

**Наталія Олександрівна Балицька**

кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії та автомобільного транспорту  
Державний університет «Житомирська політехніка» (Житомир, Україна)

E-mail: [tmkts\\_nno@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_nno@ztu.edu.ua). ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>. Scopus ID: 57193890222

**ФАЗОВІ ПЕРЕТВОРЕННЯ У СПЛАВАХ NiTi ПРИ ЛЕЗОВІЙ ОБРОБЦІ**

Основою функціональної поведінки сплавів NiTi (нітинол) є обернене перетворення між аустенітною та мартенситною фазами, що забезпечує ефект пам'яті форми та надпружність. Температури й кінетика цього перетворення залежать від складу, термічної історії, умов навантаження та мікроструктурного стану матеріалу. У статті проведено огляд сучасних досліджень фазових перетворень у сплавах системи NiTi та їхнього впливу на мікроструктуру і функціональні властивості матеріалу під час лезової обробки.

**Ключові слова:** сплав NiTi; механічна обробка; фазові перетворення; ефект пам'яті форми.

Рис.: 10. Бібл.: 28.

**Актуальність теми дослідження.** Сплав NiTi (нітинол) є одним із найвідоміших та досліджуваних сплавів із пам'яттю форми, що поєднує в собі два особливі явища – ефект пам'яті форми та супереластичність. Вони зумовлені оборотними фазовими переходами між високоорганізованою аустенітною (B2) та низькотемпературною мартенситною (B19') фазами, а також наявністю проміжної R-фази. Ці властивості забезпечують нітинолу виняткову здатність відновлювати форму після деформації й працювати у змінних умовах навантаження. Завдяки цьому NiTi широко використовується у медицині (стенти, ортодонтичні дуги, імпланти), авіаційно-космічній галузі, робототехніці та мікросистемній техніці.

Водночас унікальні фізико-механічні характеристики нітинолу ускладнюють його оброблюваність. Традиційні методи різання часто супроводжуються підвищеним зношуванням інструменту, утворенням задирок, нерівномірною якістю поверхні. Головною причиною цього є тенденція NiTi до фазових перетворень безпосередньо у процесі обробки, що спричинюється як локальним нагрівом у зоні різання, так і дією значних механічних напружень. У результаті виникає складна комбінація процесів: стрес-індуковане мартенситне перетворення, зворотний перехід у аустеніт при підвищенні температури, а також стабілізація R-фази під циклічним навантаженням. Ці явища змінюють мікроструктуру приповерхневих шарів, впливають на залишкові напруження, мікротвердість, втомну довговічність і, в кінцевому підсумку, визначають експлуатаційні властивості виробу.

**Постановка проблеми.** Особливої уваги заслуговує лезова механічна обробка сплавів NiTi, яка залишається ключовим методом формоутворення деталей із нітинолів. Вона забезпечує високу точність і продуктивність обробки, але водночас може викликати фазові перетворення у матеріалі. Саме тут виникає найбільше проблем – від неконтрольованої зміни мікроструктури до деградації функціональних властивостей сплаву. Тому питання дослідження фазових перетворень, зумовлених процесом лезової обробки, є актуальним науково-технічним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інформаційною базою для розуміння поведінки нітинолів є праці з побудови та інтерпретації бінарної діаграми NiTi [1-3]. Кристалічні модифікації сплавів системи NiTi та маршрути фазових перетворень детально описують дослідження [2; 4-9]. Роботи [10-14] досліджують зв'язок між мікроструктурою та функціональними властивостями нітинолів – ефектом пам'яті форми та надпружністю.

В оглядових роботах [15; 16] розглядаються останні дослідження в галузі обробки сплавів NiTi з метою оцінки загальних характеристик їх оброблюваності.

Блок праць, присвячених точінню сплавів NiTi [17-24], демонструє, що швидкість різання істотно впливає на глибину зміненого шару, приховану теплоту перетворення та мікротвердість приповерхневих зон. Разом із тим, існують і розбіжності в отриманих результатах. Окремі роботи прогнозують збільшення глибини ураженого шару із збільшенням швидкості різання [19], тоді як інші фіксують її зменшення через ефект термічного розм'якшення матеріалу [18; 24]. Це свідчить про необхідність більш глибоких досліджень у цьому напрямку.

Відомо про роботи, що досліджують процеси криогенного різання, з різними стратегіями охолодження та з попереднім підігрівом заготовки [18; 24]. Доведено, що підтримання мартенситного стану нітинолу (криогенне попереднє охолодження) знижує сили різання, зношування та шорсткість обробленої поверхні, тоді як обробка в аустенітному стані не завжди дає переваги над сухим або MQL-режимами (мінімальна кількість мастила) [25].

Щодо фрезерування, то відомі роботи, у яких виявлено стрес-індукований мартенсит і зміцнені поверхневі шари, глибина яких залежить від швидкості різання [26-28].

**Виділення недосліджених частин загальної проблеми.** Узагальнюючи, сучасні дослідження підтверджують визначальну роль фазових перетворень у формуванні функціонально важливого приповерхневого шару під час лезової обробки сплавів NiTi. Водночас виявлені суперечності щодо впливу режимів різання (передусім швидкості різання) на глибину і природу зміцненого шару підкреслюють потребу в подальших глибоких багатофакторних дослідженнях.

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

**Метою статті** є узагальнення сучасних уявлень про фазові перетворення в сплавах NiTi та аналіз їхнього впливу на мікроструктуру і функціональні властивості матеріалу під час лезової обробки.

**Виклад основного матеріалу. Бінарна діаграма системи NiTi.** Бінарна діаграма стану системи нікель-титан (NiTi) є фундаментальним інструментом для розуміння фазових перетворень у нітинолі. Вона демонструє залежність фазового складу сплаву від температури та вмісту нікелю, охоплюючи діапазон від чистого титану до чистого нікелю. Найпрактичніше значення має вузька область поблизу еквіватомного складу (приблизно 49...51 ат. % Ni), де формується інтерметалічна сполука NiTi – основна фаза, що відповідає за ефект пам'яті форми та надпружність.

