

О.О. Томашевський, аспірант
Н.О. Балицька, к.т.н., доц.
О.І. Прилипко, к.фіз.-мат.н., доц.
Державний університет «Житомирська політехніка»

Скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування нітинолу

У багатьох галузях промисловості стрімко зростає попит на мініатюрні високоточні вироби, що стимулює потребу в ефективних технологіях їх виготовлення. Мікрофрезерування є найбільш універсальним процесом мікрорізання металів і сплавів. Мікрофрезерування характеризується складними умовами стружкоутворення та високими питомими силами різання. Під час обробки таких важкооброблюваних матеріалів, як нітиноли, ці негативні ефекти значно підсилюються через їх особливі фізико-механічні властивості. Тому дослідження процесів мікрофрезерування нітинолів з метою забезпечення високої ефективності їх обробки є актуальним питанням для сучасного рівня металообробних технологій. Робота присвячена розробці скінченно-елементної моделі обробки паза на плоскій поверхні заготовки з нітинолу ($Ni_{56,5}Ti_{43,5}$ за вагою) двоозубою твердосплавною мікрофрезою у програмному комплексі DEFORM-3D. Покроково описано етапи розробки моделі. Розглянуто особливості підготовки CAD-моделей заготовки та фрези, налаштування властивостей інструменту, визначення моделі поведінки оброблюваного матеріалу, генерації скінченно-елементної сітки, налаштування умов контакту. В результаті скінченно-елементного моделювання процесу сухого мікрофрезерування нітинолу фрезою діаметром 1 мм було визначено сили різання для такого режиму обробки: швидкість різання – 20 м/хв, глибина різання – 0,2 мм, подача на зуб – 0,003 мм. Адекватність розробленої моделі підтверджено порівнянням з результатами власних експериментальних вимірювань сил різання для аналогічних умов обробки. Розроблена скінченно-елементна модель мікрофрезерування буде використана для подальшої оптимізації технологічних параметрів різання нітинолу з метою підвищення ефективності процесу мікрообробки цього матеріалу.

Ключові слова: *NiTi; паз; сила різання; мікрофреза; DEFORM-3D.*

Актуальність теми. Мікрофрезерування – це процес виготовлення високоточних дрібних деталей чи мікроструктур на поверхні матеріалу з використанням мікроінструментів (діаметром до 1 мм включно). Мікрофрезерування відрізняється від процесу традиційного фрезерування наявністю «масштабного ефекту» та «ефекту мінімальної товщини зрізу». Масштабний ефект полягає у нелінійному зростанні питомої сили різання, коли подача на зуб зменшується і стає меншою за радіус різальної кромки. Несприятливі умови стружкоутворення впливають на процес видалення матеріалу, що призводить до збільшення сил різання, температур та тертя в зоні різання. Все це в свою чергу значно погіршує стійкість інструменту. На механізм видалення стружки також впливає ефект мінімальної товщини зрізу (ploughing effect) – значний радіус різальної кромки, порівняно з товщиною зрізу, призводить до негативного кінематичного переднього кута різального інструмента. Такий негативний кут стискає верхню частину матеріалу, що призводить до пластичної деформації без різання [1].

Інтерметалід NiTi екваіотомного складу ($\approx 55\%$ Ni), відомий як нітинол, є найпопулярнішим матеріалом з ефектом пам'яті форми. Залежно від температури і напруження він перебуває в аустенітній або мартенситній фазі. Нітиноли належать до важкооброблюваних матеріалів через високе деформаційне зміцнення, особливі пружно-деформаційні характеристики, сильну адгезію та складне стружкоутворення. Такі властивості матеріалу, як низька теплопровідність, висока питома теплоємність і низький ефективний модуль пружності, накладають додаткові обмеження. Згадані чинники зумовлюють критично низьку оброблюваність, внаслідок високої питомої енергії та сил різання, інтенсивного зношування інструментів та надлишкового утворення задирок. Все це негативно впливає на якість поверхневого шару готового виробу [2–4].

Зважаючи на окремо згадані особливості процесу мікрофрезерування і оброблюваності нітинолів, стає очевидною вся технологічна складність саме мікрофрезерування цього сплаву. Оскільки оброблюваність нітинолів є унікальною і все ще недостатньо вивченою, для отримання максимально можливої кількості даних про характеристики процесу різання цих інтерметалідів необхідні не лише експериментальні дослідження, а і комп'ютерне моделювання.

Відомі програми скінченно-елементного аналізу, такі як DEFORM, ABAQUS, LSDYNA, ADVANT EDGE, ANSYS EXPLICIT DYNAMICS та інші, знаходять широке застосування для дослідження процесів різання металів і сплавів. Програмне забезпечення DEFORM-3D орієнтоване на моделювання

процесів різання, термообробки та обробки тиском конструкційних матеріалів, вирізняється відносно простою використання, зручним інтерфейсом і можливістю отримувати стабільні результати [5].

