

**ВИКОРИСТАННЯ ПРИВОДІВ НАНО- ТА МІКРОПЕРЕМІЩЕНЬ  
ПРИ УЛЬТРАПРЕЦИЗІЙНІЙ ОБРОБЦІ НА ВЕРСТАТАХ**

*Наведено результати досліджень щодо ефективності використання інструментального оснащення з пружними напрямними, оснащеного п'єзоприводами для нано- і мікропереміщень. Створення пружного підвісу різця за допомогою пружних пластин, що виконують функцію пружних напрямних чи шарнірів, забезпечує можливість попереднього навантаження пакета п'єзоелементів за рахунок деформації пружних пластин оснащення, достатній рівень жорсткості положення інструменту при різанні і необхідний діапазон позиціонування. Визначено статичні характеристики пружних частин різцетримачів та необхідні сили приводу для позиціонування інструменту, які дозволяють встановити вимоги для конструювання п'єзоприводів щодо забезпечення нано- та мікропозиціонування різального інструменту в заданому діапазоні. Результати досліджень отримані з використанням методу скінченних елементів.*

**Ключові слова:** пружні напрямні, п'єзопривод, нано- та мікропереміщення.

**Постановка проблеми.** В машинобудуванні сьогодення використовуються технології та обладнання для виготовлення деталей машин з нанометричною точністю і в цьому напрямку активно ведуться дослідження: це електроіскрова, електрохімічна та лазерна обробки, фрезерування, шліфування, полірування, процеси викінчувальної обробки.

Проблема прецизійного позиціонування різноманітного інструменту досить актуальна в наші дні, коли в багатьох галузях науки і техніки активно впроваджуються нанотехнології. Коло завдань, де використовують нанометричні виконавчі пристрої, постійно розширюється: автомобілебудування, прецизійне верстатобудування, оптична техніка. Для вирішення різноманітних завдань в мікрометричному, а тим більше в нанометричному діапазонах, необхідні нові технології та технічні засоби.

Найбільш актуальною проблемою є підвищення точності позиціонування. Нанометричний діапазон похибок лінійного позиціонування та секундний діапазон кутових переміщень характерні для сучасних металорізальних верстатів, роботів, мікроманіпуляторів та ін. Вирішення даної проблеми за допомогою традиційних електромеханічних систем не дає очікуваного результату. Суттєво впливають на пониження точності позиціонування нелінійності кінематичних передач (люфти, сухе тертя, зони нечутливості тощо). Значно впливають на точність мікропереміщень теплові та вібраційні збурення. Таким чином, можна зробити висновок про те, що традиційні електромеханічні виконавчі пристрої свої можливості в даному напрямку вичерпали і необхідний перехід на інший технологічний рівень з використанням нових конструктивних рішень.

Серед виконавчих пристроїв нового типу, що не мають вказаних недоліків, використовують магніострикційні, п'єзоелектричні, електромагнітні та теплові перетворювачі. Найбільш поширеними серед них є п'єзоелектричні пристрої, що випереджають всі інші типи за такими показниками, як енергозбереження, мініатюризація та адаптивність до систем управління. Значна увага, що приділяється п'єзоматеріалам та елементам на їх основі, пояснюється рядом їх переваг, а саме: високою надійністю; малими габаритними показниками; стійкістю до впливу агресивного середовища; високою термостійкістю; можливістю використання без додаткових кінематичних зв'язків та ін.

**Аналіз відомих досліджень.** Перспективним напрямком використання п'єзоелектричних приводів є точне настроювання верстатів (нанопозиціонування). Завдяки жорсткій структурі п'єзоприводи є високоефективним інструментом для швидкого та точного настроювання верстата. Рівень сигналу на п'єзопривід позиціонування різального інструменту може бути синхронізований з фазою обертання шпинделя, що дозволить компенсувати, наприклад, відхилення від круглості (огранку) та інші похибки обробки. Крім того, п'єзоприводи можуть бути використані для компенсації вібрації від джерел вимушених коливань. Небажану вібрацію тих вузлів верстатів, коливання яких під час механічної обробки здійснює суттєвий вплив на рівень відносних коливань інструменту і оброблюваної деталі, можливо компенсувати за допомогою п'єзоактуаторів, що працюють в протифазі з вимушеними коливаннями цих вузлів і виконують функцію компенсаторів вібрації. Це, в свою чергу, буде сприяти підвищенню якісних характеристик оброблених деталей, дозволить зменшити знос інструменту та може в тому числі частково зменшити рівень шуму верстата.

