

**БАЛИЦЬКА НАТАЛІЯ**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>e-mail: [tmkts\\_nno@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_nno@ztu.edu.ua)**МЕЛЬНИЧУК ПЕТРО**

Державний університет «Житомирська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-0361-756X>e-mail: [melnichukpp1952@ztu.edu.ua](mailto:melnichukpp1952@ztu.edu.ua)

## МІКРОФРЕЗЕРУВАННЯ, ЯК СПОСІБ ТЕКСТУРУВАННЯ ПОВЕРХОНЬ СПЛАВІВ Ni-Ti ДЛЯ МОДИФІКАЦІЇ ЗМОЧУВАНОСТІ

*Робота присвячена дослідженню перспектив застосування мікрофрезерного текстурування, як способу модифікації змочуваності поверхонь сплавів Ni-Ti. Описано основні явища змочування та вплив топології поверхні на її характеристики змочування. Обговорюються обмеження відомих математичних моделей прогнозування крайового кута змочування поверхні щодо застосування до поверхні, текстурованої мікрофрезеруванням. Визначено переваги мікрофрезерування, порівняно з іншими технологічними методами, для текстурування поверхонь з метою впливу на їх змочуваність. Розглянуто проблеми оброблюваності сплавів Ni-Ti та технічні складнощі їх мікрофрезерування, які мають бути враховані при розробці технологій мікрофрезерування. Визначено найбільш вивчені поверхневі мікротекстури для модифікації змочуваності поверхонь біомедичних сплавів, які можуть бути виготовлені мікрофрезеруванням.*

*Ключові слова:* крайовий кут змочування, нітінол, мікрорізання, стан Венцеля, стан Кассі-Бакстера.

**BALYTSKA NATALIYA****MELNYCHUK PETRO**

Zhytomyr Polytechnic State University

## MICROMILLING AS A METHOD OF TEXTURING Ni-Ti ALLOYS SURFACE FOR WETTABILITY MODIFICATION

*This article explores the potential of micro-milling texturing as a method for modifying the wettability of Ni-Ti alloy surfaces. The Ni-Ti alloy is particularly well-suited for implant manufacturing due to its capacity for body deformation, high strength, and biocompatibility. The modification of biomaterial surfaces with targeted alterations to their wetting properties represents a valuable approach to influencing cellular behaviour and eliciting desired biological responses. In this article, the fundamental phenomena of wetting are delineated. The surface free energy and geometric structure of solid surfaces govern their wetting properties; hence, modifying either of these factors can effect a change in the wettability of the surface. For a surface with a given surface free energy, a change in surface topography is employed to regulate the wettability of the surface. The article under discussion herein sets out to explore the limitations of the known mathematical models for predicting the contact angle of a surface as applied to a surface textured by micromilling. The paper goes on to compare the advantages of micromilling with other technological methods of surface texturing with regard to influencing their wetting properties. The paper sets out to consider the reasons for the low machinability of Ni-Ti alloys and the technical difficulties of their micromilling. It identifies the most studied surface textures for modifying the wetting properties of biomedical alloy surfaces that can be produced by micromilling. A comprehensive review of the literature reveals that micromilling allows for the fabrication of durable microtextures of diverse shapes and sizes without significant thermal effects on the surface or alterations in the chemical composition of the surface layer. This is of particular significance for preserving the functional properties of Ni-Ti alloy, a material with a shape memory effect.*

*Keywords:* contact angle, nitinol, micro-cutting, Wenzel state, Cassie-Baxter state.

### Постановка проблеми у загальному вигляді

#### та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Сплав Ni-Ti (нікелід титану, нітінол) – бінарний сплав зі складом близько 50 ат. % Ni і близько 50 ат. % Ti, який має властивість пам'яті форми. Нікелід титану має унікальні фізичні властивості пам'яті форми та надпружності, високу міцність та корозійну стійкість, високу демпфуючу здатність та відмінну біосумісність, а також перспективи широкого застосування в біомедичних пристроях та імплантатах, точних механізмах, авіа-, автомобіле-, суднобудуванні, приладобудуванні, верстатобудуванні, енергетиці, космічній техніці, мікроактуаторах, робототехніці, мікроелектромеханічних системах тощо.

Змочуваність поверхні нітінолу рідиною є важливим аспектом хімії його поверхні, який має різноманітні практичні застосування, насамперед в галузі біомедицини. Коли крапля рідини контактує з твердою поверхнею, вона або залишається на поверхні у вигляді краплі сферо- або напівсфероподібної форми, або розтікається по поверхні, утворюючи тонку плівку рідини. Цю властивість зазвичай характеризують за допомогою крайового кута змочування. Якщо крайовий кут змочування водою твердої поверхні перевищує 150°, вона називається супергідрофобною. Якщо ж кут змочування поверхні майже дорівнює 0°, поверхня називається супергідрофільною.

Сплав Ni-Ti ідеально підходить для виготовлення імплантатів, враховуючи його відмінну здатність до деформації в тілі, високу міцність та біосумісність. Змочуваність поверхні значно впливає на поглинання молекул фібробластів та/або бактерій. Підтверджено, що цілеспрямована модифікація поверхні біоматеріалів є цінним підходом до впливу на клітинну поведінку, що призводить до бажаних біологічних реакцій [1, 2]. Тому дослідження нових ефективних методів та розробка нових технологій модифікації поверхонь сплавів Ni-Ti для керування їх змочуваністю є актуальним питанням для різних

галузей промисловості.

### Аналіз досліджень та публікацій

Розгляд і порівняльний аналіз різних технологічних методів модифікації поверхонь матеріалів для керування їх змочуваністю виконаний в роботах [1, 3–10]. Результати цих робіт свідчать про забезпечення необхідних властивостей змочування матеріалів за рахунок виготовлення поверхневих текстур різної форми і розмірів.