На сьогоднішній день відомо про деякий накопичений досвід мікрофрезерування нітинолу, проте питання забезпечення ефективності цього процесу потребують подальшого дослідження. Тому розробка скінченно-елементної моделі мікрофрезерування нітинолу забезпечить можливість більш глибокого аналізу силових, температурних та інших характеристик процесу оброблення, що дозволить проводити науково обґрунтований пошук шляхів підвищення ефективності таких технологічних процесів. Це і формує актуальність роботи.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Моделювання процесів механічної обробки конструкційних матеріалів є зручним інструментом, який допомагає визначати силові, температурні характеристики процесу різання, напруження, деформації тощо, оптимізувати режими обробки, геометричні параметри інструменту та інші умови оброблення. Це особливо важливо в сучасному виробництві, де швидкість прийняття рішень та витрати на розробку технологічних процесів мають велике значення для успішної реалізації проєктів.

Роботи [6–15] присвячені питанням розробки скінченно-елементних моделей процесу мікрофрезерування металів та сплавів. Так в [6–9] описано скінченно-елементне моделювання процесу мікрофрезерування заготовок з різних типів сплавів у програмі ABAQUS/Explicit. Автори використовували розроблені моделі для визначення сил різання та полів напружень, як в інструменті, так і в заготовці. В оглядовій роботі [6] описується масштабний ефект, ефект мінімальної товщини стружки, ефекти мікроструктури та динаміки різального інструменту, які впливають на основні механізми різання та якість поверхні. В зазначених роботах [7–9] розроблялася саме ортогональна скінченно-елементна модель процесу, що накладає певні обмеження на отримані результати.

Авторами [10] здійснено скінченно-елементне моделювання мікрокінцевого фрезерування сплаву Al6061-T6 в програмі ADVANT EDGE, що дозволяє прогнозувати результуючу шорсткість, мікрорельєф поверхні внаслідок кінцевого мікрофрезерування, а також відхилення від площинності при зносі інструменту.

У [11–14] показано, що скінченно-елементна модель процесу мікрофрезерування, розроблена в DEFORM, забезпечує отримання цілком достовірних результатів щодо сил і температурних полів у зоні різання. Автори [11, 12] для дослідження процесу стружкоутворення під час мікрофрезерування застосували скінченно-елементне моделювання процесу в 2D-постановці для дослідження характеристик процесу різання. Це дозволило визначити вплив покриття cBN зі збільшеним радіусом різальної кромки на сили різання, температуру інструменту, контактний тиск, швидкість ковзання і, таким чином, швидкість зносу інструменту [11]. У [12] здійснено прогнозування розподілу зусиль, напружень і температур з урахуванням ефекту мінімальної товщини зрізу.

Питання просторового скінченно-елементного моделювання процесу мікрофрезерування в програмі DEFORM-3D висвітлені в роботах [13–15]. Аналіз впливу різних кутів нахилу різальної кромки інструменту на сили різання, напруження в інструменті та температури різання здійснено в [13]. Автори [14, 15] представили скінченно-елементні моделі для прогнозування температурних полів інструменту та заготовки в процесі мікрофрезерування різних сплавів при змінних умовах різання.

Результати виконаного аналізу літератури свідчать про перспективність і високу ефективність моделювання процесу мікрофрезерування в тривимірній постановці за допомогою програми DEFORM-3D. DEFORM-3D вважається найбільш практичною програмою для моделювання деформації та обробки матеріалів. Він містить п'ять різних типів симуляцій: ALE Rolling, Steady-State machining, Ring Rolling, Steady-State extrusion, Lagrangian Incremental. Метод Lagrangian Incremental є найбільш розповсюдженим, оскільки використовується для всіх традиційних процесів формоутворення, теплопередачі та термообробки. Цей метод базується на ідеї фіксованих точок у матеріалі, які називаються вузлами. Під час процесу деформації ці вузли можуть зміщуватися і змінювати своє положення відносно початкового стану. Метод дозволяє враховувати такі зміщення та деформації, щоб отримати точні результати моделювання [16].

DEFORM-3D дозволяє інженерам та дослідникам аналізувати поведінку матеріалів під час обробки, прогнозувати напруження, деформацію та інші параметри, що допомагає в оптимізації процесів виробництва та покращенні якості продукції. База даних матеріалів, яка містить близько 145 наборів даних про напруження текучості матеріалів, спрощує процес моделювання скінченно-елементної моделі.

Незважаючи на значну кількість досліджень з моделювання процесів мікрофрезерування різних металів та сплавів, літературний аналіз свідчить про недостатню кількість робіт щодо розробки скінченно-елементної моделі обробки пазів саме у заготовках з нітинолу. Оскільки цей матеріал відрізняється особливими фізико-механічними властивостями і має високу перспективу застосування в інноваційних виробках, то розробка скінченно-елементної моделі його мікрофрезерування є актуальним науково-технічним завданням.