Основною складністю забезпечення позиціонування різального інструменту з нано- та мікрометричною точністю є отримання малих переміщень при забезпеченні необхідної для процесу

різання жорсткості передачі. Принципи, за якими можуть бути побудовані пристрої нано- та мікропереміщення, проілюстровані на рисунку 1 [3], де 1 – пружний елемент, що працює на кручення; 2 – пружний елемент, що працює на згин; 3 – передавальний механізм з послідовно з'єднаних пружних елементів меншої та більшої жорсткості, в якому дія малої сили на великому шляху  $X_1$  викликає мале переміщення  $X_2$  жорсткого елемента; 4 – сильфон, що подовжується пропорційно величині підведеного тиску; 5 – мембрана, що деформується з подачею тиску; 6 – стрижень, що деформується внаслідок електричного нагріву; 7 – сильфон, що заповнено рідиною з електропідігрівом; 8 – стрижень, що деформується при зміні напруженості магнітного поля (магнітострикція); 9 – стрижень, що деформується під дією електричної напруги (п'єзоелектричний ефект). Механізми, що використовують вказані принципи, вільні від зовнішнього тертя та зазорів та здатні забезпечити точні переміщення в нано- та мікрометричному діапазонах.

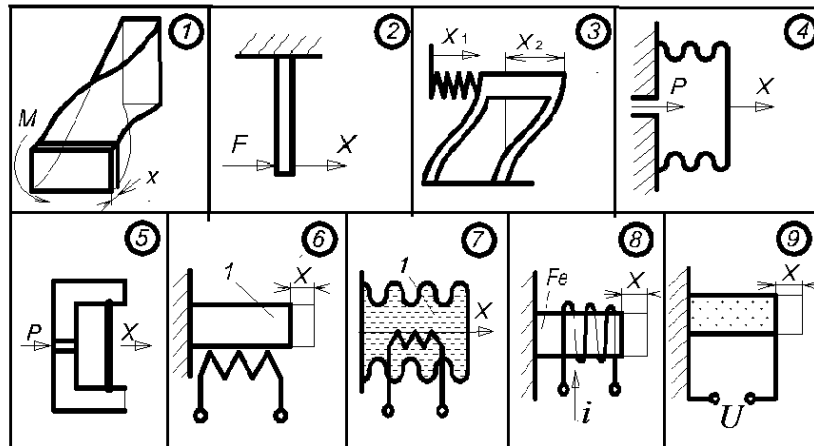


Рис. 1. Основні принципи отримання нано- та мікропереміщень

Перспективними напрямками створення приводів нано- і мікропереміщень є ті, що засновані на використанні п'єзоелектричного і п'єзомагнітного ефектів. Перший ефект полягає в зміні лінійних розмірів окремих матеріалів в електричному, а другий – у зовнішньому магнітному полі. Обидва п'єзоєфекти оборотні. Механічне стискання чи розтягування, що прикладається до поляризованого п'єзокерамічного елемента, викликає зміну дипольного моменту, який, в свою чергу, створює електричну напругу. Так проявляється прямий п'єзоєфект, який використовується в датчиках сили, швидкостей та прискорень.

У п'єзодвигунах використовують зворотний п'єзоєфект, коли при збільшенні електричного або магнітного полів змінюються лінійні розміри матеріалу. Якщо підвести до електродів п'єзоелемента електричну напругу, то в ньому виникає механічне напруження, що призводить до його деформації, тобто, електрична енергія перетворюється в механічну. Це зворотний п'єзоєфект. Причому, при подачі напруги з протилежною напруженню поляризації полярністю елемент стане коротшим та грубшим, а якщо до п'єзокерамічного елемента прикласти напругу, що збігається за полярністю з напруженням поляризації, то елемент подовжиться і стане тонкішим. Якщо прикласти змінну напругу, то елемент буде подовжуватися чи скорочуватися циклічно відповідно до частоти прикладеної напруги. Цей ефект закладено в основу створення п'єзокерамічних двигунів, звукових і ультразвукових генеруючих пристроїв та ін. Для керування п'єзоелементами зазвичай необхідне інтенсивне електричне поле з напруженістю  $E_{\max} = 10^6$  В/м. Джерело напруги у 300-600 В розвиває таку напруженість в пластині товщиною 0,3-1 мм. Абсолютна зміна товщини пластини складе 0,05-0,3 мкм. Приводи, що засновані на п'єзоелектричному ефекті, ефективніші, оскільки нечутливі до дії магнітних полів і мають більш широку сферу застосування [1].