Питання модифікації змочуваності біомедичних сплавів шляхом мікрофрезерування поверхневих текстур досліджувалися в роботах [11–13]. Цими роботами експериментально доведена можливість керування змочуваністю поверхонь біомедичних сплавів шляхом формування поверхневих мікротекстур методом мікрофрезерування на спеціальних мікрофрезерних верстатах.

Процес мікрофрезерування характеризується наступними технологічними проблемами: це важко прогнозований процес через масштабний ефект та ефект мінімальної товщини зрізу, високу чутливість до мікроструктури оброблюваного матеріалу (наприклад, неоднорідність, дефекти матеріалу); інтенсивний знос інструменту часто призводить не тільки до низької якості обробки, але і до поломки інструменту; процес характеризується значним утворенням заусенців, які складно видалити; висока чутливість різального інструменту до якості попередньої підготовки поверхні і вібрацій, які зумовлюють поломку інструменту і погіршення якості обробки; складність візуального контролю цілісності і зносу інструменту, а також якості обробки [14–16]. Ці проблеми значно підсилюються при мікрофрезеруванні нітинолів через їх специфічні фізико-механічні і термодинамічні властивості.

Відомо, що оброблюваність NiTi є дуже низькою з таких причин, як зміцнення при високій деформації, специфічні характеристики напружено-деформованого стану, сильна адгезія, схильність до фазових перетворень, ускладнене дроблення стружки та ін. [17–20] Властивості матеріалу, такі як низька теплопровідність, висока питома теплоємність і низький ефективний модуль пружності, вважаються додатковими обмеженнями. Ці фактори призводять до дуже низьких характеристик оброблюваності, таких як висока питома енергія і сили різання, інтенсивний знос інструменту і надмірне утворення задирок. Крім того, ці фактори можуть негативно впливати на характеристики цілісності поверхні готового виробу.

На сьогоднішній день кількість досліджень процесу мікрофрезерування Ni-Ti дуже обмеженою. Автори [21–24] експериментально досліджували процес мікрофрезерування Ni-Ti певних хімічних та фазових складів і визначили оптимальні умови різання для мінімізації сил різання та утворення задирок, а також для підвищення стійкості інструменту та якості обробленої поверхні для деяких окремих випадків. Разом з тим, в цих дослідженнях була продемонстрована практична можливість обробки поверхневих текстур мікрофрезами діаметром від 0,2 мм на оброблюючих центрах звичайної точності.

Ще одна проблема полягає у відсутності комерційно доступних мікрофрез, призначених для обробки саме Ni-Ti, а також у відсутності технологічних рекомендацій для їх ефективного оброблення. Провідні виробники виготовляють мікрофрези, призначені для широкого спектру титанових сплавів [25, 26]. Однак, Ni-Ti має набагато нижчу оброблюваність, ніж будь-які інші титанові сплави, що вимагає спеціальних умов різання.

Отже завдяки механічному механізму видалення матеріалу, мікрофрезерування є прямим, екологічно чистим та універсальним методом, який може бути використаний для створення мікротекстури поверхні з гарантовано високим терміном служби. Основними перевагами цього методу є варіативність конструкцій різального інструменту, висока геометрична точність оброблених мікротекстур, низький температурний вплив на поверхню, контрольована обробка поверхні.

Таким чином, незважаючи на технологічну складність процесу мікрофрезерування нітинолів, модифікація їх змочувальних характеристик цим способом із застосуванням оброблюючих центрів звичайної точності має великі перспективи практичного застосування. Однак впровадження та підвищення ефективності мікрофрезерування нітинолів для отримання мікротекстур необхідної форми потребує подальших досліджень.

### Формулювання цілей статті

**Метою роботи є:** дослідження перспектив застосування мікрофрезерного текстурування, як способу модифікації характеристик змочування поверхонь сплавів Ni-Ti.

### Виклад основного матеріалу

Поверхнева вільна енергія та геометрична структура твердих поверхонь контролюють їхню змочуваність [3, 12, 27]. Для поверхні із заданою поверхневою вільною енергією зміна топографії поверхні застосовується для керування її змочуваністю [4, 13, 28, 29].

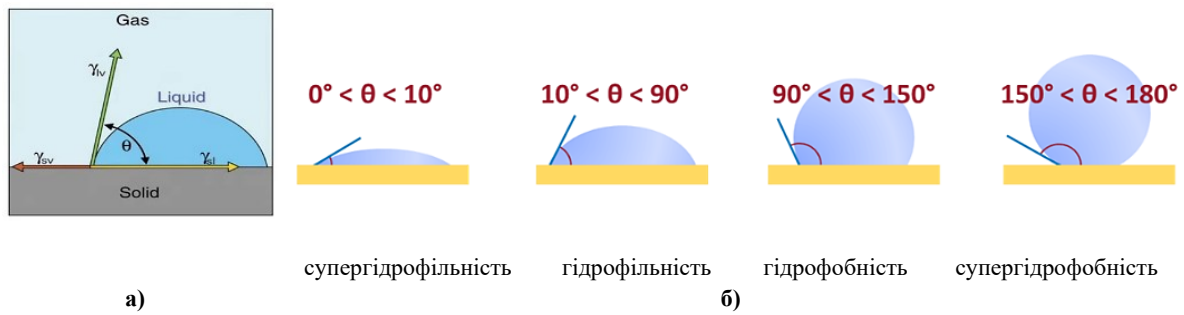
#### Явища змочування.