Метою статті є розробка скінченно-елементної моделі процесу сухого мікрофрезерування нітинолу, яка дозволяє визначити часові реалізації складових сил різання.

Викладення основного матеріалу. Для отримання даних щодо сил різання в процесі мікрофрезерування нітинолу, які стануть базою для порівняння із результатами комп'ютерного моделювання процесу, було проведено експериментальне вимірювання сил різання. Експеримент проводився на оброблюючому центрі моделі DMU 80 eVo Deckel Maho в умовах сухого різання. Фрезерувався паз шириною 1 мм і довжиною 5 мм на плоскій поверхні заготовки розміром 30×30 мм [17] зі сплаву $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$. Обробка проводилася кінцевою твердосплавною фрезою GARANT Master Titan з TiAlN покриттям [18]. Сили різання вимірювали за допомогою динамометра Kistler 9257B (рис. 1). Отримані дані наведено в таблиці 2.

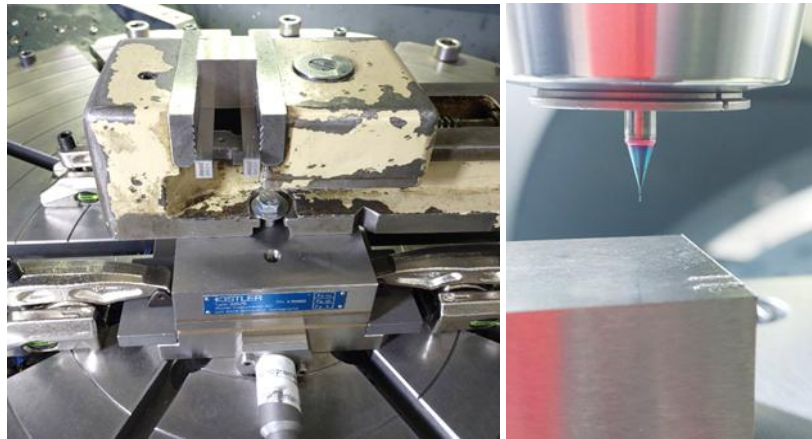
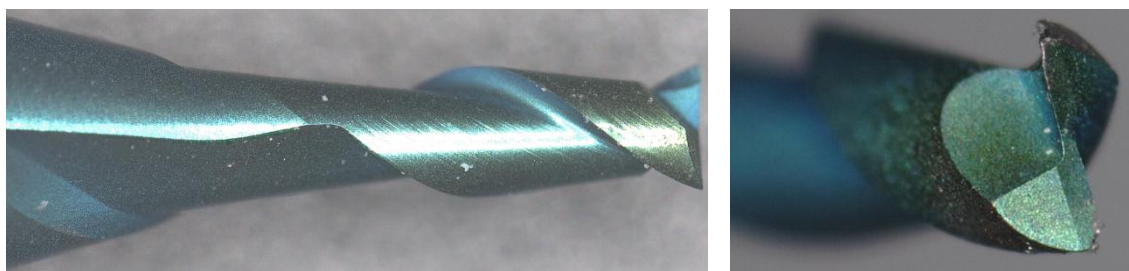


Рис. 1. Вимірювання сил різання при мікрофрезеруванні паза

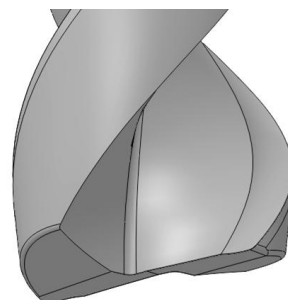
Скінченно-елементна модель була розроблена в програмі DEFORM-3D відповідно до умов експерименту (швидкість різання – 20 м/хв, подача на зуб – 0,003 мм та глибина різання – 0,2 мм, діаметр фрези – 1 мм). Для розрахунку використовувалися такі параметри: метод – Лагранжа; режим – деформація та теплообмін; кількість кроків моделювання – 2000; температура середовища – постійна і дорівнює 20 °С; коефіцієнт конвекції – постійний і дорівнює 0,02 Н/с/мм/°С; типи об'єктів: заготовка – пластична, інструмент – жорсткий.

Розробка скінченно-елементної моделі здійснювалася в зазначеній далі послідовності.

1. У програмі SolidWorks розроблено 3D-модель застосовуваної під час експерименту фрези (рис. 2).



а



б

Рис. 2. Мікрофреза: а – конструкція фрези (фото), б – спрощена 3D-модель

2. Налаштування властивостей інструменту.

Було вибрано тип об'єкта – жорсткий – цей стан визначає об'єкт як недеформований і зберігає задану йому початкову геометрію. При цьому час розрахунку скорочується, порівняно з пружно-пластичним типом. У вкладці «Переміщення» були задані частота обертання фрези 6366 об/хв та лінійна швидкість подачі 0,63 мм/с.