Для збільшення діапазону позиціонування п'єзоелементи об'єднують у більш складні конструкції, які називають п'єзоелектричними актуаторами. Актуатори поділяють на три основні групи: осьові, поперечні та гнучкі чи біморфні. Осьові та поперечні актуатори називають багатошаровими пакетними, оскільки набираються з декількох п'єзоелементів (дисків, стрижнів, пластин, циліндрів чи брусків) в пакет. Пакетна конструкція являє собою набір з окремих п'єзоелементів з металізованими поверхнями, кількість яких може знаходитися в межах від 5 до 200 шт. і визначається необхідним діапазоном переміщень. Біморфна конструкція складається з двох частин – двох п'єзоелементів, з'єднаних між собою, чи п'єзоелемента і металічної пластини, також з'єднаних між собою. Така конструкція використовується для збільшення діапазону лінійних переміщень (до декількох мм) і здійснення кутових переміщень об'єктів незначної маси до декількох градусів. Найпростіша біморфна конструкція являє

собою дві склеєні між собою п'єзоелектричні пластини, напруга керування на які подається таким чином, щоб одна з них скорочувалася, а інша розширювалася.

П'єзодвигун являє собою виконавчий пристрій, що забезпечує лінійне чи кутове переміщення об'єкта керування. Основним елементом п'єзодвигуна є п'єзоактуатор, що працює на зворотному п'єзоєфекті. П'єзодвигуни поділяють на три основні групи: резонансні (ультразвукові) двигуни лінійних та кутових переміщень ударної дії; силові двигуни з обмеженим діапазоном кутових та лінійних переміщень; крокові двигуни, мікроманіпулятори.

Вибір п'єзоматеріалів для п'єзодвигунів здійснюють, в основному, за такими параметрами: п'єзомодуль в напрямку робочих деформацій, модуль Юнга, коефіцієнт електромеханічного зв'язку і механічна добротність. Ці параметри визначають діапазон переміщень, пружні і резонансні властивості, ефективність перетворення електричної енергії в механічну, ступінь згасання коливальних процесів.

При конструюванні п'єзодвигунів враховують недоліки п'єзокераміки: нелінійність, повзучість – запізнення реакції на зміну величини керуючого поля, гістерезис – неоднозначність залежності видовження від напрямку зміни електричного поля (до 5–25 % залежно від матеріалу). Для зменшення впливу гістерезису на точність позиціонування обирають п'єзоматеріали з меншим гістерезисом, а також застосовують системи управління з датчиками положення і зворотним зв'язком. В кожному випадку необхідно враховувати особливості електромеханічного перетворення енергії п'єзодвигунів для нано- і мікропереміщень.

Для позиціонування робочих органів верстатів в нано- і мікрометричному діапазонах найбільше підходять силові двигуни з обмеженим діапазоном кутових та лінійних переміщень. Частотний діапазон обмежений зоною до першого електромеханічного резонансу (до 1000 Гц). Такі пристрої створюють значні зусилля (до 5,0–10,0 кН). До базових конструкцій сучасних силових п'єзодвигунів належать: складена пакетна конструкція; біморфна конструкція; диференціальна конструкція.

Пакетна конструкція будується на основі актуаторів пакетного типу. Жорсткість таких конструкцій дозволяє забезпечити максимально можливі зусилля.

На рисунку 2 представлені варіанти пакетної конструкції п'єзодвигунів [2]. В одному випадку (рис. 2, а) п'єзоелементи і металічні контакти стягнуті один з одним за допомогою болтового з'єднання. Даний варіант має свої переваги: простота виготовлення, можливість розбирання пакету і заміни елементів, що вийшли з ладу. Основним недоліком даної конструкції є необхідність витрат частини отриманої механічної енергії на розтягнення болта, при цьому висота всього пакета змінюється меншою мірою та залежить від жорсткості болта. Цього недоліку можна уникнути, якщо пакет попередньо навантажити за рахунок деформації пружного елемента (рис. 2, б).