Як відомо, крайовий кут змочування  $\theta$  – це кут між дотичною до поверхні розділу фаз рідина-пара і дотичною до поверхні розділу фаз тверде тіло-рідина в точці їх перетину. Він кількісно визначає змочуваність твердої поверхні рідиною за допомогою рівняння Юнга:

$$\cos \theta = (\gamma_{sv} - \gamma_{sl}) / \gamma_{lv}, \quad (1)$$

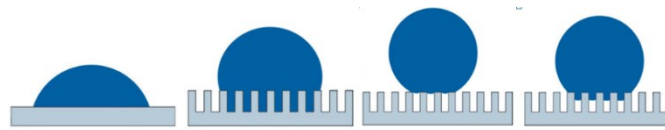
де  $\gamma_{sv}$ ,  $\gamma_{sl}$ , та  $\gamma_{lv}$  – різні поверхневі натяги (тверде тіло/пара, тверде тіло/рідина і рідина/пара), що беруть участь у системі (рис. 2,а).

Залежно від значень крайового кута змочування поверхні поділяються на гідрофільні ( $\theta < 90^\circ$ ) та гідрофобні ( $\theta > 90^\circ$ ) (рис. 2,б).



**а)** супергідрофільність      **б)** гідрофільність      гідрофобність      супергідрофобність  
**а) –** схема до рівняння Юнга (формула 1);  
**б) –** приклади змочування рідиною твердих поверхонь  
**Рис. 2.** Крайовий кут змочування краплі рідини на поверхні твердого тіла у середовищі повітря [30]

Для описання впливу шорсткості поверхні на крайовий кут краплі рідини на твердій поверхні зазвичай використовують рівняння Венцеля і Кассі-Бакстера (рис. 3).



**а)** крапля рідини на плоскій поверхні (модель Юнга);  
**б)** змочений контакт між рідиною та шорсткою поверхнею (модель Венцеля);  
**в)** незмочений контакт рідини з шорсткою поверхнею (модель Кассі-Бакстера);  
**г)** проміжний метастабільний стан між станами Венцеля та Кассі-Бакстера  
**Рис. 3.** Вплив топології поверхні на змочуваність твердих поверхонь [3]

У моделі Венцеля, як показано на рис. 3,б, рідина повністю заповнює канавки шорсткої поверхні:

$$\cos \theta_w = r \cos \theta, \tag{2}$$

де  $\theta_w$  – крайовий кут змочування в стані Венцеля, а  $r$  – коефіцієнт шорсткості поверхні.

**У моделі Кассі-Бакстера** припускається, що під рідиною знаходяться повітряні камери (рис. 3,в):

$$\cos \theta_c = -1 + f_s (\cos \theta + 1), \tag{3}$$

де  $f_s$  – частка площі твердого тіла.

Рівняння 3 показує, що для  $\theta > 90^\circ$  шорсткість поверхні збільшує кут змочування. Це відрізняється від випадку Венцеля, тому що навіть коли  $\theta$  рідини на гладкій поверхні менший за  $90^\circ$ , кут змочування все одно може бути збільшений за рахунок супергідрофобних повітряних кишень [3].

Згідно з рівнянням 3, для поверхні з однаковою шорсткістю повинні існувати два різні кути змочування. Коли поведінка змочування змінюється від стану Кассі-Бакстера до стану Венцеля, крапля рідини заповнює порожнини шорсткої поверхні зі зменшенням  $\theta$ , і рівняння 3 повинно виконуватися як до, так і після переходу. Прирівнюючи ці два результати, порогове значення між двома режимами можна отримати у вигляді рівняння 4:

$$\cos \theta_{T1} = (f_s - 1) / (r - f_s), \tag{4}$$

де індекс  $T1$  вказує на перехід між станами Венцеля і Кассі-Бакстера.

Якщо крайовий кут змочування нижчий за порогове значення, що визначається рівнянням 4, то повітряні камери метастабільні, і буде отримано режим Венцеля. Для того, щоб забезпечити режим змочування Кассі-Бакстера, тверда підкладка повинна бути достатньо гідрофобною або  $\theta_{T1}$  повинен бути якомога меншим, оскільки тільки при  $\theta > \theta_{T1}$  повітряні камери є стабільними [3].

Слід зазначити, що досі немає остаточної відповіді на питання, як досягається стабільний стан змочування. Незважаючи на певні успіхи в оцінці перехідного стану, конкретні умови переходу все ще не визначені. Таким чином, представлені теорії змочування є корисними, але недостатніми для опису реального процесу змочування поверхонь. Крім того, в експериментах з вивчення перехідного стану використовуються ідеалізовані системи.

Численні математичні моделі описують вплив топографії поверхні на кут змочування, його гістерезис, кути натікання і відтікання тощо. Більшість досліджень проводяться на строго текстурованих поверхнях, отриманих літографічним способом. Отже, математичні моделі часто є точними лише для певних геометричних структур поверхні. Вони навряд чи будуть застосовні до поверхонь інших масштабів, отриманих іншими технологічними методами (наприклад, різанням).

Наприклад, автори [31] описують крайовий кут змочування, як для плоских поверхонь, так і для шорстких біоміметичних супергідрофобних поверхонь з різною періодично організованою структурою.

Для поверхні з періодично розташованими однаковими квадратними виступами коефіцієнт шорсткості  $r_f$  пропонується визначати за рівнянням:

$$r_f = 1 + 8\eta \cdot r \cdot h = 1 + \frac{2p^2h}{r}, \quad (5)$$

де  $p$  – параметр пакування, який характеризує щільність виступів (для квадрата –  $p = 2r\sqrt{\eta}$ ;  $\eta$  – щільність виступів на одиницю площі);  $r$  – довжина сторони квадрата;  $h$  – висота виступів. Аналогічні параметри отримані також для поверхонь з виступами циліндричної, конічної, пірамідальної та напівсферичної форм.

Згадані вище моделі спираються на параметри, що описують взаємодію між рідкою і твердою фазами, які можуть бути охарактеризовані певними геометричними межами. Таким чином, метод визначення коефіцієнтів шорсткості поверхні має вирішальне значення при прогнозуванні характеристик змочування.

