

Голові разової спеціалізованої вченої
ради, доктору технічних наук,
професору кафедри механічної
інженерії та автомобільного
транспорту Державного університету
«Житомирська політехніка»
Луціву Ігору Володимировичу

ВІДГУК

офіційного опонента,

**доктора технічних наук, доцента, доцента кафедри технології
машинобудування та металорізальних верстатів Національного
технічного університету «Харківський політехнічний інститут»**

БАСОВОЇ Євгенії Володимирівни

**на дисертаційну роботу ТОМАШЕВСЬКОГО Олега Олеговича на тему:
«Технологічне забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду
титану при мікрофрезеруванні»,**

**представлену на здобуття ступеня доктора філософії з галузі знань 13
«Механічна інженерія» за спеціальністю 131 «Прикладна механіка»**

Актуальність теми дослідження.

Одним із актуальних напрямів розвитку сучасної технології машинобудування є забезпечення високої якості та точності мікрообробки деталей із функціональних матеріалів зі спеціальними фізико-механічними властивостями. До таких матеріалів належить нікелід титану (NiTi), який завдяки ефекту пам'яті форми, псевдопружності, корозійній стійкості та біосумісності застосовується у біомедичній техніці, приладобудуванні, авіакосмічній галузі та інших сферах, де до точності виготовлення виробів висуваються підвищені вимоги. При цьому експлуатаційні характеристики деталей значною мірою визначаються якістю сформованих мікроелементів, геометричною точністю та станом обробленої поверхні.

Разом із тим NiTi належить до важкооброблюваних матеріалів. Під час механічної обробки проявляються його низька теплопровідність, схильність до деформаційного зміцнення, висока пластичність і значна адгезійна взаємодія з різальним інструментом, що призводить до підвищення сил і температур різання, інтенсивного зношування інструмента, погіршення якості поверхні та формування технологічних дефектів. Особливо складним є процес мікрофрезерування, для якого характерний прояв масштабного ефекту, коли товщина зрізуваного шару стає співрозмірною з радіусом округлення різальної кромки, а закономірності різання істотно відрізняються від традиційної механічної обробки.

Незважаючи на значну кількість досліджень у галузі мікрообробки матеріалів, питання комплексного врахування впливу режимів різання, масштабного ефекту, силових, теплових і динамічних явищ на формування показників якості пазів у сплавах NiTi залишаються недостатньо дослідженими. Це ускладнює прогнозування точності мікрообробки, стабільності технологічного процесу та забезпечення необхідних експлуатаційних характеристик виробів.

Важливо відзначити, що дисертаційне дослідження виконано в межах держбюджетної науково-дослідної роботи кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка» «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстуруванням» (державний реєстраційний № 0123U102013, 2023–2025 рр.), а його тематика відповідає затвердженим державним пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, що додатково підтверджує актуальність та практичну значущість виконаного дослідження.

У зв'язку з цим дисертаційна робота Томашевського Олега Олеговича, присвячена встановленню закономірностей формування якості пазів під час мікрофрезерування нікеліду титану та розробленню рекомендацій щодо вибору раціональних режимів обробки, є своєчасною, має наукове і практичне

значення та відповідає сучасним потребам розвитку технологій прецизійної механічної обробки.

Ступінь обґрунтованості наукових положень, висновків і рекомендацій, сформульованих у дисертації.

Наукові положення, висновки та практичні рекомендації, наведені в дисертаційній роботі Томашевського О.О., є достатньо обґрунтованими як з наукової, так і з прикладної точки зору. Їх достовірність забезпечується логічною побудовою дослідження, відповідністю поставлених завдань обраним методам дослідження, комплексним використанням експериментальних і чисельних методів, а також застосуванням сучасних засобів статистичної обробки результатів.

Поставлена мета дослідження послідовно реалізована через систему взаємопов'язаних завдань, спрямованих на встановлення закономірностей формування якості пазів під час мікрофрезерування нікеліду титану. При цьому дослідження не обмежується аналізом окремих показників якості, а охоплює силові, температурні, вібраційні та геометричні характеристики процесу, що дало змогу комплексно оцінити вплив технологічних параметрів на результати механічної обробки.

Обґрунтованість отриманих результатів підтверджується використанням сучасної експериментальної бази, яка забезпечила вимірювання сили різання, параметрів вібрації, геометричних характеристик пазів і показників якості поверхні. Застосування оптичної профілометрії дозволило виконати кількісне оцінювання не лише параметрів шорсткості, а й геометричної точності та розмірів технологічних дефектів, що підвищує достовірність отриманих експериментальних даних.

