

## **ПИТОМІ СИЛИ РІЗАННЯ ПРИ МІКРОФРЕЗЕРУВАННІ СПЛАВІВ NITi**

Мікрофрезерування сплавів NiTi є перспективною технологією лезової обробки, що забезпечує виготовлення конструктивних мікроелементів. Завдяки унікальним властивостям NiTi, зокрема ефекту пам'яті форми, надпружності, корозійній стійкості, біосумісності тощо, цей метод все ширше застосовується для створення мініатюрних деталей у біомедичних пристроях, аерокосмічних системах та мікроелектромеханічних компонентах.

Однією із основних характеристик процесу мікрофрезерування є питома сила різання – сила, яку необхідно прикласти для зрізання одиниці площі зрізу під час обробки матеріалу різанням. Вона характеризує опір матеріалу деформації та відокремленню стружки, а також впливає на енергетичні показники процесу різання.

Зміна питомої сили різання є однією з основних причин прояву масштабного ефекту, оскільки при зменшенні розмірів зрізу вона значно зростає. При зменшенні розмірів різального інструменту, а також глибини різання та подачі, питома сила, що діє на одиницю об'єму матеріалу, зростає через більшу частку пластичних деформацій і мікроруїнувань порівняно із звичайним різанням. Це відбувається тому, що при малих розмірах зони контакту інструмента з оброблюваним матеріалом значний вплив мають мікроструктурні неоднорідності матеріалу. Таким чином, масштабний ефект при взаємодії інструмента з матеріалом суттєво змінює характер силового навантаження на різальну кромку [1].

Масштабний коефіцієнт – це відношення товщини зрізу до радіуса заокруглення різальної кромки інструмента, тобто чим менший радіус різальної кромки інструмента, тим більший масштабний коефіцієнт при тому ж значенні подачі. При зменшенні масштабного коефіцієнта зростає частка пластичної деформації матеріалу та тертя між різальною кромкою й оброблюваною поверхнею, що призводить до підвищення енерговитрат на одиницю об'єму зрізаного матеріалу.

Один із важливих підходів до підвищення ефективності мікрофрезерування сплавів NiTi полягає у зменшенні питомих сил різання, що досягається шляхом раціонального вибору геометрії інструмента та значень подачі. Подача на зуб повинна перевищувати значення мінімальної товщини зрізу, оскільки надто мала подача призводить до переважання пластичного деформування матеріалу над різанням і різкого зростання питомих сил [2].

За допомогою скінченно-елементного моделювання [3] було визначено сили різання при мікрофрезеруванні сплаву NiTi. В результаті було встановлено, що для фрези діаметром 0,5 мм при глибинах різання 0,1 та 0,003 мм питомі сили різання досягають 3100 ГПа, тоді як для фрези 0,2 мм – приблизно 700 ГПа. Зі збільшенням подачі з 0,000022 до 0,02 мм/зуб питома сила зменшується в 141,64 раза (фреза 0,2 мм) та 421,94 раза (фреза 0,5 мм). Це пов'язано з тим, що при подачі, меншій за радіус різальної кромки, матеріал переважно деформується, а не зрізається, що спричиняє нелінійне зростання навантаження. Отримані результати свідчать, що для забезпечення ефективного різання сплавів NiTi значення подачі повинне забезпечувати масштабний коефіцієнт не менше 0,1, а бажано – понад 0,5, що дозволяє знизити енергетичні витрати та навантаження на інструмент. Оптимальне поєднання цих параметрів забезпечує більш стабільні умови різання та покращує якість обробленої поверхні (зменшення заусенців).

Отже визначення оптимального значення подачі для конкретної фрези з певним радіусом заокруглення різальної кромки, є актуальним науково-практичним завданням. Правильна комбінація геометрії інструмента та режимів різання дозволяє мінімізувати силове навантаження, зменшити зношування інструмента та забезпечити вищу якість обробленої поверхні при мікрофрезеруванні NiTi.

Дослідження виконано в рамках реалізації НДР Міністерства освіти і науки України «Модифікація властивостей поверхонь інтерметалідів з ефектом пам'яті форми фрезерним текстурованням» (№ 0123U102013).

### **Список літератури:**

1. Aramcharoen, A., Mativenga, P. T. Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel. Precision Engineering, 2009. Vol.33(4), P. 402–407.
2. Aslantaş K., Kaynak Y. Şekil Hafızalı NİTİ Alaşımının Mikro Frezelenmesi ve Kritik Talaş Kalınlığının Belirlenmesi. Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi. 2018. Vol. 2018, no. 18-2.
3. Balytska N., Tomashevskiy O., Shadura V. Evaluation of Cutting Forces and Temperatures in Micro-Milling of NiTi Alloys Using Finite Element Modeling. Journal of Engineering Sciences. 2025. Vol. 12, no. 1. P. A20–A27.