Разом з тим, ці залежності не враховують такі важливі характеристики, як шорсткість різних ділянок текстур. Для випадку мікрофрезерування це виявляється важливим аспектом, оскільки різні поверхні текстур (горизонтальні поверхні виступів і дна пазів, бічні поверхні пазів) матимуть різний мікрорельєф, що властиво процесу кінцевого фрезерування і залежить від вибору технології попередньої обробки поверхні, стратегії мікрофрезерування, конструкції фрези тощо. Таким чином, виникає необхідність розробки більш точної математичної моделі крайового кута змочування поверхні, текстурованої мікрофрезеруванням, яка враховує як макро- (геометричні параметри поверхневих текстур), так і мікрорельєф (шорсткість) всіх ділянок поверхневих текстур.

### Методи текстурування поверхонь.

На сьогодні відомі такі методи текстурування поверхонь, які радикально змінюють їх змочуваність: хімічне осадження з газової фази та сублімація, шаблонна, літографічна, лазерна, електрохімічна, золь-гель технології, реактивне іонне травлення, мікрорізання тощо [3, 5–8].

Гідрофобні/гідрофільні покриття зазвичай характеризуються коротким терміном служби через деградацію. Крім того, технологічний процес їх осадження часто супроводжується високотемпературними впливами, що може призвести до зміни фазового складу поверхні нітинолу і, як наслідок, до зміни його функціональних властивостей. Неточність розмірів текстур є проблемою електрохімічного методу модифікації поверхні. Після піскоструминної обробки залишки піску затримуються в мікрозаглибленнях поверхонь, що призводить до розмноження бактерій та інфекцій навколо імплантатів, виготовлених таким чином. Кислотне травлення змінює фізичні та механічні властивості матеріалу, а також спричиняє пошкодження поверхні імплантату.

Потенційними недоліками електроерозійної [1, 29] та лазерної [4, 9] обробки є термічні пошкодження поверхні. Недоліком лазерного методу модифікації поверхні пов'язані також зі зміною характеру змочування з часом [6, 10].

Враховуючи обмеження вищезазначених методів модифікації поверхонь, мікрофрезерування видається більш прийнятним технологічним методом. Механічне мікрофрезерування продемонструвало свій потенціал щодо подолання згаданих обмежень інших методів, а також щодо виготовлення мікротекстур різних форм і розмірів [13, 32, 33]. При цьому мікрофрезерування змінює текстуру, але не хімічний склад поверхневого шару поверхні.

### Особливості мікрофрезерування сплавів Ni-Ti.

Утворення заусенців є поширеною проблемою при мікрофрезеруванні нітинолів, яка може суттєво вплинути на якість біомедичних пристроїв та імплантатів, що є неприйнятним. При мікрофрезеруванні на окремих ділянках дуги контакту товщина зрізу і радіус заокруглення різальної кромки інструменту є співмірними, тому ефективний передній кут набуває значних від'ємних значень, що призводить до ефекту «оранки» і деформації матеріалу без стружкоутворення. На таких ділянках матеріал витискається без утворення стружки і проштовхується до верхньої грані пазу, створюючи верхні заусенці [16].

Режими мікрофрезерування і геометричні параметри інструменту, такі як подача на зуб, глибина різання і радіус заокруглення різальної кромки інструменту, знаходяться в діапазоні розмірів кристалічних зерен матеріалу. Пластична деформація матеріалу характеризується границями зерен, розміром зерен і взаємодією дислокацій, що впливає на пластичну течію нітинолу при мікрофрезеруванні.

Фазові перетворення відіграють значну роль при обробці сплавів Ni-Ti [17, 18]. Температурне вікно фазових перетворень цих матеріалів є відносно вузьким (близько 80 °C) і залежить від складу матеріалу, історії термічної обробки та впливу попередньої обробки. Зміни фазового складу суттєво змінюють властивості матеріалу (табл. 1). У фазі аустеніту Ni-Ti має гранецентровану кубічну кристалічну ґратку, а у фазі мартенситу – несиметричну орторомбічну або тетрагональну.

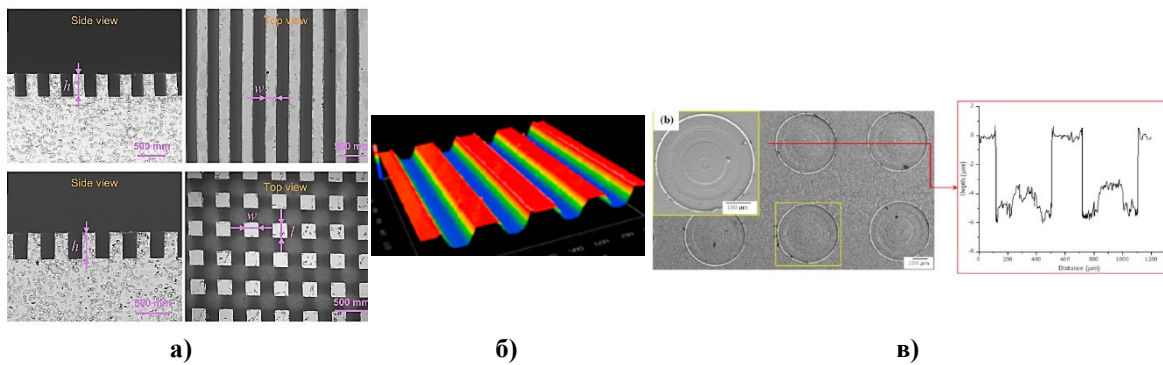
**Пружні та термічні властивості нітинолу [34]**

Показник	Ni-Ti (аустенітний)	Ni-Ti (мартенситний)
Модуль Юнга, ГПа	75	41
Коефіцієнт Пуассона	0,3	0,3
Теплопровідність, Вт/м·К	18	8,6
Коефіцієнт термічного розширення	$11 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$
Теплоємність, Дж/г·°C)	0,837	0,320
Випромінювальна здатність	0,4	0,4

В результаті комплексної дії напружень, температур і деформацій в нітинолі в процесі різання можливі також фазові перетворення в приповерхневому шарі заготовки. В результаті чого приповерхневий шар нітинолу матиме негомогенний фазовий склад, що може впливати на його функціональні властивості, чого варто уникати. Таким чином, механічна оброблюваність нітинолу є чутливою навіть до незначних змін умов різання. Це зумовлює вузький інтервал умов мікрофрезерування нітинолу, які визначаються в основному експериментальними дослідженнями.