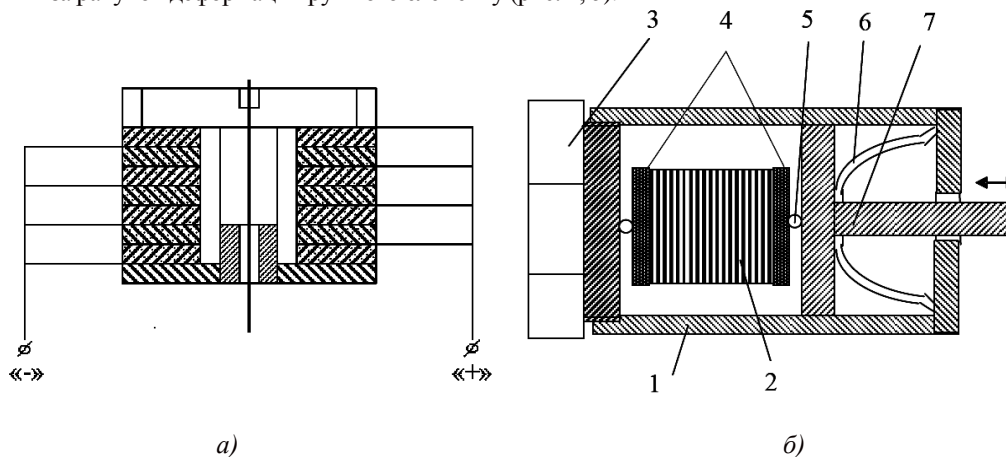


Рис. 2. Пакетні силові п'єзодвигуни з болтовим з'єднанням пластин пакету (а) та з попереднім натягом пакету пружним елементом (б), де 1 – корпус, 2 – п'єзопакет, 3 – гвинт попереднього натягу, 4 – силові прокладки, 5 – шарова опора, 6 – пружний елемент, 7 – шток

Конструктивною основою біморфних двигунів є п'єзоактуатори згинального типу. У диференціальних конструкціях п'єзоактуаторів (рис. 3) одна частина п'єзоелементів працює на стискання, а інша – на розширення, при цьому п'єзоелементи механічно з'єднані так, що їх переміщення складаються за абсолютною величиною. Такі конструкції можуть бути виконані як з окремих п'єзоелементів, так і з їх пакетів, а також з біморфних п'єзоелементів. Диференціальне з'єднання і включення п'єзоелементів дозволяє мінімізувати температурну похибку, яка виникає через теплове розширення елементів конструкції п'єзодвигунів, а також збільшити в два рази діапазон переміщень без

значного збільшення габаритних розмірів і додаткових енерговитрат. На рисунку 3 представлена диференціальна конструкція на елементах пакетного типу. Робочий елемент 2 складається з п'єзоелементів, виконаних у вигляді шайб (дисків), а елемент 3 – з кільця. Обидва елементи закріплені на рухомій основі 1, а елемент 3 своїм другим торцем закріплений на нерухомій основі 4. Вільний торць елемента 2 здійснює робочі переміщення. Керуюча напруга подається одночасно на обидва елементи так, щоб елемент 2 – розширювався, а 3 – стискався. Робоче переміщення щодо нерухомої основи є результатом додавання їх деформації. Теплові деформації будуть відніматися і при точному розрахунку габаритів п'єзоелементів можна добитися повної компенсації температурної похибки.

Одним з напрямків ефективного використання п'єзодвигунів для підвищення точності нано- та мікропозиювання на верстатах є їх використання як приводу спеціального інструментального оснащення з пружними елементами. Створення пружного підвісу різця за допомогою пружних пластин, що виконують функцію пружних напрямних чи шарнірів, забезпечує можливість попереднього навантаження пакету п'єзоелементів за рахунок деформації пружних елементів оснащення, достатній рівень жорсткості положення інструменту при різанні і необхідний діапазон позиювання.

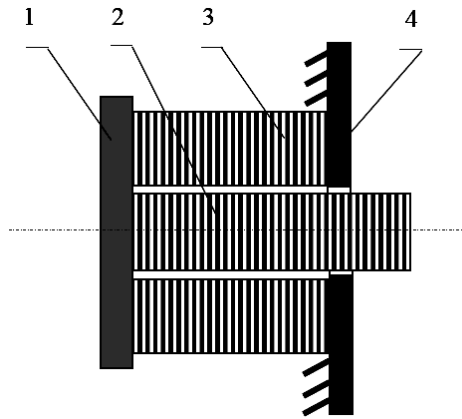


Рис. 3. Диференціальна конструкція п'єзоактуатора

**Основний зміст та результати роботи.** Статична жорсткість різцетримачів з пружними пластинами в основному визначається формою, розмірами та розміщенням пластин відносно вершини різця, а також податливістю та місцем прикладання зовнішнього навантаження від приводу переміщення віджимної частини.