Жовта область на діаграмі (рис. 1), розташована біля 50 ат. % Ni, позначає зону стабільності фази NiTi з упорядкованою кубічною структурою типу B2. Саме з неї при охолодженні формується мартенситна фаза B19', що забезпечує оборотне мартенситне перетворення. Висока чутливість властивостей нітинолу до незначних відхилень у складі зумовлена тим, що навіть  $\pm 0,5$  ат. % зміни вмісту нікелю можуть істотно зсунути температури фазових переходів (початку утворення мартенситу  $M_s$ , завершення утворення мартенситу  $M_f$ , початку зворотного перетворення в аустеніт  $A_s$ , завершення зворотного аустенітного перетворення  $A_f$ ) [1, 2].

За межами області NiTi діаграма демонструє утворення вторинних фаз – Ti<sub>2</sub>Ni при надлишку титану та TiNi<sub>3</sub> або Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub> при надлишку нікелю. Ці фази не беруть участі у зворотному мартенситному перетворенні й можуть погіршувати механічні та функціональні характеристики сплаву. Водночас дрібнодисперсні виділення, такі як Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>, можуть відігравати роль центрів зародження мартенситу, впливаючи на кінетику та стабільність фазових переходів.

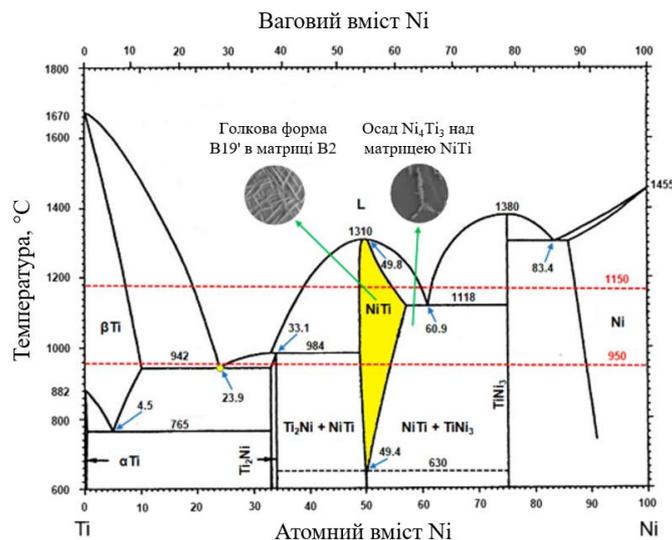


Рис. 1. Бінарна діаграма системи NiTi [1, 2]:

*B2* – кубічна, високотемпературна, аустенітна фаза нітинолу, стабільна при нагріванні; *B19'* – моноклінна мартенситна низькотемпературна фаза, що утворюється з *B2* під час охолодження, відповідальна за зворотну деформацію; *Ti<sub>2</sub>Ni* – вторинна фаза, інтерметалічна сполука титану й нікелю з надлишком Ti, яка утворюється при титановмісних складах (< 49 ат. % Ni); *TiNi<sub>3</sub>* – вторинна фаза, інтерметалічна сполука з надлишком Ni, утворюється при нікелевмісних складах (> 51 ат. % Ni); *Ni<sub>4</sub>Ti<sub>3</sub>* – дрібнодисперсна фаза нікелю й титану, випадає при старінні, впливає на температуру фазових переходів та стабільність мартенситу;  $\alpha$ -Ti – гексагональна щільноупакована фаза, стабільна при низьких температурах і високому вмісті титану;  $\beta$ -Ti – кубічна об'ємноцентрована фаза, стабільна при підвищених температурах; *L* – рідка фаза, область плавлення сплаву

Таким чином, бінарна діаграма NiTi відображає складну рівновагу між фазами і є ключем до керування мікроструктурою та функціональними властивостями нітинолу. Точний контроль складу та термічної історії сплаву дозволяє цілеспрямовано регулювати його температуру перетворення і досягати оптимального ефекту пам'яті форми.

Трикутна область бінарної фазової діаграми NiTi (рис. 1) представляє найбільший інтерес, оскільки тут має місце чудове поєднання властивостей ефекту пам'яті форми (ЕПФ) на основі фаз, що утворилися.

**Основні кристалічні модифікації сплаву NiTi.** На рис. 2 показано дві основні кристалічні модифікації сплаву NiTi, які відповідають за його унікальні функціональні властивості – аустенітну (*B2*) та мартенситну (*B19'*) фази.

Аустенітна фаза *B2* має упорядковану об'ємно-центровано-кубічну (ОЦК) структуру, аналогічну до типу CsCl. Структура *B2* є симетричною та термодинамічно стабільною при високих температурах. При охолодженні вона бездифузійно перетворюється в мартенситну фазу *B19'*.

Мартенситна фаза *B19'* має моноклінну кристалічну ґратку. У цій структурі атоми нікелю (Ni) та титану (Ti) розміщені нерівномірно, а комірка спотворена відносно кубічної симетрії. Саме така анізотропна будова забезпечує можливість двійникування та зсувів атомних площин без руйнування зв'язків. Завдяки цьому мартенсит може зазнавати значних оборотних деформацій, що лежить в основі ефекту пам'яті форми.

Перехід між цими двома структурами є оборотним мартенситним перетворенням, яке визначає як ефект пам'яті форми, так і супереластичну поведінку нітинолу. Завдяки цьому матеріал здатний змінювати форму при охолодженні чи механічному навантаженні та відновлювати її при нагріванні, без втрати структурної цілісності.

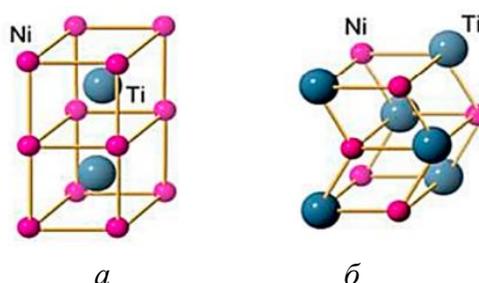


Рис. 2. Основні кристалічні модифікації сплаву NiTi [13]:  
 а – аустенітна фаза B2; б – мартенситна фаза B19'

**Механізми надпружності та ефекту пам'яті форми у сплавах TiNi.** На рис. 3 представлено узагальнену схему, що демонструє зв'язок між температурою, напруженням і деформацією під час прояву надпружності та ефекту пам'яті форми у сплаві NiTi.