**Поверхневі мікротекстури для модифікації змочувальних властивостей біомедичних сплавів.**

Найбільш вивченими елементами мікропрофілю текстурованих поверхонь, які можуть бути виготовлені мікрофрезерування, наразі є мікропази, мікростовпчики та мікроямки (рис. 4).



**Рис. 4. Найбільш вивчені текстури для модифікації поверхні:**

**а) – прямокутні мікропази та мікростовпчики [13], б) – напівкруглі мікропази [11], в) – мікроямки [12]**

В роботі [13] запропоновано процес ультрапрецизійного мікрофрезерування для створення масивів мікроструктури на поверхнях адитивно виготовлених сплавів Ni-Ti. Результати експерименту показують, що кут змочування краплі з поверхню квадратних мікростовпчиків (0,2 мм) збільшується на 66,27%, порівняно з ідеально гладкою поверхнею. Вихідна поверхня (гідрофільна) перетворюється на гідрофобну. Це підтверджує, що ультрапрецизійне мікрофрезерування здатне кардинально змінювати властивості поверхні сплаву Ni-Ti. В роботі [11] представлено виготовлення напівнапівсферичних мікропазів (0,1...0,3 мм) на плоских поверхнях Ti-6Al-4V за допомогою фасонного мікрофрезерування на гібридному мікрофрезерному центрі. Встановлено, що така криволінійна геометрія мікропазів покращила змочування поверхні. В роботі [12] змочувальні властивості поверхні сплаву Ti-6Al-4V були модифіковані за допомогою мікрофрезерування текстур (0,2 і 0,4 мм) у вигляді циліндричних мікроямок на розробленій в лабораторії установці для мікрообробки.

Отже результатами [11–13] експериментально доведено можливість модифікації змочувальних характеристик біомедичних сплавів шляхом формування поверхневих мікротекstur за допомогою спеціальних мікрофрезерних верстатів. Слід зазначити, що ефективність таких процесів вкрай низька через низьку оброблюваність нітинолів і особливості процесу мікрофрезерування, а необхідність використання надточних верстатів робить цю технологію дороговартісною і малодоступною. Разом з тим відомо, що поверхневі текстури розміром від 0,2 мм можуть бути виготовлені на оброблюючих центрах звичайної точності, зважаючи на досить низьку рекомендовану швидкість різання нітинолів (близько 20 м/хв) [24]. Тому задача розробки ефективної технології мікрофрезерного текстуровання сплавів Ni-Ti для модифікації їх змочувальних властивостей є актуальною і перспективною.

Однак, все ще має місце обмеженість в кількісних даних (як експериментальних, так і надійних математичних моделей) щодо характеристик змочування текстурованих поверхонь нітинолів, і взагалі відсутні системні і глибокі дослідження з керування властивостями змочування нітинолів за допомогою мікрофрезерного текстуровання.

**Висновки і перспективи подальших розвідок у даному напрямі**

Для текстуровання поверхні біомедичних матеріалів з метою модифікації їх змочуваності використовують різні технологічні методи: хімічна модифікація поверхні, літографічні, лазерні,

електрохімічні, золь-гель технології, реактивне іонне травлення та ін. Метод мікрофрезерного текстуровання сплавів Ni-Ti досі не є досконально дослідженим, однак він продемонстрував свій потенціал, екологічність та універсальність. Мікрофрезерування дозволяє виготовляти довговічні мікротекстури різних форм і розмірів без суттєвого теплового впливу на поверхню та зміни хімічного складу приповерхневого шару, що особливо важливо для збереження функціональних властивостей нітинолу, як матеріалу з ефектом пам'яті форми.

На сьогодні ще не було розроблено ефективної технології мікрофрезерного текстуровання поверхонь сплавів Ni-Ti з метою модифікації їх змочуваності, яка могла б набути промислового застосування. Мікрофрезерування нітинолів характеризується технологічною складністю і низькою ефективністю. Незадовільні характеристики оброблюваності сплавів Ni-Ti, такі як висока питома енергія та сили різання, інтенсивне зношування інструменту та надмірне утворення заусенців, можуть негативно впливати на характеристики цілісності поверхні готового виробу. Нітиноли мають тенденцію до фазових переходів в поверхневому шарі через комбіновану дію високих напружень, деформацій і температур. Тому технологія мікрофрезерування цих сплавів повинна ґрунтуватися на результатах дослідження характеристик оброблюваності нітинолів і передбачати застосування оброблюючих центрів звичайної точності.

Для обґрунтованого керування змочуваністю поверхонь нітинолів, текстурованих мікрофрезеруванням, необхідно розробити математичну модель крайового кута змочування поверхні, яка враховує як макро- (геометричні параметри поверхневих текстур), так і мікрорельєф (шорсткість) всіх ділянок поверхневих текстур.

Таким чином, мікрофрезерне текстуровання, як спосіб модифікації змочуваності поверхонь сплавів Ni-Ti має високі перспективи практичного впровадження, що зумовлює необхідність подальших досліджень в цьому напрямку.