На рисунку 4 наведено картини пружних деформацій віджимних частин різцетримачів з паралельними і перпендикулярними пружними пластинами внаслідок дії сили приводу  $P_{\text{ПР}}$ . Результати розрахунків, що показують зв'язок між товщиною пружних пластин  $h$ , максимальними еквівалентними напруженнями та діючою на віджимну частину силою приводу  $P_{\text{ПР}}$  для різцетримача з паралельними пружними пластинами, наведено в таблиці 1 та представлено графічно на рисунку 5.

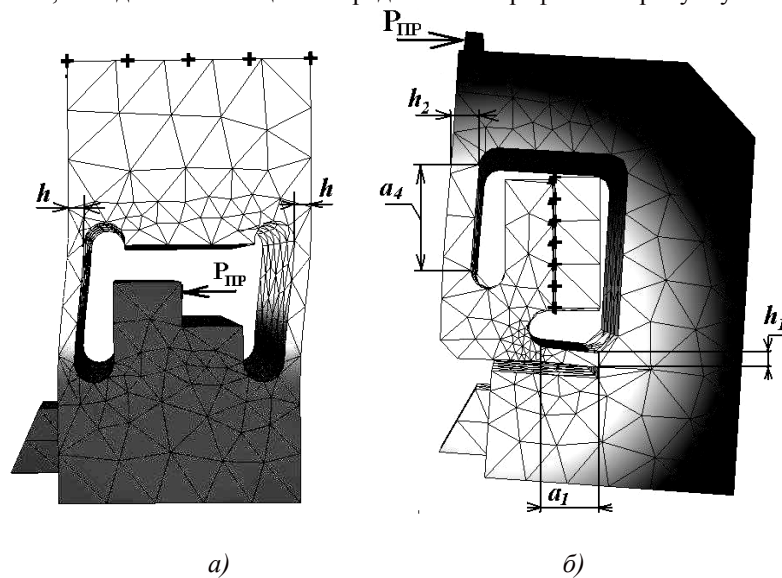


Рис. 4. Пружні деформації віджимних частин різцетримачів з паралельними (а) і перпендикулярними (б) пружними елементами внаслідок дії сили приводу  $P_{\text{ПР}}$

Таблиця 1

$h$ , мм	$P_{\text{ПР}}$ , кН	Максимальне еквівалентне напруження $\sigma_{\text{екв}}$ МПа	Хід вершини різця, мм	Жорсткість $c_y$ , Н/мм
2	0,7	246	0,3	3,79
3	1,97	341	0,301	5,67
4	3,9	491	0,3	12,5
5	6,2	613	0,301	19,48
6	8,9	789	0,302	29,7

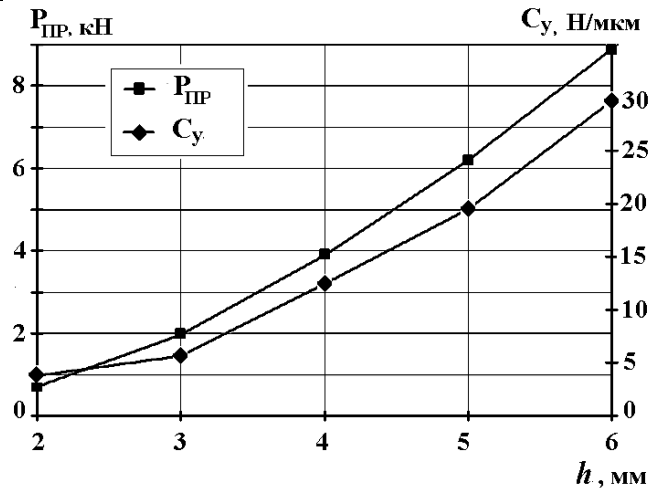


Рис. 5. Розрахунковий графік залежностей жорсткості  $c_y$  віджимної частини різцетримача та необхідної для переміщення вершини різця на 0,3 мм сили приводу  $P_{\text{ПР}}$  від товщини пружних пластин  $h$

Матеріал віджимних частин різцетримачів з пружними елементами необхідно виготовляти з пружинної сталі з відповідною термообробкою. Наприклад, сталь 65Г загартована у воді при  $790 \div 820$  °С із подальшим відпуском при  $360 \div 400$  °С має наступні властивості: HRC  $42 \div 48$ ,  $\sigma_t = 1250$  МПа,  $\sigma_b = 1500$  МПа.