3. Розробка 3D-моделі заготовки з попереднім вирізом.

Моделювання всього часу оброблення паза довжиною 5 мм потребуватиме значного часу та комп'ютерних ресурсів. Враховуючи це, було розроблено спрощену 3D-модель заготовки з попереднім вирізом (рис. 3).

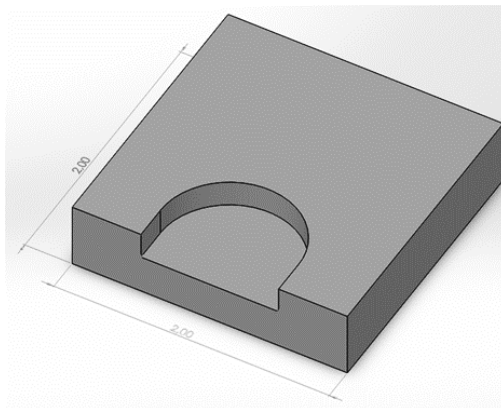


Рис. 3. 3D-модель заготовки з попереднім вирізом

4. Визначення моделі поведінки оброблюваного матеріалу.

Точність результатів, отриманих при моделюванні процесу мікрофрезерування, залежить від коректності завдання характеристик оброблюваного матеріалу. Коефіцієнти рівняння були взяті з бази даних DEFORM-3D (табл. 1).

Таблиця 1

Параметри моделі поведінки матеріалу заготовки

Параметр	Значення
Деформація, %	0–0,6
Швидкість деформації, 1/с	0,001–10
Температура, °C	850–1100
Модуль Юнга, МПа	75000
Коефіцієнт Пуассона	0,3
Початкова температура, °C	20
Теплопровідність, Н/(с·К)	10
Теплоємність, Дж/(К·м³)	0,3
Коефіцієнт теплового випромінювання	0,7
Густина, г/м³	6,45
Механічний еквівалент теплоти, Дж	0,9

5. Генерація скінченно-елементної сітки.

Система DEFORM пропонує два способи генерації сітки. «System Setup» – налаштування сітки виконується за замовчуванням під час генерації сітки та її подальшої реструктуризації. Метод «User Defined» дозволяє самостійно вибирати поверхні для генерації сітки. Існує також два типи налаштувань щільності сітки: «Relativ» – обирається кількість елементів та коефіцієнт їх співвідношення, «Absolute» – обирається коефіцієнт співвідношення елементів та розмір елемента (максимальний чи мінімальний).

Сітка різального інструменту містила 32000 скінченних елементів з ущільненням на різальній частині (рис. 4, а). Сітка заготовки містила 75000 скінченних елементів (рис. 4, б) з локальним ущільненням у зоні взаємодії з інструментом.

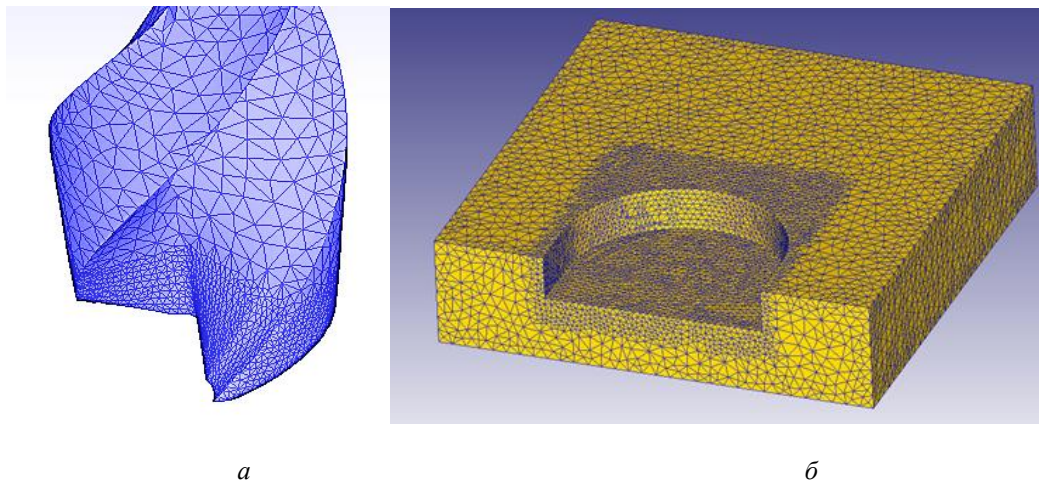


Рис. 4. Сітка скінченних елементів: а – інструмент, б – заготовка

6. Умови контакту.

Під час налаштування умов контакту було визначено ролі між об'єктами: Master – інструмент і Slave – заготовка; тип тертя – Shear (зсув), коефіцієнт тертя постійний і дорівнює 0,6; коефіцієнт теплообміну 11 Н/с/мм/°С.