### Література

1. Feng C.C. Surface characteristics and hydrophobicity of Ni-Ti alloy through magnetic mixed electrical discharge machining / C.C. Feng, L. Li, C.S. Zhang, G.M. Zheng, X. Bai, Z.W. Niu // *Materials*. – 2019. – № 12. – 388. <https://doi.org/10.3390/ma12030388>
2. Eriksson C. Implantation of hydrophilic and hydrophobic titanium discs in rat tibia: cellular reactions on the surfaces during the first 3 weeks in bone / C. Eriksson, H. Nygren, K. Ohlson // *Biomaterials*. – 2004. – № 25(19). – P. 4759–4766. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.12.006>
3. Jiang L. Design and creation of superwetting/antiwetting surfaces / L. Jiang, X. Feng // *Advanced Materials*. – 2006. – № 18(23). – P. 3063–3078. <https://doi.org/10.1002/adma.200501961>
4. Myronyuk O. UV resistance of super-hydrophobic stainless steel surfaces textured by femtosecond laser pulses / O. Myronyuk, D. Baklan, A.M. Rodin // *Photonics*. – 2023. – № 10(9). – 1005. <https://doi.org/10.3390/photonics10091005>
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 // *Chem. Soc. Rev.* – 2007. – № 36. – P. 1350–1368. <https://doi.org/10.1039/B602486F>
6. Chakraborty A. Superhydrophobic surfaces by microtexturing: A critical review / A. Chakraborty, A.T. Mulrone, M.C. Gupta // *In Progress in Adhesion and Adhesives*. – 2021. – № 9(1). – P. 35–64. <https://doi.org/10.1002/9781119846703.ch14>
7. Carre A. Superhydrophobic surfaces / A. Carre, K.L. Mittal. – CRC Press, 2009. – 509 p.
8. Jeevahan J. Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges / J. Jeevahan, M. Chandrasekaran, G. Britto Joseph, R.B. Durairaj // *J. Coat. Technol. Res.* – 2018. – № 15(2). – P. 231–250. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-0011-x>
9. Zhang Q. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance / Q. Zhang, J. Dong, M. Peng, Z. Yang, Y. Wan, F. Yao, J. Zhou, C. Ouyang, X. Deng, H. Luo // *Materials Science and Engineering*. – 2020. – № 111. – 110847. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110847>
10. Jain A. Alteration in Ti6Al4V implant surface properties with micro textures density / A. Jain, V. Bajpai // *Surface Engineering*. – 2022. – № 38(2). – P. 174–182. <https://doi.org/10.1080/02670844.2022.2058163>
11. Tej P. Direction dependent dynamic wetting of semi-hemispherical end micro-groove textured Ti-6Al-4V surface / P. Tej, P. Karali // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – № 356. – P. 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.037>
12. Jain A. Surface Free Energy and Bacterial Attachment on Microtextured Ti6Al4V Alloy / A. Jain, N. Kumari, S. Jagadevan, V. Bajpai // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – № 30. – P. 3968–3975. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05651-1>
13. Du H., Wu C., Li D., Yip W.S., Wang Z., To S. (2023) Feasibility study on ultraprecision micro-milling of the additively manufactured NiTi alloy for generating microstructure arrays. *Journal of Materials Research and Technology*. 25, P. 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.214>

14. Balazs B.Z. A review on micro-milling: recent advances and future trends / B.Z. Balazs, N. Geier, M. Takacs // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – № 112. – P. 655–684. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06445-w>
15. Vipindas K. Effect of cutting edge radius on micro end milling: force analysis, surface roughness, and chip formation / K. Vipindas, K.N. Anand, J. Mathew // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2018. – № 97. – P. 711–722. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1877-1>
16. Томашевський О.О. Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд / О.О. Томашевський, Н.О. Балицька // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 2(92). – С. 74–88. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88)
17. Kaya E. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective / E. Kaya, İ. Kaya // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2019. – № 100. – P. 2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>
18. Kaynak Y. Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation / Y. Kaynak, S. Manchiraju, I.S. Jawahir, D. Biermann // *CIRP Annals*. – 2020. – № 69(1). – P. 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>
19. Kaynak Y. Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining / Y. Kaynak, H. Karaca, I. Jawahir // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2015. – № 24(1). – P. 452–460. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1247-6>
20. Балицька Н.О. Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми. – *Технічна інженерія*. – 2022. – № 2(90). – С. 3–12. <http://ten.ztu.edu.ua/article/view/268005>
21. Kuppuswamy R. High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys / R. Kuppuswamy, A. Yui // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – № 93. – P. 11–21. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7598-9>
22. Piquard R. Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation / R. Piquard, A. D'Acunto, P. Laheurte, D. Dudzinski // *Precis. Eng.* – 2014. – № 38(2). – P. 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.006>
23. Zailani Z.A. Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy / Z.A. Zailani., P.T. Mativenga // *Proced. CIRP*. – 2016. – № 45. – P. 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.156>
24. Томашевський О.О. Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу / О.О. Томашевський, Н.О. Балицька, О.І. Прилипко // *Технічна інженерія*. – 2024. – № 1(93). – С. 81–88. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88)
25. Karnasch. General catalogue. 2023/2024. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Rezhym dostupu : <https://catalogue.karnasch.tools/2023/de-en/gk36/> – (Data zvernennia 10.01.2025 r.). – Nazva z ekrana.
26. Hoffmann Group Catalogue. Machining and clamping technology. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Rezhym dostupu : [https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=eng\\_GB\\_GBP/catalogs/&catalog=90000001#page\\_416](https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=eng_GB_GBP/catalogs/&catalog=90000001#page_416) – (Data zvernennia 10.01.2025 r.). – Nazva z ekrana.
27. Jopp J. Wetting behavior of water droplets on hydrophobic microtextures of comparable size / J. Jopp, H. Gröll, R. Yerushalmi-Rozen // *Langmuir*. – 2004. – № 20(23). – P. 10015–10019. <https://doi.org/10.1021/la0497651>
28. Cheng Z. Superwetting shape memory microstructure: smart wetting control and practical application / Z. Cheng, D. Zhang, X. Luo, H. Lai, Y. Liu, L. Jiang // *Adv. Mater.* – 2021. – № 33. – P. 2001718. <https://doi.org/10.1002/adma.202001718>
29. Bae W.G. One-step process for superhydrophobic metallic surfaces by wire electrical discharge machining / W.G. Bae, K.Y. Song, Y. Rahmawan, C.N. Chu, D. Kim, D.K. Chung, K.Y. Suh // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2012. – № 4(7). – P. 3685–3691. <https://doi.org/10.1021/am3007802>
30. Gould P. Smart, clean surfaces. – *Materials Today*. – 2003. – № 6(11). – P. 44–48. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)01131-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)01131-3)
31. Nosonovsky M. Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces / M. Nosonovsky, B. Bhushan // *Microsyst. Technol.* – 2005. – № 11. – P. 535–549. <https://doi.org/10.1007/s00542-005-0602-9>
32. Wang T. Construction of a bioactive surface with micro/nano-topography on titanium alloy by micro-milling and alkali-hydrothermal treatment / T. Wang, Y. Wan, Z. Kou, Y. Cai, B. Wang, Z. Liu // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. – 2016. – № 230(12). – P. 1086–1095. <https://doi.org/10.1177/0954411916675382>
33. Zhenyu S. Prediction of contact angle for hydrophobic surface fabricated with micro-machining based on minimum Gibbs free energy / S. Zhenyu, L. Zhanqiang, S. Hao, Z. Xianzhi // *Applied Surface Science*. – 2016. – № 364. – P. 597–603. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.199>
34. Shaw J.A. Simulations of localized thermo-mechanical behavior in a NiTi shape memory alloy. – *International journal of plasticity*. – 2000. – № 16. – P. 541–562.