Залежність між температурою і напруженням пояснює поведінку матеріалу при супереластичності (надпружності). При температурах, вищих за  $A_f$  (температуру завершення зворотного фазового перетворення), сплав перебуває в аустенітному стані. Під дією зовнішнього навантаження аустеніт трансформується в стрес-індукований мартенсит – відбувається фазове перетворення, що супроводжується характерною плато-деформацією. Після зняття навантаження мартенсит знову переходить в аустеніт, і сплав відновлює початкову форму. Таким чином виникає велика оборотна деформація (до 6-8 %), без необхідності нагрівання, що є проявом надпружності.

При охолодженні аустеніт (B2) переходить у двійникований мартенсит (B19'). Під дією механічного навантаження двійники руйнуються, і структура переходить у роздвійникований мартенсит, що супроводжується деформацією. При подальшому нагріванні матеріал проходить зворотне мартенситне перетворення (B19'-B2), внаслідок чого відбувається повне відновлення первісної форми. Це є демонстрацією класичного механізму ефекту пам'яті форми.

Таким чином, надпружність – це оборотна деформація при навантаженні вище температури  $A_f$ , а ефект пам'яті форми – це оборотна деформація при нагріванні після пластичної деформації в мартенситному стані. Ці явища мають спільну природу – оборотне мартенситне перетворення між фазами B2 і B19', що забезпечує нітинолу унікальні функціональні властивості, відсутні у більшості металевих матеріалів.

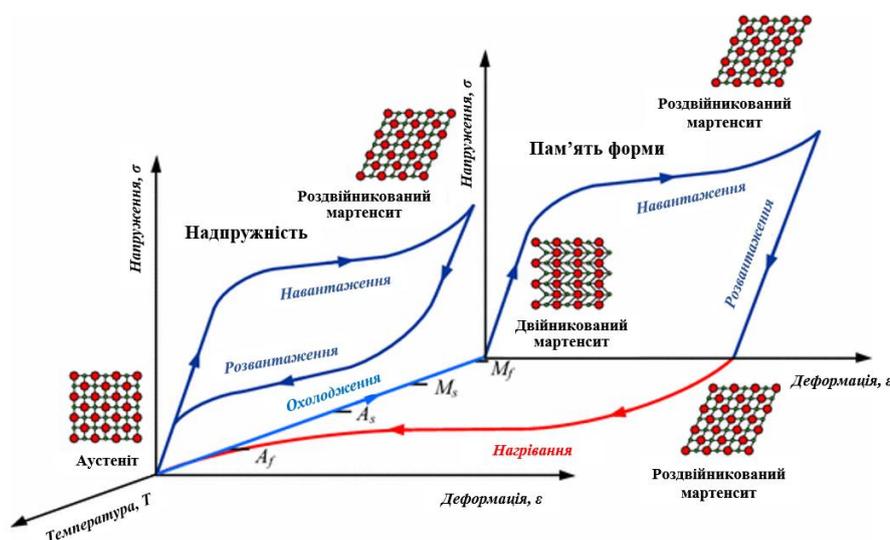


Рис. 3. Механізми надпружності та ефекту пам'яті форми в сплавах NiTi [10; 13]

**Шляхи фазових перетворень у сплавах на основі TiNi.** Залежно від хімічного складу і термомеханічної обробки, фаза B2 може пройти один із трьох шляхів перетворення, показаних на рис. 4. Перетворення B2–B19' відбувається в загартованих сплавах Ti-Ni; перетворення B2-R-B19' відбувається у сплавах TiNi після старіння (з осадженням Ti<sub>3</sub>Ni<sub>4</sub>) або холоднодеформованих сплавах TiNi, а також у потрійних сплавах Ti-Ni-Fe(Al); перетворення B2-B19-B19' відбувається у сплавах Ti-Ni-Cu [8]. Кінцевим продуктом усіх мартенситних перетворень у сплавах на основі TiNi є мартенсит B19'.