У результаті моделювання процесу мікрофрезерування було визначено часові реалізації складових сил різання (рис. 5), які представлено в таблиці 2.

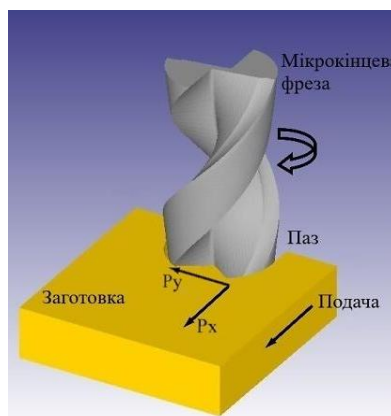
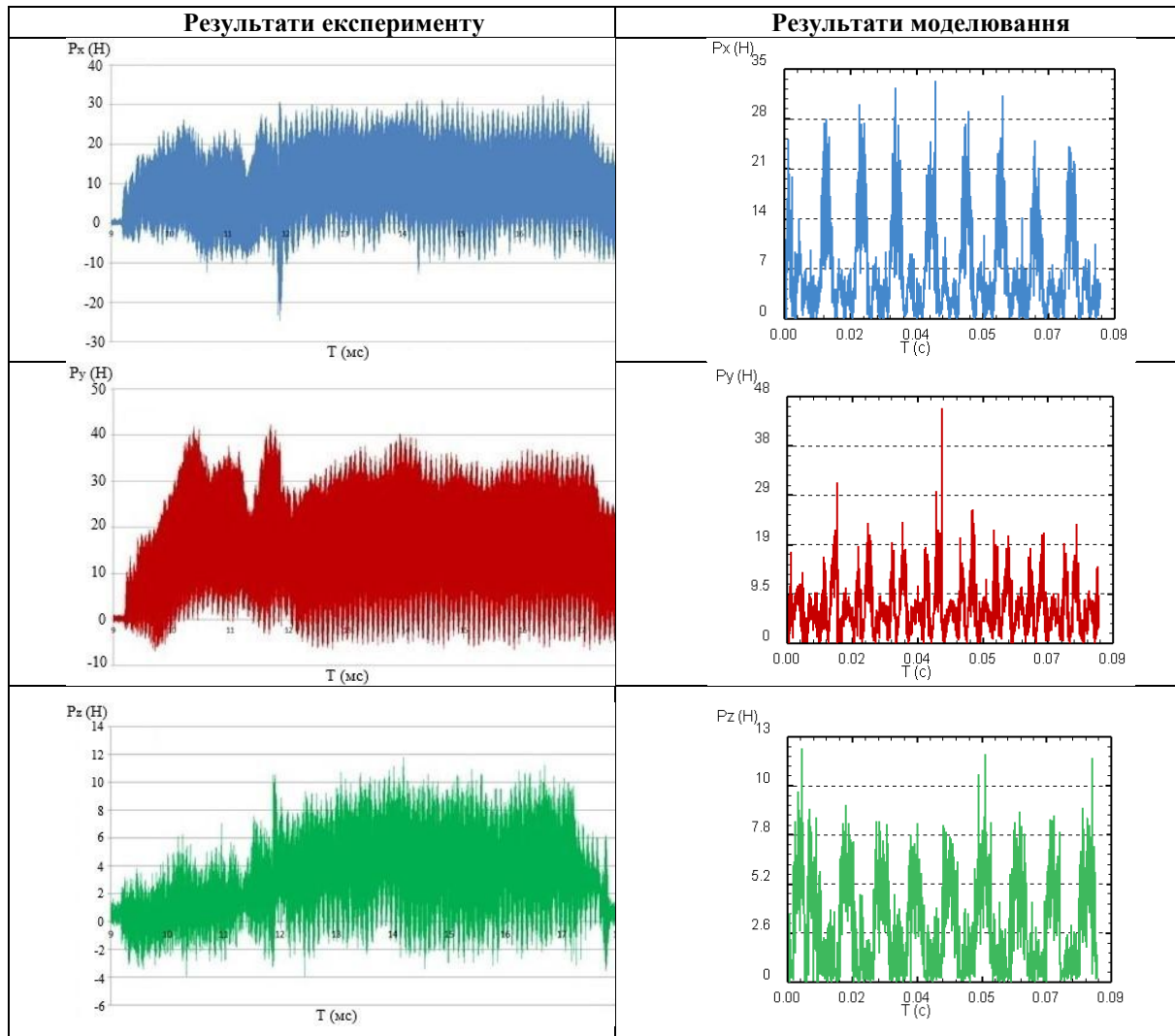


Рис. 5. Схема мікрофрезерування паза

Як видно із таблиці 2, максимальне значення сили P_x досягає 34 Н, P_y – 47 Н, і P_z – 12 Н. Такі значення сил різання є досить значними для фрези діаметром 1 мм і застосованих режимів різання, що можна пояснити особливими властивостями нітинолу, які і зумовлюють складність його оброблення.