#### References

1. Feng C.C. Surface characteristics and hydrophobicity of Ni-Ti alloy through magnetic mixed electrical discharge machining / C.C. Feng, L. Li, C.S. Zhang, G.M. Zheng, X. Bai, Z.W. Niu // *Materials*. – 2019. – № 12. – P. 388. <https://doi.org/10.3390/ma12030388>

2. Eriksson C. Implantation of hydrophilic and hydrophobic titanium discs in rat tibia: cellular reactions on the surfaces during the first 3 weeks in bone / C. Eriksson, H. Nygren, K. Ohlson // *Biomaterials*. – 2004. – № 25(19). – P. 4759–4766. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2003.12.006>
3. Jiang L. Design and creation of superwetting/antiwetting surfaces / L. Jiang, X. Feng // *Advanced Materials*. – 2006. – № 18(23). – P. 3063–3078. <https://doi.org/10.1002/adma.200501961>
4. Myronyuk O. UV resistance of super-hydrophobic stainless steel surfaces textured by femtosecond laser pulses / O. Myronyuk, D. Baklan, A.M. Rodin // *Photonics*. – 2023. – № 10(9). – 1005. <https://doi.org/10.3390/photonics10091005>
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 // *Chem. Soc. Rev.* – 2007. – № 36. – P. 1350–1368. <https://doi.org/10.1039/B602486F>
6. Chakraborty A. Superhydrophobic surfaces by microtexturing: A critical review / A. Chakraborty, A.T. Mulroney, M.C. Gupta // *In Progress in Adhesion and Adhesives*. – 2021. – № 9(1). – P. 35–64. <https://doi.org/10.1002/9781119846703.ch14>
7. Carre A. Superhydrophobic surfaces / A. Carre, K.L. Mittal. – CRC Press, 2009. – 509 p.
8. Jeevahan J. Superhydrophobic surfaces: a review on fundamentals, applications, and challenges / J. Jeevahan, M. Chandrasekaran, G. Britto Joseph, R.B. Durairaj // *J. Coat. Technol. Res.* – 2018. – № 15(2). – P. 231–250. <https://doi.org/10.1007/s11998-017-0011-x>
9. Zhang Q. Laser-induced wettability gradient surface on NiTi alloy for improved hemocompatibility and flow resistance / Q. Zhang, J. Dong, M. Peng, Z. Yang, Y. Wan, F. Yao, J. Zhou, C. Ouyang, X. Deng, H. Luo // *Materials Science and Engineering*. – 2020. – № 111. – 110847. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2020.110847>
10. Jain A. Alteration in Ti6Al4V implant surface properties with micro textures density / A. Jain, V. Bajpai // *Surface Engineering*. – 2022. – № 38(2). – P. 174–182. <https://doi.org/10.1080/02670844.2022.2058163>
11. Tej P. Direction dependent dynamic wetting of semi-hemispherical end micro-groove textured Ti-6Al-4V surface / P. Tej, P. Karali // *Surface and Coatings Technology*. – 2018. – № 356. – P. 138–149. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2018.09.037>
12. Jain A. Surface Free Energy and Bacterial Attachment on Microtextured Ti6Al4V Alloy / A. Jain, N. Kumari, S. Jagadevan, V. Bajpai // *Journal of Materials Engineering and Performance*. – 2021. – № 30. – P. 3968–3975. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05651-1>
13. Du H., Wu C., Li D., Yip W.S., Wang Z., To S. (2023) Feasibility study on ultraprecision micro-milling of the additively manufactured NiTi alloy for generating microstructure arrays. *Journal of Materials Research and Technology*. 25, P. 55-67. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.214>
14. Balazs B.Z. A review on micro-milling: recent advances and future trends / B.Z. Balazs, N. Geier, M. Takacs // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2020. – № 112. – P. 655–684. <https://doi.org/10.1007/s00170-020-06445-w>
15. Vipindas K. Effect of cutting edge radius on micro end milling: force analysis, surface roughness, and chip formation / K. Vipindas, K.N. Anand, J. Mathew // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2018. – № 97. – P. 711–722. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-1877-1>
16. Tomashevskiy O.O. Protse mikrofrezeruvannya metaliv i splaviv: analitychnyi ohliad / O.O. Tomashevskiy, N.O. Balytska // *Tekhnichna inzheneriia*. – 2023. – № 2(92). – P. 74–88. [https://doi.org/10.26642/ten-2023-2\(92\)-74-88](https://doi.org/10.26642/ten-2023-2(92)-74-88)
17. Kaya E. A review on machining of NiTi shape memory alloys: the process and post process perspective / E. Kaya, İ. Kaya // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2019. – № 100. – P. 2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>
