для забезпечення найменшої товщини зміцненого шару, мікротвёрдості і шорсткості поверхні рекомендовано використовувати фрези із пластинами S40T із покриттям CVD з глибокою криогенною термічною обробкою (-196 °C) при мінімальній кількості мастила зі швидкістю різання 50 м/хв та подачею 0,03 мм/зуб.

Мінімізація утворення задилок при торцевому фрезеруванні нікелідів титану може бути забезпечена вибором оптимальних режимів різання для конкретних умов обробки.

На основі розглянутих особливостей торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ЕПФ можна виокремити такі перспективні шляхи підвищення ефективності процесу оброблення:

- визначення оптимальних умов оброблення комерційно доступними різальними інструментами сплавів різного хімічного складу із врахуванням різних температур фазових перетворень;
- розробка сучасних багат шарових покриттів різальних інструментів;
- розробка нових методів модифікації поверхонь різальних інструментів (криогенна обробка, текстурування тощо);
- дослідження можливості застосування новітніх інструментальних матеріалів (наприклад, CBN без зв'язки);
- дослідження впливу геометричних параметрів різального інструменту на характеристики процесу торцевого фрезерування;
- розробка комбінованих методів оброблення нітинолів.

#### Список використаної літератури:

1. *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. – 2019. – № 100 (7). – P. 2045–2087.
2. Machining of NiTi-shape memory alloys – A review / *C.Velmurugan, V.Senthilkumar, S.Dinesh, D.Arulkirubakaran* // Machining Science and Technology. – 2018. – № 22 (3). – P. 355–401.
3. *Altas E.* Investigation of the effects of machining parameters on tool life and surface roughness during the face milling of the NiTi shape memory alloy with uncoated tools / *E.Altas, H.Gokkaya, D.Ozkan* // Preprints. – 2020. DOI: 10.20944/preprints202008.0383.v1.
4. *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. – № 30 (12). – P. 9426–9439.
5. *Коваль Ю.М.* Сплави з ефектом пам'яті форми – потужний клас функціональних матеріалів / *Ю.М. Коваль* // Наука та інновації. – 2005. – Т. 1, № 2. – С. 80–95.
6. NPX Medical Joins Nextern [Electronic resource]. – Access mode : <https://npxmed.com/nitinol-medical-devices/>.
7. Drilling of NiTi shape memory alloys / *K.Weinert, V.Petzoldt, D.Kötter, M.Buschka* // Mater Werkst. – 2004. – № 35 (5). – P. 338–341.
8. *Weinert K.* Machining of NiTi based shape memory alloys / *K.Weinert, V.Petzoldt* // Materials Science and Engineering. – 2004. – № A 378 (1). – P. 180–184.
9. Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation / *R.Piquard, A.D'Acunto, P.Laheurte, D.Dudzinski* // Precision Engineering. – 2014. – № 38 (2). – P. 356–364.
10. Machinability and surface integrity of nitinol shapememory alloy / *Y.Guo, A.Klink, C.Fu, J.Snyder* // CIRP Annals. – Manufacturing Technology. – 2013. – № 62 (1). – P. 83–86.
11. *Biermann D.* Micromilling of NiTi shape-memory alloys with ball nose cutters / *D.Biermann, F.Kahleiss, T.Surmann* // Materials and Manufacturing Processes. – 2009. – № 24 (12). – P. 1266–1273.
12. *Kaynak Y.* Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining / *Y.Kaynak, H.Karaca, I.Jawahir* // Journal of Materials Engineering and Performance. – 2015. – № 24 (1). – P. 452–460.