Важливим фактором, що підсилює обґрунтованість результатів, є поєднання фізичного експерименту з чисельним моделюванням процесу мікрофрезерування. Використання скінченно-елементного аналізу дало можливість дослідити силові та температурні явища, безпосереднє експериментальне визначення яких є складним, а порівняння результатів

моделювання з експериментальними даними підтвердило адекватність побудованих моделей у межах досліджених умов.

Достовірність установлених закономірностей забезпечується також застосуванням сучасного математичного апарату обробки експериментальних даних, зокрема методів дисперсійного та регресійного аналізу, що дозволило кількісно оцінити вплив основних технологічних факторів і побудувати математичні моделі для прогнозування показників якості процесу мікрофрезерування.

Практичні рекомендації автора базуються не лише на аналізі окремих критеріїв якості, а й на їх комплексній оптимізації із застосуванням функції бажаності Харрінгтона, що підвищує практичну цінність запропонованих технологічних рішень та забезпечує можливість їх використання залежно від пріоритетних вимог до процесу обробки.

Таким чином, наведені в дисертаційній роботі наукові положення, висновки та практичні рекомендації достатньо обґрунтовані, підтверджені результатами експериментальних досліджень, математичного моделювання та статистичної обробки даних, забезпечують належний ступінь обґрунтованості сформульованих автором наукових положень, висновків і практичних рекомендацій.

Достовірність результатів досліджень.

Достовірність результатів дисертаційного дослідження забезпечується застосуванням взаємодоповнювальних експериментальних, чисельних і статистичних методів, використанням високоточного технологічного та вимірювального обладнання, а також кількісним зіставленням розрахункових і експериментальних даних.

Експериментальні дослідження процесу мікрофрезерування сплаву NiTi виконано за розробленими методиками із використанням мікрофрез діаметром 0,2; 0,5 та 1,0 мм у широкому діапазоні режимів різання. У ході досліджень отримано часові реалізації складових сили різання і вібраційних прискорень, а також визначено комплекс показників якості пазів, зокрема шорсткість дна,

відхилення ширини та глибини, радіуси заокруглення, кути нахилу бокових поверхонь і розміри заусенців. Застосовані засоби вимірювання дали змогу одержати кількісні дані про силовий і динамічний стан процесу та геометричні характеристики оброблених пазів.

Достовірність результатів чисельного моделювання підтверджується експериментальною валідацією розробленої скінченно-елементної моделі процесу мікрофрезерування. Зіставлення розрахункових та експериментальних значень складових сили різання засвідчило можливість застосування моделі для дослідження силових і температурних характеристик процесу в межах розглянутих умов обробки. Це дало автору підстави використовувати результати моделювання для аналізу температури стружки, питомої сили різання та закономірностей прояву масштабного ефекту.

Надійність установлених залежностей підтверджується результатами дисперсійного та регресійного аналізу. Автором кількісно визначено внесок глибини різання, подачі на зуб, швидкості різання та взаємодії режимних параметрів у зміну силових, температурних, вібраційних і якісних характеристик процесу. Побудовані регресійні моделі мають коефіцієнти детермінації R^2 у межах 0,70–0,99, що загалом свідчить про достатню відповідність моделей експериментальним даним у дослідженому діапазоні режимів.

Отримані результати є взаємоузгодженими. Зокрема, встановлено, що зі зменшенням масштабного коефіцієнта зростання питомої сили різання узгоджується з переходом від стабільного стружкоутворення до переважання пластичного витіснення матеріалу. Виявлений вплив режимів різання на геометричну точність, шорсткість і формування заусенців також підтверджується результатами статистичного аналізу та використаний під час оптимізації технологічних параметрів.

Таким чином, наведені в дисертаційній роботі результати є достатньо достовірними, оскільки ґрунтуються на експериментальних даних, підтверджених чисельним моделюванням і статистичною обробкою, а

встановлені закономірності та розроблені рекомендації відповідають результатам проведених досліджень.

Наукова новизна.

Наукова новизна дисертаційної роботи Томашевського О.О. полягає у розвитку наукових засад технологічного забезпечення якості пазів під час мікрофрезерування сплаву NiTi на основі комплексного врахування силових, теплових, динамічних і геометричних характеристик процесу.