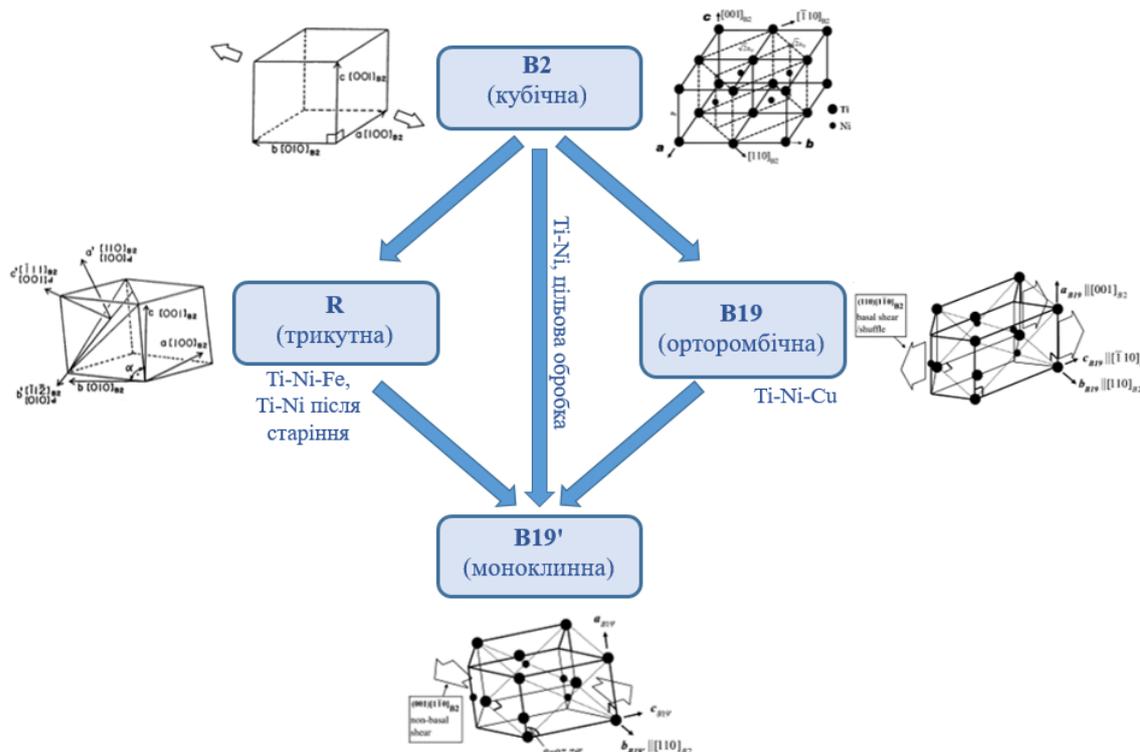


Рис. 4. Шляхи фазових перетворень у сплавах на основі TiNi [2; 4; 5]

**Мікроструктура сплавів TiNi в різних фазових станах.** На рис. 5 наведено мікроструктури сплавів NiTi в різних фазових станах. Мікроструктура аустеніту (B2) характеризується рівномірним зернистим виглядом із чітко вираженими межами зерен (рис. 5, а). Цей стан відповідає стабільній високотемпературній фазі, в якій атоми нікелю та титану впорядковані у кубічній об'ємноцентрованій структурі типу CsCl.

R-фаза сплаву Ti<sub>50.3</sub>Ni<sub>48.2</sub>Fe<sub>1.5</sub> є проміжною структурою між аустенітом і мартенситом (рис. 5, б). Вона має типову морфологію типу «ялинка» у вигляді дрібних смугастих утворень (область R), що зароджуються всередині матриці B2 (P). Ця фаза знижує енергетичний бар'єр мартенситного перетворення й впливає на температури A<sub>s</sub> та A<sub>f</sub>.

Трикутна морфологія мартенситу B19 сплаву Ti<sub>49.5</sub>Ni<sub>40.5</sub>Cu<sub>10</sub> показана на оптичній мікрофотографії (рис. 5, в).

Типова морфологія мартенситів B19' представлена на рис. 5, г, д. Характерна риса – паралельні пластинчасті смуги, які відображають наявність двійників у структурі. У зразках, де мартенсит утворюється при охолодженні без зовнішнього навантаження, двійники формуються для мінімізації пружних напружень. Просвічувальна електронна мікроскопія дозволила виявити трикутну морфологію мартенситів B19' (рис. 5, з), а також дозволила спостерігати «первинні» мартенсити (більші) та «вторинні» (менші) мартенситні кластери у відпаленому та загартованому сплаві TiNi (рис. 5, е). На зображенні (рис. 5, д) спостеріга-

ються дрібнодисперсні виділення фази  $Ni_4Ti_3$ , що утворюються під час старіння при температурах 400...500 °С. Ці частинки впорядковують навколишню матрицю, впливають на нуклеацію мартенситу та суттєво змінюють температури фазових перетворень.

Отже, така мікроструктурна мінливість є основою функціональних властивостей  $NiTi$ , зокрема його здатності до зворотних фазових перетворень, пам'яті форми та супереластичності. Водночас саме чутливість нітинолу до термомеханічних впливів зумовлює складність його оброблення традиційними методами різання.

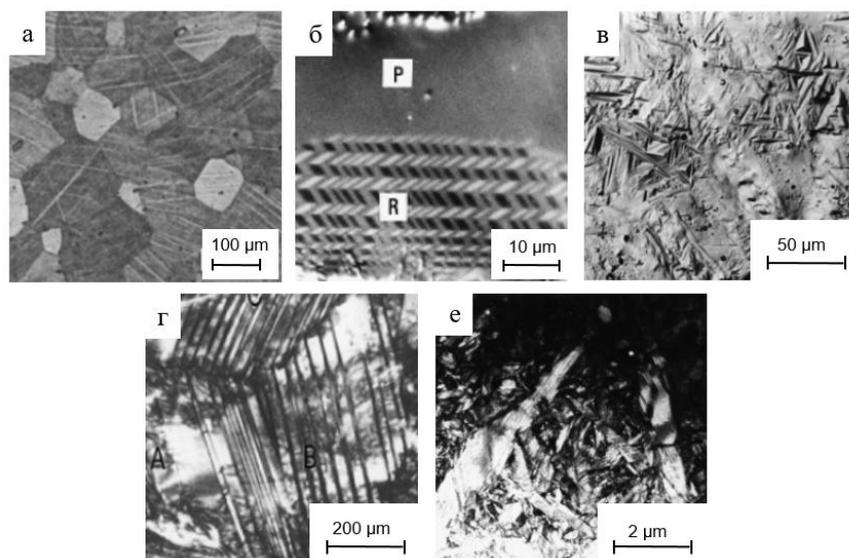


Рис. 5. Мікроструктура сплавів  $TiNi$  в різних фазових станах: а – фаза B2 [14]; б – R-фаза [9; 2]; в – фаза B19 [7; 2]; г, д – фаза B19' [6; 2]

**Фазові перетворення в сплавах  $NiTi$  при обробці різанням.** Під час лезової обробки (точіння, фрезерування, свердління та ін.) у зоні різання виникають локальні високі температури, значні градієнти напружень і швидкі деформації, які здатні ініціювати або навіть повністю змінити фазовий стан матеріалу. У результаті у приповерхневих шарах можуть відбуватись стрес-індуковані мартенситні перетворення, утворення R-фази, а також часткове зворотне перетворення мартенситу в аустеніт через теплове нагрівання. Такі процеси безпосередньо впливають на мікроструктуру, залишкові напруження, твердість і функціональні властивості готової деталі.