13. *Ezugwu E.O.* Titanium alloys and their machinability – a review / *E.O. Ezugwu, Z.M. Wang* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 1997. – № 68 (3). – P. 262–274.
14. *Jianxin D.* Diffusion wear in dry cutting of Ti–6Al–4V with WC/Co carbide tools / *D.Jianxin, L.Yousheng, S.Wenlong* // *Wear*. – 2008. – № 265 (11). – P. 1776–1783.
15. *Kitagawa T.* Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti–6Al–6V–2Sn / *T.Kitagawa, A.Kubo, K.Maekawa* // *Wear*. – 1997. – № 202 (2). – P. 142–148.
16. Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies / *E.Ezugwu, R. Silva Da, J.Bonney, A.Machado* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2005. – № 45 (9). – P. 1009–1014.
17. *Handbook A.* ASM International Handbook Committee / *A.Handbook* // ASM International, Electronic. – 1989. – № 16.
18. *Wolfe G.* The role of hard coatings in carbide milling tools / *G.Wolfe, C.Petrosky, D.Quinto* // *Journal of Vacuum Science and Technology*. – 1986. – № 4A (6). – P. 2747–2754.
19. *Ezugwu E.O.* Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD- and CVDcoated tools / *E.O. Ezugwu, Z.M. Wang, C.I. Okeke* // *Tribology Transactions*. – 1999. – № 42 (2). – P. 353–360.
20. Tool wear assessment during machining of Inconel 718 / *M.A. Xavior, M.Manohar, P.Jeyapandiarajan, P.M. Madhukar* // *Procedia Engineering*. – 2017. – № 174. – P. 1000–1008.
21. Cutting forces and surface roughness in wet machining of Inconel alloy 738 with coated carbide tool / *B.Davoodi, H.A. Tazehkandi* // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2016. – № 230 (2). – P. 215–226.
22. *Thakur A.* Dry machining of nickelbased super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool / *A.Thakur, S.Gangopadhyay* // *Journal of Cleaner Production*. – 2016. – № 129. – P. 256–268.
23. Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718 / *A.Bhatt, H.Attia, R.Vargas, V.Thomson* // *Tribology International*. – 2010. – № 43 (5–6). – P. 1113–1121.
24. Investigation on diffusion wear during high-speed machining Ti–6Al–4V alloy with straight tungsten carbide tools / *S.Zhang, J.F. Li, J.X. Deng, Y.S. Li* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2008. – № 44 (17).
25. *Hayati F.* Influence of cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy / *F.Hayati, O.Nuri* // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2020. – № 29 (10). – P. 6974–6984.
26. *Akıncıoğlu S.* A review of cryogenic treatment on cutting tools / *S.Akıncıoğlu, H.Gökkaya, I.Uygur* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2015. – № 78 (9). – P. 1609–1627.
27. Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures / *E.O. Ezugwu, J.Bonney, D.A. Fadare, W.F. Sales* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2005. – № 162–163. – P. 609–614.
28. *Weinert K.* Turning and drilling of NiTi shape memory alloys / *K.Weinert, V.Petzoldt, D.Kötter* // *CIRP Annals*. – 2004. – № 53 (1). – P. 65–68.
29. *Bushlya V.* Effect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools / *V.Bushlya, J.Zhou, J.-E. Ståhl* // *Procedia CIRP*. – 2012. – № 3. – P. 370–375.
30. *Arunachalam R.* Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools / *R.Arunachalam, M.Mannan, A.Spowage* // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2004. – № 44 (9). – P. 879–887.
31. Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: a review / *M.Dogra, V.S. Sharma, A.Sachdeva and other* // *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. – 2010. – № 11 (2). – P. 341–358.
32. *Zareena A.R.* Binderless CBN tools, a breakthrough for machining titanium alloys / *A.R. Zareena, M.Rahman, Y.Wong* // *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. – 2005. – № 127 (2). – P. 277–279.
33. Effectiveness of uncoated WC–Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy—Ti–6Al–4V / *A.K.M. Nurul Amin, Ahmad F. Ismail, M.K. Nor Khairusshima* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2007. – № 192–193. – P. 147–158.
34. Tool life and surface integrity in high-speedmilling of titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools / *S.Honghua, L.Peng, F.Yucan, X.Jiuhua* // *Chinese Journal of Aeronautics*. – 2012. – № 25 (5). – P. 784–790.
35. *Oosthuizen G.A.* The performance of PCD tools in high-speed milling of Ti6Al4V / *G.A. Oosthuizen, G.Akdogan, N.Treurnicht* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2011. – № 52 (9). – P. 929–935.
36. *Huang H.* A study of high-speed milling characteristics of nitinol / *H.Huang* // *Materials and Manufacturing Processes*. – 2004. – № 19 (2). – P. 159–175.
37. Surface characteristics of machined NiTi shape memory alloy: the effects of cryogenic cooling and preheating conditions / *Y.Kaynak, B.Huang, H.Karaca, I.Jawahir* // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2017. – № 26 (7). – P. 3597–3606.
38. *Akıncıoğlu S.* The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of hastelloy C22 based on Taguchi method / *S.Akıncıoğlu, H.Gökkaya, I.Uygur* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – № 82 (1–4). – P. 303–314.
39. *Kaynak Y.* Cryogenic machining of NiTi shape memory alloy / *Y.Kaynak, H.Karaca, I.S. Jawahir* // *In 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies / Mold*. – 2011. – P. 23–26.
40. Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation / *R.Piquard, A.D’Acunto, P.Laheurte, D.Dudzinski* // *Precision Engineering*. – 2014. – № 38 (2). – P. 356–364.