Уперше для процесу мікрофрезерування пазів у сплаві NiTi на основі поєднання експериментальних досліджень і скінченно-елементного моделювання встановлено кількісні закономірності впливу глибини різання, подачі на зуб і швидкості різання на складові сили різання, температуру стружки, вібраційне прискорення та комплекс показників якості пазів, що охоплює шорсткість дна, відхилення ширини й глибини, параметри бокових поверхонь і розміри заусенців. Це дало змогу визначити домінуючі технологічні фактори та розробити регресійні залежності для прогнозування результатів обробки в дослідженому діапазоні режимів.

Удосконалено підхід до оцінювання масштабного ефекту при мікрофрезеруванні аустенітного сплаву NiTi шляхом використання масштабного коефіцієнта, що характеризує співвідношення товщини зрізаного шару та радіуса округлення різальної кромки. На основі аналізу питомої сили різання визначено діапазони значень цього коефіцієнта, за яких переважає пластичне витіснення матеріалу або формуються умови стабільного стружкоутворення.

Набув подальшого розвитку метод технологічного забезпечення якості пазів при мікрофрезеруванні NiTi, який, на відміну від вибору режимів за окремим показником, ґрунтується на багатокритеріальному врахуванні геометричної точності, шорсткості, параметрів бокових поверхонь і продуктивності обробки. Це дозволило обґрунтувати диференційовані режими різання залежно від пріоритетних вимог до якості пазів.

Зазначені результати містять елементи наукової новизни, оскільки конкретизують закономірності мікрофрезерування важкооброблюваного сплаву NiTi, розширюють уявлення про прояв масштабного ефекту та створюють наукове підґрунтя для прогнозованого формування якості мікророзмірних пазів.

Значимість одержаних результатів для науки і практичного використання.

Наукове значення одержаних результатів полягає у розвитку наукових засад технологічного забезпечення якості мікророзмірних пазів у виробках зі сплаву NiTi. У роботі поглиблено уявлення про взаємозв'язок між режимами мікрофрезерування, силовими, температурними та вібраційними характеристиками процесу і формуванням показників якості оброблених пазів. Одержані результати конкретизують особливості прояву масштабного ефекту під час мікрофрезерування нікеліду титану та визначають умови переходу від переважного пластичного витіснення матеріалу до стабільного стружкоутворення.

Наукову цінність має комплексне оцінювання якості пазів за сукупністю параметрів, що характеризують шорсткість дна, точність ширини й глибини, геометрію бокових поверхонь і розміри заусенців. Проведений аналіз показав, що зазначені показники формуються під неоднаковим впливом режимних параметрів та їх взаємодій. Це створює підґрунтя для подальшого розвитку методів прогнозування і керування якістю мікрообробки функціональних важкооброблюваних матеріалів..

Практична значимість результатів полягає у можливості використання розробленої та експериментально валідованої скінченно-елементної моделі для оцінювання складових сили різання, температурних характеристик і питомої сили різання з урахуванням масштабного коефіцієнта. Модель може бути застосована під час обґрунтування режимів мікрофрезерування, за яких забезпечуються сприятливі умови стружкоутворення.

Розроблені регресійні моделі дають змогу прогнозувати силові, температурні та вібраційні характеристики процесу, а також шорсткість і геометричні параметри пазів у межах дослідженого діапазону режимів. Їх використання разом із результатами багатокритеріальної оптимізації дозволяє здійснювати вибір параметрів обробки відповідно до пріоритетних вимог щодо точності, шорсткості поверхні або продуктивності технологічного процесу.

Практичну цінність мають розроблені та експериментально апробовані рекомендації щодо призначення режимів мікрофрезерування пазів у сплавах NiTi. Отримані результати можуть бути використані на етапі технологічної підготовки виробництва деталей із мікророзмірними конструктивними елементами для медичного приладобудування, точного машинобудування та інших галузей, у яких застосовуються вироби з нікеліду титану.

Практичне використання результатів підтверджується їх упровадженням у діяльність ТОВ «СОФ-Орто» та підприємства «Даніко», а також у навчальний процес Державного університету «Житомирська політехніка» під час підготовки здобувачів першого та другого рівнів вищої освіти за спеціальностями G9 «Прикладна механіка» та G11.01 «Машинобудування (Верстати та інструменти)» при викладанні дисциплін «Теорія різання», «Прогресивні процеси обробки матеріалів» і «Робочі процеси високих технологій».

Повнота викладу результатів дисертації в опублікованих працях.

Основні результати дисертаційної роботи достатньою мірою висвітлено в опублікованих наукових працях автора.