У роботі [17] були проведені експерименти з точіння аустенітного  $NiTi$  (Ni 50,8 %, ат.) на різних швидкостях різання та дослідження змін мікроструктури обробленої поверхні (рис. 6). Автори [17] приходять до висновку, що при низькій швидкості різання (15 м/хв) мікроструктурні зміни викликані передусім механічними впливами. Тоді як при високій швидкості різання (125 м/хв) переважає тепловий вплив.

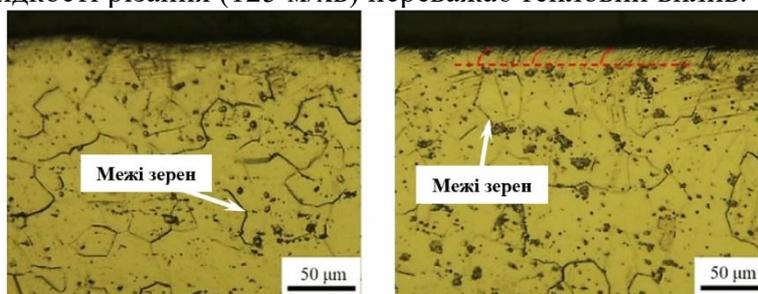


Рис. 6. Мікроструктура поверхні після точіння (поперечний переріз) [17]: а – швидкість різання 15 м/хв; б – швидкість різання 125 м/хв; (подача 0,15 мм/об, глибина різання 0,2 мм)

З даних, наведених на рис. 7–8, видно, що механічна обробка впливає на результати диференціальної скануючої калориметрії (ДСК). Прихована теплота фазового перетворення після механічної обробки менша, ніж у вихідному зразку. Автори пояснюють це тим, що дислокації в оброблених зразках гальмують фазове перетворення, що призводить до меншої енергії для фазового перетворення. Оскільки падіння прихованої теплоти при 15 м/хв є більш значним, ніж при 125 м/хв, то при низькій швидкості різання в оброблених зразках спостерігається вища щільність дислокацій [17].

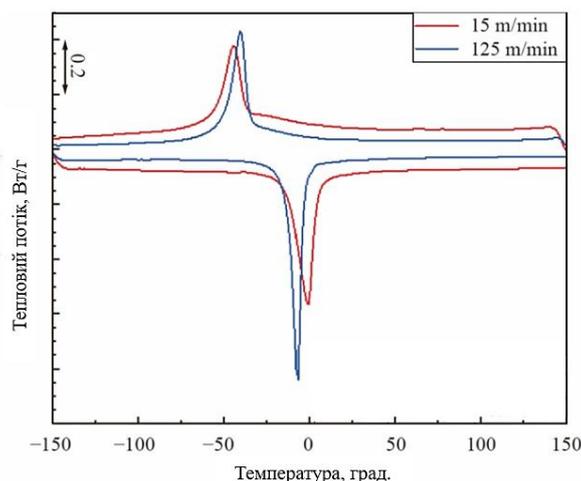


Рис. 7. ДСК-криві оброблених зразків зі сплаву NiTi [17]

Водночас зміна температур фазових переходів до та після механічної обробки (рис. 8) не перевищувала 10 °С. При швидкості 125 м/хв температура фазового переходу залишається майже незмінною. Гістерезис фазового переходу має місце при швидкості 15 м/хв, що, на думку авторів [17], свідчить про збільшення опору фазовому переходу та певною мірою впливає на ефект пам'яті форми.

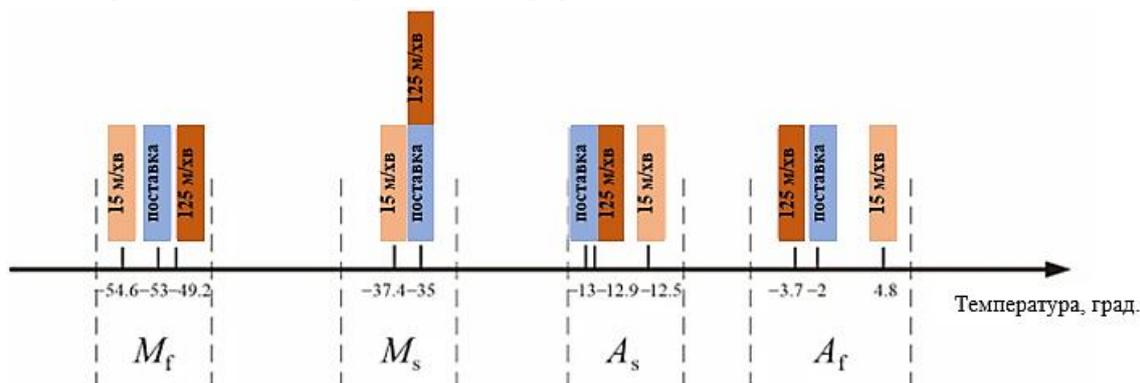


Рис. 8. Температури фазових переходів зразків зі сплаву NiTi у стані поставки та після точіння [17]

До подібних висновків прийшли також автори дослідження [18], яке присвячене впливу різних швидкостей і умов точіння (сухе, криогенне в середовищі CO<sub>2</sub>, охолодження рідиною та з високим тиском) на якість поверхні аустенітного NiTi (55,82 % Ni, Ti – решта, мас.%). Вони виявили, що глибина ураженого шару зменшується зі збільшенням швидкості різання для всіх умов, крім криогенної обробки, через ефект анігіляції при підвищеній температурі (рис. 9).