## References:

1. Kaya, E. and Kaya, İ. (2019), «A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 100 (7), pp. 2045–2087.
2. Velmurugan, C., Senthilkumar, V., Dinesh, S. and Arulkirubakaran, D. (2018), «Machining of NiTi-shape memory alloys – A review», *Machining Science and Technology*, No. 22 (3), pp. 355–401.
3. Altas, E., Gokkaya, H. and Ozkan, D. (2020), «Investigation of the effects of machining parameters on tool life and surface roughness during the face milling of the NiTi shape memory alloy with uncoated tools», *Materials Science, Preprints*, doi: 10.20944/preprints202008.0383.v1.
4. 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*, No. 30 (12), pp. 9426–9439.
5. Koval', Ju.M. (2005), «Splavy z efektom pam'jati formy – potuzhnyj klas funkcional'nyh materialiv», *Nauka ta innovacii*, Vol. 1, No. 2, pp. 80–95.
6. *NPX Medical Joins Nextern*, [Online], available at: <https://npxmed.com/nitinol-medical-devices/>
7. Weinert, K., Petzoldt, V., Kötter, D. and Buschka, M. (2004), «Drilling of NiTi shape memory alloys», *Mater Werkst*, No. 35 (5), pp. 338–341.
8. Weinert, K. and Petzoldt, V. (2004), «Machining of NiTi based shape memory alloys», *Materials Science and Engineering*, No. A 378 (1), pp.180–184.
9. Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P. and Dudzinski, D. (2014), «Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation», *Precision Engineering*, No. 38 (2), pp. 356–364.
10. Guo, Y., Klink, A., Fu, C. and Snyder, J. (2013), «Machinability and surface integrity of nitinol shapememory alloy», *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, No. 62 (1), pp. 83–86.
11. Biermann, D., Kahleys, F. and Surmann, T. (2009), «Micromilling of NiTi shape-memory alloys with ball nose cutters», *Materials and Manufacturing Processes*, No. 24 (12), pp. 1266–1273.
12. Kaynak, Y., Karaca, H. and Jawahir, I. (2015), «Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining», *Journal of Materials Engineering and Performance*, No. 24 (1), pp. 452–460.
13. Ezugwu, E.O. and Wang, Z.M. (1997), «Titanium alloys and their machinability – a review», *Journal of Materials Processing Technology*, No. 68 (3), pp. 262–274.
14. Jianxin, D., Yousheng, L. and Wenlong, S. (2008), «Diffusion wear in dry cutting of Ti–6Al–4V with WC/Co carbide tools», *Wear*, No. 265 (11), pp. 1776–1783.
15. Kitagawa, T., Kubo, A. and Maekawa, K. (1997), «Temperature and wear of cutting tools in high-speed machining of Inconel 718 and Ti–6Al–6V–2Sn», *Wear*, No. 202 (2), pp. 142–148.
16. Ezugwu, E., Da, Silva, R., Bonney, J. and Machado, A. (2005), «Evaluation of the performance of CBN tools when turning Ti–6Al–4V alloy with high pressure coolant supplies», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 45 (9), pp. 1009–1014.
17. Handbook, A. (1989), «ASM International Handbook Committee», *ASM International, Electronic*, Vol. 16.
18. Wolfe, G., Petrosky, C. and Quinto, D. (1986), «The role of hard coatings in carbide milling tools», *Journal of Vacuum Science and Technology*, No. 4A (6), pp. 2747–2754.
19. Ezugwu, E.O., Wang, Z.M. and Okeke, C.I. (1999), «Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD- and CVDcoated tools», *Tribology Transactions*, No. 42 (2), pp. 353–360.
20. Xavior, M.A., Manohar, M., Jeyapandiarajan, P. and Madhukar, P.M. (2017), «Tool wear assessment during machining of Inconel 718», *Procedia Engineering*, No. 174, pp. 1000–1008.
21. Davoodi, B. and Tazehkandi, H.A. (2016), «Cutting forces and surface roughness in wet machining of Inconel alloy 738 with coated carbide tool», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, No. 230 (2), pp. 215–226.
22. Thakur, A. and Gangopadhyay, S. (2016), «Dry machining of nickelbased super alloy as a sustainable alternative using TiN/TiAlN coated tool», *Journal of Cleaner Production*, No. 129, pp. 256–268.
23. Bhatt, A., Attia, H., Vargas, R. and Thomson, V. (2010), «Wear mechanisms of WC coated and uncoated tools in finish turning of Inconel 718», *Tribology International*, No. 43 (5–6), pp. 1113–1121.
24. Zhang, S., Li, J.F., Deng, J.X. and Li, Y.S. (2008), «Investigation on diffusion wear during high-speed machining Ti-6Al-4V alloy with straight tungsten carbide tools», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 44 (17).
25. Hayati, F. and Nuri, O. (2020), «Influence of cryogenic treatment on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy», *Journal of Materials Engineering and Performance*, No. 29 (10), pp. 6974–6984.
26. Akıncıoğlu, S., Gökçaya, H. and Uygur, İ. (2015), «A review of cryogenic treatment on cutting tools», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 78 (9), pp. 1609–1627.
27. Ezugwu, E.O., Bonney, J., Fadare, D.A. and Sales, W.F. (2005), «Machining of nickel-base, Inconel 718, alloy with ceramic tools under finishing conditions with various coolant supply pressures», *Journal of Materials Processing Technology*, No. 162–163, pp. 609–614.
28. Weinert, K., Petzoldt, V. and Kötter, D. (2004), «Turning and drilling of NiTi shape memory alloys», *CIRP Annals*, No. 53 (1), pp. 65–68.
29. Bushlya, V., Zhou, J. and Ståhl, J.-E. (2012), «Effect of cutting conditions on machinability of superalloy Inconel 718 during high speed turning with coated and uncoated PCBN tools», *Procedia CIRP*, No. 3, pp. 370–375.