Оскільки комп'ютерна модель процесу мікрофрезерування не враховує усіх факторів, які впливають на значення сил різання, наприклад, вібрації технологічної системи, похибки установки і закріплення інструменту та заготовки, вплив покриття фрези, похибки розмірів елементів системи, знос інструменту тощо, то цілком логічного є відмінність в отриманих значеннях сил різання від експериментальних. При оцінці відносної похибки значень сил різання за максимальними (піковими) значеннями отримано такі результати: P_x – 6,25 %, P_y – 11,9 % та P_z – 0. Отже, розраховані відносні похибки між результатами експерименту і моделювання знаходяться в межах допустимих значень і, відтак, розроблену скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування нітинолу можна вважати адекватною.

Складові сили різання під час мікрофрезерування нітинолу $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$
 ($S_z = 0,003$ мм, $V_c = 20$ м/хв, $t = 0,2$ мм)



Умовні позначення: P_x – сила подачі, P_y – горизонтальна сила, перпендикулярна до подачі, P_z – вертикальна сила різання

Висновки та перспективи подальших досліджень. Виконано експериментальне дослідження та скінченно-елементне моделювання процесу обробки сплаву $Ni_{56,5}Ti_{43,5}$ двозубою кінцевою мікрофрезою діаметром 1 мм, при швидкості різання 20 м/хв, глибині різання 0,2 мм та подачі на зуб 0,003 мм. Скінченно-елементна модель процесу була розроблена за допомогою програми DEFORM-3D за стандартною процедурою. В результаті проведених досліджень було визначено часові реалізації складових сил різання. Встановлено, що максимальне значення сили P_x становить 34 Н, P_y – 47 Н, P_z – 12 Н. Такі значення сил різання є досить високими для фрези діаметром 1 мм і застосованих режимів різання, що пояснюється особливими фізико-механічними властивостями нітинолу, які і зумовлюють його важкооброблюваність.

Адекватність розробленої скінченно-елементної моделі підтверджується результатами порівняння значень сил різання, визначених експериментально і в результаті моделювання. Відносні похибки значень сил різання за максимальними значеннями такі: 6,25 % для сили подачі P_x , 11,9 % для горизонтальної сили P_y , перпендикулярної подачі, і 0 для сили P_z . Отже, розраховані відносні похибки між результатами експерименту і моделювання знаходяться в межах допустимих значень і розроблену скінченно-елементну модель процесу мікрофрезерування нітинолу можна вважати адекватною.

Зазначена скінченно-елементна модель процесу мікрофрезерування, розроблена в програмному комплексі DEFORM-3D, буде застосована для подальших досліджень з метою оптимізації умов обробки заготовок з нітинолу. Це забезпечить можливість більш глибокого аналізу силових, температурних та інших характеристик процесу оброблення, що дозволить проводити науково обґрунтований пошук шляхів підвищення ефективності таких технологічних процесів.

Список використаної літератури:

1. *Томашевський О.О.* Процес мікрофрезерування металів і сплавів: аналітичний огляд / *О.О. Томашевський, Н.О. Балицька* // *Технічна інженерія*. – 2023. – № 2 (92). – С. 74–88. DOI: 10.26642/ten-2023-2(92)-74-88.
2. *Балицька Н.О.* Особливості торцевого фрезерування сплавів Ni-Ti з ефектом пам'яті форми / *Н.О. Балицька* // *Технічна інженерія*. – 2022. – № 2 (90). – С. 3–12. DOI: 10.26642/ten-2022-2(90)-3-12.
3. *Козяр Я.А.* Аналітичний огляд особливостей фрезерування жароміцних сплавів / *Я.А. Козяр, Н.О. Балицька, Л.Г. Полонський* // *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. – 2023. – № 6 (329). – С. 166–171.
4. *Балицька Н.О.* Перспективи застосування мікрофрезерування для модифікації змочувальних властивостей поверхонь нітинолів / *Н.О. Балицька* // *Сучасні технології у промисловому виробництві : матеріали XI Всеукраїнської науково-технічної конференції, 23–26 квітня*. – Суми : Сумський державний університет, 2024. – С. 78–79.
5. Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling / *H.Vyhovskyi and other* // *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. – 2022. – P. 222–231. DOI: 10.1007/978-3-031-16651-8_21.
6. *Anand R.S.* Modeling and Simulation of Mechanical Micro-Machining – A Review / *R.S. Anand, K.Patra* // *Machining Science and Technology*. – 2014. – Vol. 18, № 3. – P. 323–347. DOI: 10.1080/10910344.2014.925377.
7. *Afazov S.M.* Modelling and simulation of micro-milling cutting forces / *S.M. Afazov, S.M. Ratchev, J.Segal* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – Vol. 210, № 15. – P. 2154–2162. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.033.
8. *Jin X.* Prediction of micro-milling forces with finite element method / *X.Jin, Y.Altintas* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2012. – Vol. 212, № 3. – P. 542–552. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.020.
9. *Pratap T.* Modeling Cutting Force in Micro-Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy / *T.Pratap, K.Patra, A.A. Dyakonov* // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 129. – P. 134–139. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.021.
10. *Davoudinejad A.* 3D finite element prediction of chip flow, burr formation, and cutting forces in micro end-milling of aluminum 6061-T6 / *A.Davoudinejad, P.Parenti, M.Annoni* // *Frontiers of Mechanical Engineering*. – 2017. – Vol. 12, № 2. – P. 203–214. DOI: 10.1007/s11465-017-0421-6.
11. *Thepsonthi T.* Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear / *T.Thepsonthi, T.Özel* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2013. – Vol. 213, № 4. – P. 532–542. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.003.
12. *Dhanorker A.* An Experimental and Modeling Study on Meso/Micro End Milling Process / *A.Dhanorker, T.Özel* // *ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference, 8–11 October*. – Ypsilanti, Michigan, USA, 2006. DOI: 10.1115/msec2006-21127.
13. *Ucun I.* Finite element modeling of micro-milling: Numerical simulation and experimental validation / *I.Ucun, K.Aslantas, F.Bedir* // *Machining Science and Technology*. – 2016. – Vol. 20, № 1. – P. 148–172. DOI: 10.1080/10910344.2016.1147650.
14. *Thepsonthi T.* 3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Experimental validations on chip flow and tool wear / *T.Thepsonthi, T.Özel* // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2015. – Vol. 221. – P. 128–145. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.019.
15. Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process / *K.Yang and other* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2010. – Vol. 52, № 9–12. – P. 905–912. DOI: 10.1007/s00170-010-2795-z.
16. Deform 3d v61 [Electronic resource]. – Access mode : <https://vdocuments.mx/deform-3d-v61-manual.html>.
17. *Томашевський О.О.* Утворення задирок при мікрофрезеруванні нітинолу / *О.О. Томашевський, Н.О. Балицька* // *Тези доп. Всеукр. наук.-практ. on-line конф. здобувачів вищої освіти і молодих учених, присвяченої Дню науки*. – Житомир, 2024. – С. 125–126.
18. Hoffmann Group [Electronic resource]. – Access mode : <https://www.hoffmann-group.com/Fl/en/ravemaf/Machining/Milling/Shoulder-mills/Mono-shoulder-mills/GARANT-Master-Titan-solid-carbide-mini-milling-cutter-HPC-TiAlN/p/202287-1?Id=951>.

References:

1. Tomashevskiy, O.O. and Balytska, N.O. (2023), «Protses mikrofrezeruvannya metaliv i splaviv: analitychnyi ohliad», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (92), pp. 74–88, doi: 10.26642/ten-2023-2(92)-74-88.
2. Balytska, N.O. (2022), «Osoblyvosti tortsevoho frezeruvannya splaviv Ni-Ti z efektom pamiati formy», *Tekhnichna inzheneriia*, No. 2 (90), pp. 3–12, doi: 10.26642/ten-2022-2(90)-3-12.
3. Koziar, Ya.A., Balytska, N.O. and Polonskyi, L.H. (2023), «Analitychnyi ohliad osoblyvostei frezeruvannya zharomitsnykh splaviv», *Visnyk Khmelnytskoho natsionalnoho universytetu. Tekhnichni nauky*, No. 6 (329), pp. 166–171.
4. Balytska, N.O. (2024), «Perspektyvy zastosuvannya mikrofrezeruvannya dlia modyfikatsii zmochuvalnykh vlastyvostei poverkhon nitynoliv», *Suchasni tekhnologii u promyslovomu vyrobnytstvi, materialy XI Vseukrainskoi naukovo-tekhnichnoi konferentsii, 23–26 kvitnya, Sumsnyi derzhavnyi universytet, Sumy*, pp. 78–79.
5. Vyhovskyi, H. et al. (2022), «Numerical Simulation of Cutting Forces in Face Milling», *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, pp. 222–231, doi: 10.1007/978-3-031-16651-8_21.
6. Anand, R.S. and Patra, K. (2014), «Modeling and Simulation of Mechanical Micro-Machining – A Review», *Machining Science and Technology*, Vol. 18, No. 3, pp. 323–347, doi: 10.1080/10910344.2014.925377.
7. Afazov, S.M., Ratchev, S.M. and Segal, J. (2010), «Modelling and simulation of micro-milling cutting forces», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 15, pp. 2154–2162, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2010.07.033.
8. Jin, X. and Altintas, Y. (2012), «Prediction of micro-milling forces with finite element method», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 212, No. 3, pp. 542–552, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2011.05.020.