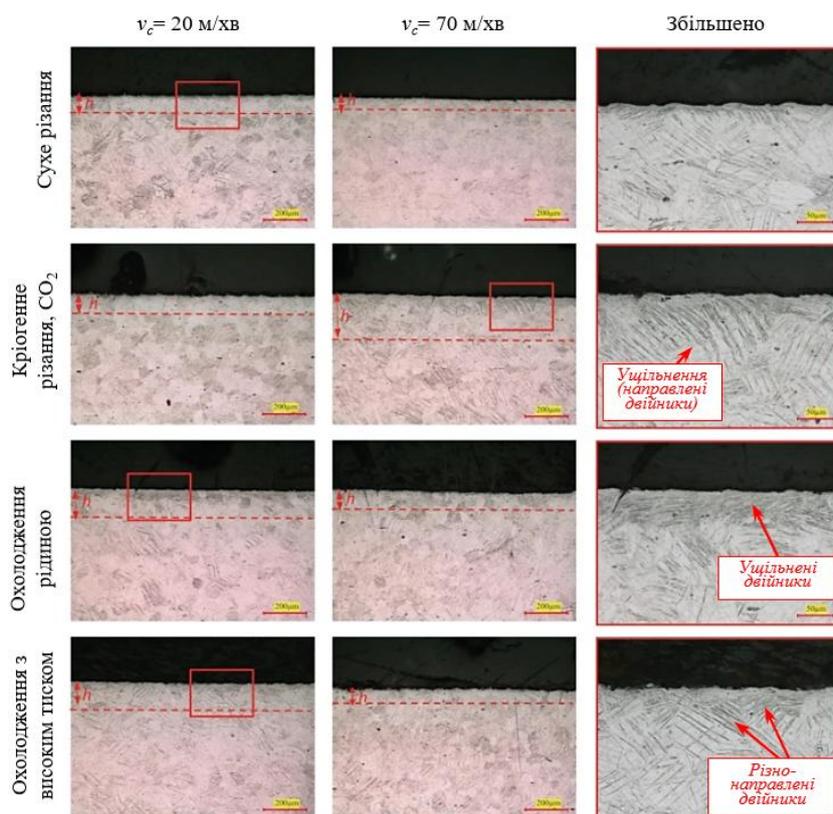


Рис. 9. Мікроструктура поверхні після точіння (поперечний переріз) [18]

Подібні явища мають місце й під час фрезерування сплавів NiTi. Металографічний аналіз із застосуванням методу диференціального інтерференційного контрасту (DIC) [26] дозволив спостерігати стрес індукований мартенсит на поверхні сплаву Ni<sub>56.5</sub>Ti<sub>43.5</sub> після сухого торцевого фрезерування (рис. 10). Були виявлені неоднорідний поверхневий шар, багатий на мартенсит (глибиною до 110 мкм), та глибший неоднорідний підповерхневий шар, що містив окремі глибокі мартенситні голки (глибиною до 205 мкм). Це пояснюється тим, що поверхневий шар утворюється під одночасним впливом механічних і термічних ефектів процесу різання, тоді як підповерхневий шар утворюється переважно під впливом механічних ефектів. Зі збільшенням швидкості різання з 20 до 50 м/хв загальна глибина ураженого шару зменшилася на 42,5 %.

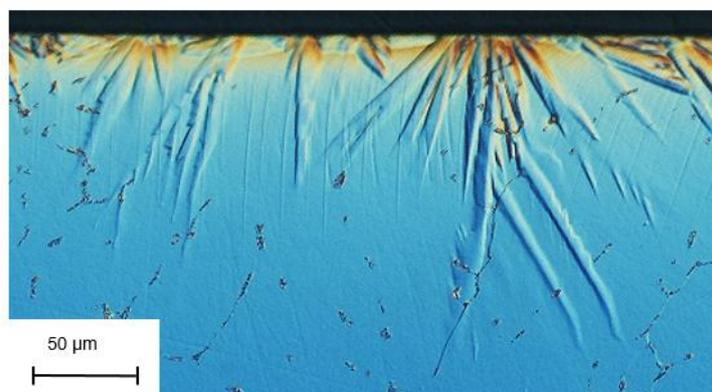


Рис. 10. Мікроструктура поверхні сплаву NiTi після сухого торцевого фрезерування (поперечний переріз, швидкість різання 20 м/хв, подача 0,05 мм/зуб, глибина різання 0,5 мм)

Зважаючи на те, що ефект пам'яті форми та надпружність NiTi залежать від стабільності фазового складу, контроль фазових перетворень під час механічної обробки є важливим для забезпечення надійності та довговічності виробів. Тому актуальним напрямом сучасних досліджень є аналіз впливу параметрів різання (швидкості, подачі, глибини, стану інструмента) на характер фазових перетворень у нітинолі, зокрема на частку мартенситу, розмір зерен і стан двійникових структур у приповерхневій зоні. Технологічний процес виготовлення виробів зі сплавів NiTi повинен бути розроблений таким чином, щоб мінімізувати глибину механічно індукованого поверхневого шару, оскільки він може вплинути на функціональні властивості кінцевого продукту.

Таким чином, дослідження фазових перетворень, спричинених термомеханічними процесами під час лезової обробки сплавів NiTi, є необхідною умовою для розроблення оптимальних режимів механічного різання, які забезпечать збереження функціональних властивостей матеріалу без їх деградації.

**Висновки.** На основі аналізу останніх наукових досліджень фазових перетворень при обробці різанням сплавів NiTi встановлено, що фазові перетворення можуть бути викликані термомеханічними процесами під час лезової обробки. У зоні різання виникають екстремальні термомеханічні умови, які здатні ініціювати стрес-індуковані мартенситні перетворення, утворення R-фази та часткове зворотне перетворення мартенситу в аустеніт. Ці процеси формують неоднорідний приповерхневий шар, що істотно відрізняється від об'єму за фазовим складом і властивостями.

Літературні дані свідчать про залежність глибини індукованого шару від швидкості різання та умов охолодження. На низьких швидкостях переважають механічні ефекти, що зумовлюють пластичні деформації і мартенситне перетворення, а на високих — термічні, які зумовлюють часткове відновлення аустеніту.

Проведений огляд демонструє, що подальші дослідження мають бути спрямовані на комплексне вивчення фазових перетворень, індукованих термомеханічними процесами під час лезової обробки, із використанням сучасних методів структурного аналізу (DIC, EBSD, TEM, DSC) та моделювання температурно напруженого стану зони різання. Це дозволить оптимізувати режими обробки й забезпечити стабільність ефекту пам'яті форми та надпружності в готових виробах з NiTi.