Із врахуванням коефіцієнта запасу допустимі напруження для такого матеріалу становлять  $[\sigma] = 833$  МПа. Таким чином, всі варіанти різцетримачів із таблиці 1 задовольняють умовам міцності. Найбільшу жорсткість в напрямку  $c_y$  має різцетримач з такими параметрами пружних елементів:  $h = 6$  мм,  $a_4 = 28$  мм,  $a_6 = 60$  мм (рис. 4, а). Сила, що необхідна для забезпечення переміщення вершини різця на 0,3 мм (відповідає критичній величині зносу різця), складає  $P_{\text{ПР}} = 8,9$  кН, при цьому максимальні еквівалентні напруження  $\sigma_{\text{екв}} = 789$  МПа, що є меншими за допустимі. Обмеженням для використання пружних елементів такої товщини можуть бути габаритні розміри приводу, що повинен забезпечити відповідну силу для деформації пружних елементів.

Результати розрахунків, що показують зв'язок між товщинами  $h_1$  і  $h_2$  та довжинами  $a_1$  і  $a_4$  пружних пластин із врахуванням співвідношення  $a_4/a_1 = h_2/h_1 = 1,5$  (рис. 4, б) та діючою на віджимну частину силою приводу  $P_{\text{ПР}}$  для різцетримача з перпендикулярними пружними пластинами, представлені графічно на рисунку 6.

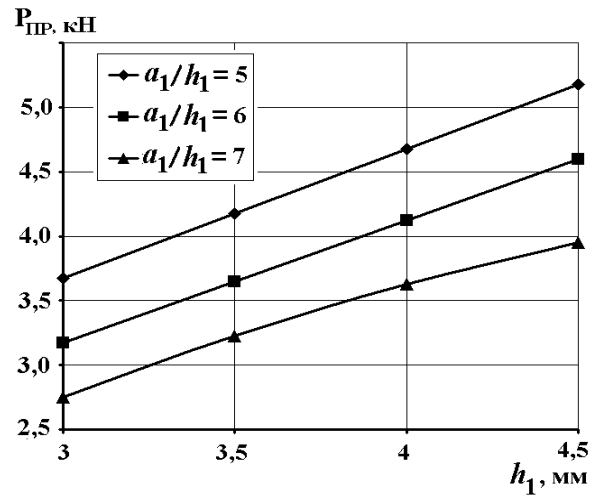


Рис. 6. Розрахунковий графік залежності необхідної для переміщення вершини різця на 0,3 мм сили приводу  $P_{\text{ПР}}$  від товщини  $h_1$  і  $h_2$  та довжини  $a_1$  і  $a_4$  пружних пластин

Аналіз результатів розрахунків необхідної для переміщення вершини різця на 0,3 мм сили приводу  $P_{\text{ПР}}$  показав, що при збереженні співвідношень параметрів пластин діапазоні  $a_4/a_1 = h_2/h_1 = 1,5 \div 2,5$  зміна товщин  $h_1$  і  $h_2$  та довжин  $a_1$  і  $a_4$  незначно впливає на зміну величини  $P_{\text{ПР}}$ .

Результати розрахунків, що визначають вплив геометричних розмірів пружних пластин різцетримачів, таких як товщина, довжина та ширина, на жорсткість віджимної частини різцетримача з різцем в зоні дії сили різання із врахуванням податливості приводу  $e_n$  віджимної частини, наведені в [2].

Визначення статичних характеристик пружних частин різцетримачів та необхідної сили приводу для позиціонування інструменту дозволяє встановити вимоги для конструювання п'єзодвигунів, що здатні забезпечити нано- та мікропозиціонування різального інструменту в заданому діапазоні.

**Висновки.** Таким чином, різцетримачі з пружними пластинами, оснащені п'єзоприводами, можуть ефективно використовуватись для нано- та мікропозиціонування різального інструменту. При цьому навантаження пакета п'єзоелементів здійснюється за рахунок деформації пружних пластин оснащення. Така конструкція інструментального оснащення верстата може забезпечити достатній рівень жорсткості положення інструменту при різанні і необхідний діапазон та точність його позиціонування.