9. Pratar, T., Patra, K. and Dyakonov, A.A. (2015), «Modeling Cutting Force in Micro-Milling of Ti-6Al-4V Titanium Alloy», *Procedia Engineering*, Vol. 129, pp. 134–139, doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.021.
10. Davoudinejad, A., Parenti, P. and Annoni, M. (2017), «3D finite element prediction of chip flow, burr formation, and cutting forces in micro end-milling of aluminum 6061-T6», *Frontiers of Mechanical Engineering*, Vol. 12, No. 2, pp. 203–214, doi: 10.1007/s11465-017-0421-6.
11. Thepsonthi, T. and Özel, T. (2013), «Experimental and finite element simulation based investigations on micro-milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Effects of cBN coating on tool wear», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 4, pp. 532–542, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.11.003.
12. Dhanorker, A. and Özel, T. (2006), «An Experimental and Modeling Study on Meso/Micro End Milling Process», *ASME 2006 International Manufacturing Science and Engineering Conference*, Ypsilanti, Michigan, USA, 8–11 October, doi: 10.1115/msec2006-21127.
13. Uzun, I., Aslantas, K. and Bedir, F. (2016), «Finite element modeling of micro-milling: Numerical simulation and experimental validation», *Machining Science and Technology*, Vol. 20, No. 1, pp. 148–172, doi: 10.1080/10910344.2016.1147650.
14. Thepsonthi, T. and Özel, T. (2015), «3-D finite element process simulation of micro-end milling Ti-6Al-4V titanium alloy: Experimental validations on chip flow and tool wear», *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 221, pp. 128–145, doi: 10.1016/j.jmatprotec.2015.02.019.
15. Yang, K. et al. (2010), «Tool edge radius effect on cutting temperature in micro-end-milling process», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 52, No. 9–12, pp. 905–912, doi: 10.1007/s00170-010-2795-z.
16. *Deform 3d v61*, [Online], available at: <https://vdocuments.mx/deform-3d-v61-manual.html>
17. Tomashevskiy, O.O. and Balytska, N.O. (2024), «Utvorennia zadyrok pry mikrofrezeruvanni nitynolu», *Tezy dop. Vseukr. nauk.-prakt. on-line konf. zdobuvachiv vyshchoi osvity i molodykh uchenykh, prysviachenoї Dniu nauky*, Zhytomyr, pp. 125–126.
18. Hoffmann Group, [Online], available at: <https://www.hoffmann-group.com/Fl/en/ravemaf/Machining/Milling/Shoulder-mills/Mono-shoulder-mills/GARANT-Master-Titan-solid-carbide-mini-milling-cutter-HPC-TiAlN/p/202287-1?Id=951>

Томашевський Олег Олегович – аспірант Державного університету «Житомирська політехніка».
<https://orcid.org/0000-0003-2639-1866>.

Наукові інтереси:

- дослідження процесів мікрорізання конструкційних матеріалів;
- проектування різальних інструментів.

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

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

Наукові інтереси:

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

Прилипко Олександр Іванович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0783-1942>.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- багатофакторне оцінювання і прийняття рішень;
- теоретико-алгебраїчні дослідження систем диференціальних рівнянь.

Tomashevskiy O.O., Balytska N.O., Prylypko O.I.

Finite element modeling of the nitinol micro-milling process

The demand for miniature precision products is growing rapidly in many industries, which stimulates the need for efficient manufacturing technologies. Micro-milling is the most versatile process for micromachining metals and alloys. Micro-milling is characterized by difficult chip formation conditions and high specific cutting forces. When machining such difficult-to-machine materials as nitinol, these negative effects are significantly amplified due to their special physical and mechanical properties. Therefore, the study of nitinol micro-milling processes to ensure high machining efficiency is a very important issue for the current level of machining technologies. This work is devoted to the development of a finite-element model of machining a groove on the flat surface of a nitinol workpiece (Ni_{56.5}Ti_{43.5} by weight) with a two-tooth carbide micro-mill in the Deform-3D program. The methodology of model development is described step by step. The features of preparing CAD models of the workpiece and the cutting tool, setting the tool properties, determining the model of the behaviour of the machined material, generating a finite element mesh, and setting the contact conditions are considered. As a result of the finite element modelling of the process of dry micro-milling of nitinol with a 1 mm diameter tool, the cutting forces for the following machining conditions were determined: cutting speed 20 m/min, cutting depth 0.2 mm, feed per tooth 0.003 mm. The adequacy of the developed model was confirmed by comparison with the results of the experimental measurements of cutting forces for the same machining conditions. The developed finite-element model of micro-milling will be used to further optimize the technological parameters of nitinol cutting in order to increase the efficiency of the micromachining process of this material.

Keywords: NiTi; groove; cutting force; micro milling cutter; DEFORM-3D.

Стаття надійшла до редакції 19.05.2024.