30. Arunachalam, R., Mannan, M. and Spowage, A. (2004), «Residual stress and surface roughness when facing age hardened Inconel 718 with CBN and ceramic cutting tools», *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, No. 44 (9), pp. 879–887.
31. Dogra, M., Sharma, V.S., Sachdeva, A. et al. (2010), «Tool wear, chip formation and workpiece surface issues in CBN hard turning: a review», *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, No. 11 (2), pp. 341–358.
32. Zareena, A.R., Rahman, M. and Wong, Y. (2005), «Binderless CBN tools, a breakthrough for machining titanium alloys», *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, No. 127 (2), pp. 277–279.
33. A.K.M., Nurul, Amin, Ahmad, F., Ismail, M.K., Nor, Khairusshima (2007), «Effectiveness of uncoated WC–Co and PCD inserts in end milling of titanium alloy–Ti–6Al–4V», *Journal of Materials Processing Technology*, No. 192–193, pp. 147–158.
34. Honghua, S., Peng, L., Yucan, F. and Jihua, X. (2012), «Tool life and surface integrity in high-speedmilling of titanium alloy TA15 with PCD/PCBN tools», *Chinese Journal of Aeronautics*, No. 25 (5), pp. 784–790.
35. Oosthuizen, G.A., Akdogan, G. and Treurnicht, N. (2011), «The performance of PCD tools in high-speed milling of Ti6Al4V», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 52 (9), pp. 929–935.
36. Huang, H. (2004), «A study of high-speed milling characteristics of nitinol», *Materials and Manufacturing Processes*, No. 19 (2), pp. 159–175.
37. Kaynak, Y., Huang, B., Karaca, H. and Jawahir, I. (2017), «Surface characteristics of machined NiTi shape memory alloy: the effects of cryogenic cooling and preheating conditions», *Journal of Materials Engineering and Performance*, No. 26 (7), pp. 3597–3606.
38. Akincioglu, S., Gokkaya, H. and Uygur, I. (2016), «The effects of cryogenic-treated carbide tools on tool wear and surface roughness of turning of hastelloy C22 based on Taguchi method», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, No. 82 (1–4), pp. 303–314.
39. Kaynak, Y., Karaca, H. and Jawahir, I.S. (2011), «Cryogenic machining of NiTi shape memory alloy», *In 6th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Mold*, pp. 23–26.
40. Piquard, R., D'Acunto, A., Laheurte, P. and Dudzinski, D. (2014), «Micro-end milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation», *Precision Engineering*, No. 38 (2), pp. 356–364.

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

Наукові інтереси:

- процеси механічної обробки;
- проектування різальних інструментів.

**Balytska N.O.**

#### **Features of face milling of Ni-Ti alloys with shape memory effect**

The paper reviews current research on the processing of Ni-Ti alloys (nitinol). These functional materials undergo martensitic transformations that determine their specific physical and mechanical properties (shape memory effect, superelasticity, high damping capacity, etc.). The physical and thermomechanical properties of Ni-Ti alloys with shape memory effect are described, as well as the phenomena that accompany the machining process and are the cause of the low machinability of these materials. An overview of suitable tool materials, cutting modes, and machining conditions proposed by modern practitioners and researchers is given. The results of known works on the determination of cutting forces, temperatures, tool life, roughness and microhardness of machined surfaces, depth of hardened layer and residual stresses are analyzed. The results of experimental studies of face milling process of nitinol under the conditions of dry, cryogenic machining and machining with minimum quantity lubrication are discussed. It was found that the processes of face milling of Ni-Ti alloys with shape memory effect of different brands have not yet been extensively and widely researched to determine the conditions for guaranteed effective machining. The need for further scientific research on promising ways to increase the efficiency of face milling of nitinol while ensuring high quality of the surface layer of the products is substantiated.

**Keywords:** nitinol; phase transition; austenite; martensite; cutting modes.

Стаття надійшла до редакції 06.10.2022.