#### Список використаної літератури:

1. Исполнительные устройства и системы для микроперемещений : учеб. пособие / А.А. Бобцов, В.И. Бойков, С.В. Быстров и др. – С.-Пб. : ГУ ИТМО, 2011. – 131 с.
2. Шевченко О.В. Використання методу скінченних елементів для визначення статичних характеристик різцетримачів з пружними пластинами / О.В. Шевченко // Вестник НТУУ "КПІ" / Машиностроение. – Вып. 49. – К., 2006. – С. 107–111.
3. Шевченко О.В. Підвищення точності обробки на токарних автоматизованих верстатах шляхом мікрорегулювання положення різця / О.В. Шевченко, Т.Г. Гримуд // Вісник НТУУ "КПІ" / Машинобудування. – Вып. 59. – К., 2010. – С. 59–64.

ШЕВЧЕНКО Олександр Віталійович – доктор технічних наук, професор, НТУУ "Київський політехнічний інститут", кафедра конструювання верстатів та машин.

Наукові інтереси:

– розробка основ проектування інструментального оснащення з пружними напрямними та орієнтованою жорсткістю для мікрорегулювання різального інструменту, вібраційної обробки та зменшення інтенсивності автоколивань в процесі різання.

Тел.: (044) 454–94–56.

E-mail: [o.shevchenko@kpi.ua](mailto:o.shevchenko@kpi.ua)

МАНЗЮК Сергій Анатолійович – аспірант НТУУ "Київський політехнічний інститут", кафедра Конструювання верстатів та машин.

Наукові інтереси:

– дослідження пристроїв нано- та мікропереміщення для ультрапрецизійної обробки на верстатах.

Тел.: (096) 411–22–23.

E-mail: [s.a.manzyuk@gmail.com](mailto:s.a.manzyuk@gmail.com)

Стаття надійшла до редакції 30.10.2013

**Шевченко О.В., Манзюк С.А.** Використання приводів нано- та мікропереміщень при ультрапрецизійній обробці на верстатах

**Шевченко А.В., Манзюк С.А.** Использование приводов нано- и микроперемещений при ультрапрецизионной обработке на станках

**Shevchenko O.V., Manzyuk S.A.** Using of piezoengine for nano - and micromovings at ultraprecision processing on machine tools

УДК 621.91.01

**Использование приводов нано- и микроперемещений при ультрапрецизионной обработке на станках / А.В. Шевченко, С.А. Манзюк**

В статье приведены результаты исследований эффективности использования инструментальной оснастки с упругими направляющими, оснащенной пьезоприводами для нано- и микроперемещений. Использование упругой подвески резца при помощи упругих пластин, которые выполняют функцию упругих направляющих или шарниров, обеспечивает возможность предварительного нагружения пакета пьезоэлементов за счет деформации упругих пластин оснастки, достаточный уровень жесткости положения инструмента при резании и необходимый диапазон позиционирования. Определены статические характеристики упругих частей резцедержателей и необходимые силы привода для позиционирования инструмента, которые дают возможность установить требования при конструировании пьезопривода для обеспечения нано- и микропозиционирования режущего инструмента в заданном диапазоне. Результаты исследований получены с использованием метода конечных элементов.

**Ключевые слова:** упругие направляющие, пьезопривод, нано- и микроперемещения.

УДК 621.91.01

**Using of piezoengine for nano - and micromovings at ultraprecision processing on machine tools / O.V. Shevchenko, S.A. Manzyuk**

In article the results of researches of the efficiency of use of tool equipment with elastic guides, equipped by piezoelectric actuator for nano - and micromovings are resulted. Use of elastic installation of a cutter by means of elastic plates which execute function of elastic guides or joints, ensures possibility of preliminary loading of a package of piezoelectric elements at the expense of a strain of elastic plates of equipment, sufficient level of stiffness of the cutting tool at processing and a necessary range of positioning. Static characteristics of elastic parts of toolholders and necessary forces of a piezoelectric actuator for positioning of the tool which give the chance to establish requirements for designing of piezoelectric actuator for maintenance nano - and micromovings of the cutting tool in the set range are defined. Results of researches are received with use of finite-element method.

**Keywords:** elastic guides, piezoelectric actuator, nano - and micromovings.