18. Kaynak Y. Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation / Y. Kaynak, S. Mançiraju, I.S. Jawahir, D. Biermann // *CIRP Annals*. – 2020. – № 69(1). – P. 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>
19. Kaynak Y. Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining / Y. Kaynak, H. Karaca, I. Jawahir // *J. Mater. Eng. Perform.* – 2015. – № 24(1). – P. 452–460. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1247-6>
20. Balytska N.O. Osoblyvosti tortsevoho frezeruvannya splaviv Ni-Ti z efektom pam'iaty formy. – *Tekhnichna inzheneriia. Seriya: Prykladna mekhanika*. – 2022. – № 2(90). – P. 3–12. <http://ten.ztu.edu.ua/article/view/268005>
21. Kuppuswamy R. High-speed micromachining characteristics for the NiTi shape memory alloys / R. Kuppuswamy, A. Yui // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* – 2015. – № 93. – P. 11–21. <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7598-9>
22. Piquard R. Microend milling of NiTi biomedical alloys, burr formation and phase transformation / R. Piquard, A. D'Acunto, P. Laheurte, D. Dudzinski // *Precis. Eng.* – 2014. – № 38(2). – P. 356–364. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2013.11.006>
23. Zailani Z.A. Effects of chilled air on machinability of NiTi shape memory alloy / Z.A. Zailani., P.T. Mativenga // *Proced. CIRP*. – 2016. – № 45. – P. 207–210. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.02.156>
24. Tomashevskiy O.O. Skinchenno-elementne modeliuвання protsesu mikrofrezeruvannya nitynolu / O.O. Tomashevskiy, N.O. Balytska, O.I. Prylypko // *Tekhnichna inzheneriia. Seriya: Mekhanichna inzheneriia*. – 2024. – № 1(93). – P. 81–88. [https://doi.org/10.26642/ten-2024-1\(93\)-81-88](https://doi.org/10.26642/ten-2024-1(93)-81-88)
25. Karnasch. General catalogue. 2023/2024. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Rezhym dostupu : <https://catalogue.karnasch.tools/2023/de-en/gk36/> – (Data zvernennia 10.01.2025 r.). – Nazva z ekrana.
26. Hoffmann Group Catalogue. Machining and clamping technology. [Elektronnyi resurs] : [veb-sait]. – Rezhym dostupu : [https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=eng\\_GB\\_GBP/catalogs/&catalog=90000001#page\\_416](https://ecatalog.hoffmann-group.com/index.html?country=eng_GB_GBP/catalogs/&catalog=90000001#page_416) – (Data zvernennia 10.01.2025 r.). – Nazva z ekrana.
27. Jopp J. Wetting behavior of water droplets on hydrophobic microtextures of comparable size / J. Jopp, H. Gröll, R. Yerushalmi-Rozen // *Langmuir*. – 2004. – № 20(23). – P. 10015–10019. <https://doi.org/10.1021/la0497651>
28. Cheng Z. Superwetting shape memory microstructure: smart wetting control and practical application / Z. Cheng, D. Zhang, X. Luo, H. Lai, Y. Liu, L. Jiang // *Adv. Mater.* – 2021. – № 33. – 2001718. <https://doi.org/10.1002/adma.202001718>
29. Bae W.G. One-step process for superhydrophobic metallic surfaces by wire electrical discharge machining / W.G. Bae, K.Y. Song, Y. Rahmawan, C.N. Chu, D. Kim, D.K. Chung, K.Y. Suh // *ACS Applied Materials & Interfaces*. – 2012. – № 4(7). – P. 3685–3691. <https://doi.org/10.1021/am3007802>
30. Gould P. Smart, clean surfaces. – *Materials Today*. – 2003. – № 6(11). – P. 44–48. [https://doi.org/10.1016/S1369-7021\(03\)01131-3](https://doi.org/10.1016/S1369-7021(03)01131-3)
31. Nosonovsky M. Roughness optimization for biomimetic superhydrophobic surfaces / M. Nosonovsky, B. Bhushan // *Microsyst. Technol.* – 2005. – № 11. – P. 535–549. <https://doi.org/10.1007/s00542-005-0602-9>
32. Wang T. Construction of a bioactive surface with micro/nano-topography on titanium alloy by micro-milling and alkali-hydrothermal treatment / T. Wang, Y. Wan, Z. Kou, Y. Cai, B. Wang, Z. Liu // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part H: Journal of Engineering in Medicine*. – 2016. – № 230(12). – P. 1086–1095. <https://doi.org/10.1177/0954411916675382>
33. Zhenyu S. Prediction of contact angle for hydrophobic surface fabricated with micro-machining based on minimum Gibbs free energy / S. Zhenyu, L. Zhanqiang, S. Hao, Z. Xianzhi // *Applied Surface Science*. – 2016. – № 364. – P. 597–603. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2015.12.199>
34. Shaw J.A. Simulations of localized thermo-mechanical behavior in a NiTi shape memory alloy. – *International journal of plasticity*. – 2000. – № 16. – P. 541–562.