#### Список використаних джерел

1. Patel, S.K., & Behera, A. (2022). Evolution of phases and their influence on shape memory effect by varying sintering parameters of NiTi alloys. *Metals and Materials International*, 28(11), 2691–2705. <https://doi.org/10.1007/S12540-021-01166-5>.
2. Otsuka, K., & Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 50, 511–678. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>
3. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (Eds.). (1990). Binary Alloy Phase Diagrams (2nd ed., Vol. 3, p. 2874). *Materials Park, OH: ASM International*.
4. Barsch, G.R. (1999). *Materials Science Forum*, 327–328, 367.
5. Ren, X., & Otsuka, K. (1998). *Scripta Materialia*, 38, 1669.
6. Madangopal, K. (1997). *Acta Materialia*, 45, 5347.
7. Saburi, T., Watanabe, Y., & Nenno, S. (1989). *ISIJ International*, 29, 405.
8. Nam, T.H., Saburi, T., & Shimizu, K. (1990). *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 31, 959.
9. Fukuda, T., Saburi, T., Doi, K., & Nenno, S. (1992). *Materials Transactions JIM*, 33, 271.
10. Lagoudas, D.C. (2008). *Shape Memory Alloys*. New York: Springer Science & Business Media.
11. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M.A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>.

12. Sun, L., & Huang, W.M. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(11), 573–578. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9213-x>.
13. Chekotu, J.C., Groarke, R., O'Toole, K., & Brabazon, D. (2019). Advances in selective laser melting of nitinol shape memory alloy part production. *Materials*, 12(5), 809. <https://doi.org/10.3390/MA12050809>.
14. Kaynak, Y., Robertson, S.W., Karaca, H.E., & Jawahir, I.S. (2015). Progressive tool wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: influence of cooling/lubricating and heat-treatment conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.015>.
15. Kaya, E., & 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*, 100(7), 2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
16. Noor, N.Z.M., Zailani, Z.A., Hamidon, R., & Shuaib, N.A. (2021). Machinability of nickel titanium shape memory alloys: a review. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 425–440. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7_37).
17. Zhao, Y.Z., Guo, K., Sivalingam, V., et al. (2021). Surface integrity evolution of machined NiTi shape memory alloys after turning process. *Advanced Manufacturing*, 9, 446–456. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00330-1>.
18. Kitay, O., & Kaynak, Y. (2021). The effect of flood, high-pressure cooling, and CO<sub>2</sub>-assisted cryogenic machining on microhardness and microstructure of NiTi shape memory alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5799–5810. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05854-6>.
19. Kaynak, Y., Manchiraju, S., Jawahir, I.S., & Biermann, D. (2020). Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation. *CIRP Annals*, 69(1), 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>.
20. Shizuka, H., Sakai, K., Yang, H., Sonoda, K., Nagare, T., Kurebayashi, Y., & Hayakawa, K. (2020). Difficult cutting property of NiTi alloy and its mechanism. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4), 124. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>.
21. Zhao, Y.Z., & Sun, J. (2023). Study on the characteristics of phase in turning NiTi shape memory alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 98, 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.009>.
22. Yang, H., Sakai, K., Shizuka, H., Kurebayashi, Y., Hayakawa, K., & Nagare, T. (2021). Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting process of superelastic NiTi alloy. *International Journal of Automation Technology*, 15(1), 24–33. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>.
23. Zhao, Y., Li, J., Guo, K., Sivalingam, V., & Sun, J. (2020). Study on chip formation characteristics in turning NiTi shape memory alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.072>.
24. Kaynak, Y., Karaca, H., & Jawahir, I. (2015). Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1), 452–460. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1247-6>.
25. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., et al. (2015). The effect of active phase of the work material on machining performance of a NiTi shape memory alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 2625–2636. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2828-1>.
26. Balytska, N., Penter, L., Manokhin, A. et al. (2025) Face milling performance on austenitic NiTi shape memory alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 141, 3181–3198. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16777-0>.
27. Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M.A., & Ozkan, D. (2020). Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools. *Coatings*, 10(12), 1259. <https://doi.org/10.3390/coatings10121259>.
28. Altas, E., Altin Karatas, M., & 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*, 30(12), 9426–9439. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06095-3>.