За темою дисертації опубліковано 14 наукових праць, серед яких 4 статті у наукових фахових виданнях України, 1 стаття у виданні, що індексується в міжнародних наукометричних базах Scopus та Web of Science, а також 9 публікацій апробаційного характеру у матеріалах наукових конференцій.

Опубліковані праці охоплюють основні етапи виконаного дослідження, зокрема результати експериментальних досліджень процесу мікрофрезерування сплаву NiTi, чисельного моделювання, статистичного

аналізу отриманих залежностей, а також питання оптимізації режимів різання та технологічного забезпечення якості пазів. Це дає підстави вважати, що основні наукові положення, висновки та практичні рекомендації дисертаційної роботи достатньо повно відображені в публікаціях автора.

У працях, опублікованих у співавторстві, особистий внесок здобувача визначено, що дає можливість ідентифікувати результати, отримані безпосередньо автором дисертаційного дослідження.

Академічна доброчесність.

Порушень академічної доброчесності в дисертації та наукових публікаціях, у яких висвітлені основні наукові результати дисертації, не виявлено.

Усі результати, які винесено автором на захист, отримані самостійно і містяться в опублікованих роботах. У роботах, опублікованих у співавторстві, використані тільки ті ідеї, положення та розрахунки, які є результатом особистих наукових пошуків.

Оцінка змісту дисертації, її завершеності та відповідності встановленим вимогам.

Дисертаційна робота Томашевського О.О. є цілісним і логічно побудованим науковим дослідженням, структура якого відповідає поставленій меті та забезпечує послідовне вирішення сформульованих завдань. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, загальних висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації становить 246 сторінок.

У вступі належним чином обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, завдання, об'єкт і предмет дослідження, наведено відомості про наукову новизну, практичне значення отриманих результатів, їх апробацію та зв'язок роботи з науково-дослідною тематикою.

Перший розділ присвячено аналізу сучасного стану досліджень у галузі мікрофрезерування сплавів NiTi. Автором розглянуто фізико-механічні особливості матеріалу, механізми стружкоутворення, прояв масштабного

ефекту, силові, температурні та вібраційні явища, сучасні підходи до скінченно-елементного моделювання процесу мікрорізання, а також методи оцінювання якості сформованих пазів. За результатами аналізу коректно визначено наукову проблему, сформовано концепцію дослідження та обґрунтовано завдання дисертаційної роботи.

У другому розділі наведено методичне забезпечення досліджень. Детально описано експериментальну установку, технологічне та вимірювальне обладнання, методики визначення сил різання, вібраційних характеристик і показників якості пазів, а також методику побудови скінченно-елементної моделі процесу мікрофрезерування та багатокритеріальної оптимізації режимів різання. Наведені методики є достатньо повними та забезпечують відтворюваність проведених досліджень.

У третьому розділі наведено результати експериментальних досліджень і чисельного моделювання процесу мікрофрезерування сплаву NiTi. Автором встановлено закономірності зміни сил різання, температурних і вібраційних характеристик процесу, досліджено прояв масштабного ефекту, виконано експериментальну валідацію скінченно-елементної моделі та проаналізовано вплив режимів різання на показники якості сформованих пазів.

У четвертому розділі виконано статистичне опрацювання результатів досліджень, побудовано регресійні моделі та проведено багатокритеріальну оптимізацію режимів мікрофрезерування. На основі отриманих залежностей розроблено практичні рекомендації щодо вибору режимів різання залежно від вимог до геометричної точності, шорсткості поверхні та продуктивності процесу.

Загальні висновки логічно впливають зі змісту дисертації, відповідають поставленим завданням і відображають основні наукові та практичні результати виконаного дослідження.

У цілому дисертаційна робота є завершеним науковим дослідженням. Матеріал викладено послідовно, розділи взаємопов'язані між собою, а

структура роботи відповідає вимогам, що висуваються до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії.

Дискусійні положення та зауваження щодо змісту дисертації

Незважаючи на позитивне враження від дисертаційної роботи, її окремі положення можуть бути предметом наукової дискусії.

1. Дослідження виконано для процесу мікрофрезерування прямих пазів у сплаві NiTi, що дозволило встановити закономірності впливу режимів різання на силові, температурні, вібраційні характеристики процесу та показники якості обробленої поверхні. Водночас у сучасному високоточному виробництві значна частина мікроелементів має просторову або криволінійну геометрію, при обробці яких істотно змінюються умови врізання інструмента, миттєва товщина зрізуваного шару, напрямок дії сил різання та умови стружкоутворення. Тому доцільно було б окреслити межі застосування запропонованих моделей і рекомендацій для обробки конструктивних елементів складнішої геометрії.