### References

1. Patel, S.K., & Behera, A. (2022). Evolution of phases and their influence on shape memory effect by varying sintering parameters of NiTi alloys. *Metals and Materials International*, 28(11), 2691–2705. <https://doi.org/10.1007/S12540-021-01166-5>.
2. Otsuka, K., & Ren, X. (2005). Physical metallurgy of Ti–Ni-based shape memory alloys. *Progress in Materials Science*, 50, 511–678. <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2004.10.001>
3. Massalski, T.B., Okamoto, H., Subramanian, P.R., & Kacprzak, L. (Eds.). (1990). Binary Alloy Phase Diagrams (2nd ed., Vol. 3, p. 2874). *Materials Park, OH: ASM International*.
4. Barsch, G.R. (1999). *Materials Science Forum*, 327–328, 367.
5. Ren, X., & Otsuka, K. (1998). *Scripta Materialia*, 38, 1669.
6. Madangopal, K. (1997). *Acta Materialia*, 45, 5347.
7. Saburi, T., Watanabe, Y., & Nenno, S. (1989). *ISIJ International*, 29, 405.
8. Nam, T.H., Saburi, T., & Shimizu, K. (1990). *Transactions of the Japan Institute of Metals*, 31, 959.
9. Fukuda, T., Saburi, T., Doi, K., & Nenno, S. (1992). *Materials Transactions JIM*, 33, 271.
10. Lagoudas, D.C. (2008). *Shape Memory Alloys*. New York: Springer Science & Business Media.
11. Jani, J.M., Leary, M., Subic, A., & Gibson, M.A. (2014). A review of shape memory alloy research, applications and opportunities. *Materials and Design*, 56, 1078–1113. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.11.084>.
12. Sun, L., & Huang, W.M. (2009). Nature of the multistage transformation in shape memory alloys upon heating. *Metal Science and Heat Treatment*, 51(11), 573–578. <https://doi.org/10.1007/s11041-010-9213-x>.
13. Chekotu, J.C., Groarke, R., O’Toole, K., & Brabazon, D. (2019). Advances in selective laser melting of nitinol shape memory alloy part production. *Materials*, 12(5), 809. <https://doi.org/10.3390/MA12050809>.
14. Kaynak, Y., Robertson, S.W., Karaca, H.E., & Jawahir, I.S. (2015). Progressive tool wear in machining of room-temperature austenitic NiTi alloys: influence of cooling/lubricating and heat-treatment conditions. *Journal of Materials Processing Technology*, 215, 95–104. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.07.015>.
15. Kaya, E., & 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*, 100(7), 2045–2087. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2818-8>.
16. Noor, N.Z.M., Zailani, Z.A., Hamidon, R., & Shuaib, N.A. (2021). Machinability of nickel titanium shape memory alloys: a review. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 425–440. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0866-7_37).
17. Zhao, Y.Z., Guo, K., Sivalingam, V., et al. (2021). Surface integrity evolution of machined NiTi shape memory alloys after turning process. *Advanced Manufacturing*, 9, 446–456. <https://doi.org/10.1007/s40436-020-00330-1>.
18. Kitay, O., & Kaynak, Y. (2021). The effect of flood, high-pressure cooling, and CO<sub>2</sub>-assisted cryogenic machining on microhardness and microstructure of NiTi shape memory alloy. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30, 5799–5810. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05854-6>.
19. Kaynak, Y., Manchiraju, S., Jawahir, I.S., & Biermann, D. (2020). Chip formation and phase transformation in orthogonal machining of NiTi shape memory alloy: microstructure-based modelling and experimental validation. *CIRP Annals*, 69(1), 85–88. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2020.04.025>.
20. Shizuka, H., Sakai, K., Yang, H., Sonoda, K., Nagare, T., Kurebayashi, Y., & Hayakawa, K. (2020). Difficult cutting property of NiTi alloy and its mechanism. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 4(4), 124. <https://doi.org/10.3390/jmmp4040124>.
21. Zhao, Y.Z., & Sun, J. (2023). Study on the characteristics of phase in turning NiTi shape memory alloy. *Journal of Manufacturing Processes*, 98, 277–284. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.05.009>.
22. Yang, H., Sakai, K., Shizuka, H., Kurebayashi, Y., Hayakawa, K., & Nagare, T. (2021). Effect of cutting speed on shape recovery of work material in cutting process of superelastic NiTi alloy. *International Journal of Automation Technology*, 15(1), 24–33. <https://doi.org/10.20965/ijat.2021.p0024>.

23. Zhao, Y., Li, J., Guo, K., Sivalingam, V., & Sun, J. (2020). Study on chip formation characteristics in turning NiTi shape memory alloys. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 787–795. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.072>.
24. Kaynak, Y., Karaca, H., & Jawahir, I. (2015). Cutting speed dependent microstructure and transformation behavior of NiTi alloy in dry and cryogenic machining. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 24(1), 452–460. <https://doi.org/10.1007/s11665-014-1247-6>.
25. Kaynak, Y., Karaca, H.E., Noebe, R.D., et al. (2015). The effect of active phase of the work material on machining performance of a NiTi shape memory alloy. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 46, 2625–2636. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2828-1>.
26. Balytska, N., Penter, L., Manokhin, A. et al. (2025) Face milling performance on austenitic NiTi shape memory alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 141, 3181–3198. <https://doi.org/10.1007/s00170-025-16777-0>.
27. Altas, E., Gokkaya, H., Karatas, M.A., & Ozkan, D. (2020). Analysis of surface roughness and flank wear using the Taguchi method in milling of NiTi shape memory alloy with uncoated tools. *Coatings*, 10(12), 1259. <https://doi.org/10.3390/coatings10121259>.
28. Altas, E., Altin Karatas, M., & 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*, 30(12), 9426–9439. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-06095-3>.

Дата першого надходження статті до видання: 27.10.2025  
Дата прийняття статті до друку після рецензування: 13.12.2025

UDC 669.295.5:621.9

### **Nataliia Balytska**

PhD in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanical Engineering and Automotive Transport  
Zhytomyr Polytechnic State University (Zhytomyr, Ukraine)

**E-mail:** [tmkts\\_nno@ztu.edu.ua](mailto:tmkts_nno@ztu.edu.ua). **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>. **Scopus ID:** [57193890222](https://scopus.org/57193890222)

## **PHASE TRANSFORMATIONS IN NITI ALLOYS DURING CUTTING PROCESSES**

*Nickel-titanium (NiTi) alloys, commonly known as nitinol, occupy a special place among shape memory materials due to their unique combination of high strength, corrosion resistance, biocompatibility, and the ability to undergo reversible phase transformations. These properties make nitinol widely used in medical engineering (stents, orthodontic wires, implants), as well as in aerospace, energy, and robotics industries. The functional behaviour of nitinol is based on the reversible martensitic transformation between the austenitic B2 phase and the martensitic B19' phase, which provides both the shape memory effect and superelasticity. The temperatures and kinetics of this transformation depend on the alloy composition, thermal history, loading conditions, and microstructural state of the material. This article presents a review of current research on phase transformations in nickel-titanium (NiTi) alloys and their influence on the microstructure and functional properties of the material during cutting processes. The binary NiTi phase diagram, the main crystalline modifications (B2, B19', and R phases), and the mechanisms of superelasticity and shape memory effect are discussed. Experimental data on the influence of turning and milling parameters on the phase state and structural changes in the near-surface layers of NiTi alloys are summarized. The complex thermomechanical conditions in the cutting zone that can initiate stress-induced martensitic transformations, R-phase formation, and partial reverse transformation of martensite into austenite are described. Promising directions for further research are identified, focusing on a comprehensive analysis of phase transformations occurring in the work material during cutting and the development of machining regimes that ensure the preservation of the functional properties of nitinol.*

**Keywords:** NiTi alloy; machining; phase transformations; cutting speed; shape memory effect.

**Fig.:** 10. **References:** 28.