2. Одним із ключових елементів роботи є скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування. Для опису механічної поведінки матеріалу використано модель пластичності Джонсона-Кука. Разом із тим, відомо, що для сплавів NiTi суттєве значення мають фазові перетворення, псевдопружність та температурно-залежні механічні властивості. У роботі доцільно було б більш детально обґрунтувати вибір саме цієї моделі матеріалу, визначити її обмеження для досліджуваного аустенітного сплаву та оцінити можливий вплив прийнятих припущень на точність розрахункових результатів.

3. Під час аналізу масштабного ефекту автор використовує масштабний коефіцієнт, визначений через подачу на зуб і радіус округлення різальної кромки. Разом із тим у реальному процесі мікрофрезерування миттєва товщина зрізуваного шару визначається кінематикою руху зуба та залежить від його кутового положення, радіального биття інструмента, пружних деформацій технологічної системи й можливого нерівномірного розподілу

навантаження між зубами. На мою думку, доцільно було б обговорити вплив цих факторів на визначення масштабного коефіцієнта та оцінити межі застосовності запропонованого підходу.

4. У роботі виконано експериментальну валідацію скінченно-елементної моделі процесу мікрофрезерування, однак оцінювання її адекватності фактично проведено лише за складовими сили різання. Враховуючи, що модель надалі використовується також для аналізу температурного стану процесу та дослідження масштабного ефекту, доцільно було б більш детально обґрунтувати можливість поширення результатів валідації на ці характеристики або навести додаткові аргументи щодо адекватності моделі саме для температурних розрахунків.

5. У дисертації побудовано регресійні моделі як для експериментальних, так і для чисельно отриманих даних. Водночас результати скінченно-елементного моделювання мають детермінований характер, тому статистична інтерпретація критеріїв значущості для таких моделей відрізняється від обробки експериментальних даних. У зв'язку з цим доцільно було б чіткіше розмежувати статистичний аналіз експериментальних і розрахункових результатів та надати відповідні пояснення щодо інтерпретації одержаних статистичних показників.

Зазначені зауваження мають переважно дискусійний характер, не ставлять під сумнів достовірність отриманих результатів, обґрунтованість сформульованих наукових положень і висновків та не знижують наукової й практичної цінності дисертаційної роботи.

Загальний висновок та оцінка дисертації

Дисертаційна робота Томашевського Олега Олеговича на тему «Технологічне забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні» за своїм змістом відповідає спеціальності 131 «Прикладна механіка» галузі знань 13 «Механічна інженерія». Робота є завершеним самостійним науковим дослідженням, у якому вирішено

актуальне науково-практичне завдання, що полягає у встановленні закономірностей формування показників якості пазів при мікрофрезеруванні сплаву NiTi з урахуванням впливу режимів різання, масштабного ефекту, силових, температурних і вібраційних характеристик процесу та розробленні науково обґрунтованих рекомендацій щодо технологічного забезпечення якості обробки.

Одержані результати характеризуються науковою новизною, мають теоретичне та практичне значення, є достатньо обґрунтованими і достовірними, а висновки та рекомендації відповідають поставленій меті й завданням дослідження.

Подана дисертаційна робота Томашевського Олега Олеговича «Технологічне забезпечення якості пазів на поверхнях виробів з нікеліду титану при мікрофрезеруванні» відповідає спеціальності 131 «Прикладна механіка», відповідає вимогам до дисертацій на здобуття ступеня доктора філософії, а саме вимогам пунктів 6, 7, 8 і 9 Порядку присудження ступеня доктора філософії та скасування рішення разової спеціалізованої вченої ради закладу вищої освіти, наукової установи про присудження ступеня доктора філософії, затвердженого Постановою Кабінету Міністрів України від 12 січня 2022 року № 44 (зі змінами), а її автор, Томашевський Олег Олегович, заслуговує на присудження ступеня доктора філософії за спеціальністю 131 «Прикладна механіка» галузі знань 13 «Механічна інженерія».

Офіційний опонент:

доктор технічних наук, доцент,

доцент кафедри технології машинобудування

та металорізальних верстатів

Національного технічного університету

«Харківський політехнічний інститут»

Євгенія БАСОВА

