

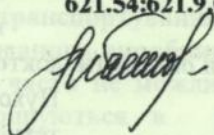
Севастопольський державний технічний університет

Пашков Євген Валентинович

УДК 621:65.011.56:

621.9.048.6:

621.54:621.9.02



**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ТА СИНТЕЗ СИСТЕМ
АВТОМАТИЗОВАНОГО ВІБРОЛЕВІТАЦІЙНОГО
ТОЧІННЯ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ
ДЕТАЛЕЙ**

Спеціальність 05.13.07-

Автоматизація технологічних процесів

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеню

доктора технічних наук

Севастополь

1997

281.5

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00751757 (W)

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у департаменті автоматизації технологічних процесів та виробництв Севастопольського державного технічного університету Міністерства освіти України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор

Копп Вадим Якович, директор департаменту приладобудування Севастопольського державного технічного університету.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук

Пуховський Євген Степанович, професор кафедри технології машинобудування Національного технічного університету "Київський політехнічний інститут";

доктор технічних наук, професор

Ткачев Віктор Васильович, зав. кафедрою автоматизації виробничих процесів Національної гірничої академії України;

доктор технічних наук

Торлін Вадим Миколайович, професор департаменту систем автоматизованих виробництв Севастопольського державного технічного університету.

Провідна організація: Чорноморський науково-дослідний інститут технології суднобудування.

Захист відбудеться "18" 12 1997р. о 14 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д11.03.01 при Севастопольському державному технічному університеті за адресою: 335053, Севастополь, Стрілецька балка, Студмістечко, СевДТУ.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці СевДТУ.

Автореферат розісланий "17" 11 1997р.

Вчений секретар спеціалізованої вченої ради канд. техн.наук, доцент

О.М. Шерпєвський

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність роботи. Вирішення проблеми зниження металосмкості виробів у поєднанні, як правило, з вимогами поліпшення точносних характеристик і функціональних параметрів, призвело до появи зростаючого числа деталей, що входять у ці вироби, які характеризуються як нежорсткі, одну із основних груп яких складають тонкостінні циліндричні деталі (ТЦД), що одержують переважно точінням.

Накопичений досвід показує, що традиційні способи обробки точінням, завантаження-розвантаження і транспортування ТЦД недостатньо ефективні в умовах автоматизованого виробництва, а їх об'єднання у єдину технологічну систему часто не можливе. На практиці питання виготовлення ТЦД вирішуються в умовах використання ручного завантаження-розвантаження технологічного устаткування, введенням багатопрохідного точіння, зниженням режимів різання, застосуванням складних, таких що тяжко піддаються автоматизації технологічних прийомів, що малопродуктивно і неекономічно.

Найбільш перспективним напрямком рішення проблеми виготовлення ТЦД є перехід до безконтактної технології.

Як безконтактну обробку можна розглядати імпульсне вібраційне точіння, оскільки із збільшенням частоти коливань інструменту силові і теплові впливи на деталь, що обробляється прагнуть до нуля.

Пошук шляхів підвищення точності і продуктивності обробки, що базуються на розкритті закономірностей поведження ТЦД, що знаходяться в стані левітації (паріння) та під імпульсним впливом з боку ріжучого інструменту, здійснюючого коливання, удосконалення існуючих та розробка прогресивних засобів автоматизації і методів керування основними та допоміжними операціями, зв'язаними з виготовленням таких деталей – актуальна проблема у галузі автоматизації технологічних процесів.

Зв'язок дисертації з науковими програмами, планами, темами

Робота виконувалася у складі госпдоговірних та таких, що фінансуються держбюджетних НДР департаменту автоматизації технологічних процесів і виробництв Севастопольського державного технічного університету: г/д №№ 764, 848, 1/848, 953, 886, 1067, 1074, 1120, 1161; д/б – "Комплекс", КАМП-1, КАМП-2, "Вібroleвітація". Перелічені НДР входили до складу комплексних програм МВ ССО УРСР та АН СРСР "Роботи і робототехнічні системи та "Праця" до програм НДР Міносвіти України на 1991-96 р.р., а зараз входять до

ДНБ ім. В. Стефанука
АН УРСР

координаційного плану міжвузівських що фінансуються НДР Міносвіти України на 1997-99 р.р. по тематиці "Високоєфективні технологічні процеси у машинобудуванні".

Мета дисертаційної роботи

Метою роботи є створення теоретичних основ і технічних засобів віброрелітаційного точіння в умовах комплексно автоматизованого виробництва, що сприяють досягненню необхідних точносних характеристик ТЦД.

Для досягнення поставленої мети необхідно:

розкрити механізм утворення відхилень форми деталей при різноманітних схемах закріплення і способах обробки;

установити можливості оцінки пружнодеформованого стану деталей у процесі транспортування, завантаження-розвантаження і обробки;

обґрунтувати принципи обробки точінням, транспортування, завантаження-розвантаження з застосуванням вібрації та левітації, та розробити на їх основі відповідні функціональні пристрої, поєднані конструктивно та технологічно;

розробити технологічні методи та засоби цілеспрямованого формування пружнодеформованого стану деталей з використанням негармонічних коливань інструменту;

математично описати процеси точіння з застосуванням керованих негармонічних (бігармонічних та пиловидних) коливань інструменту, а також процеси захвату і удержання левітуючих деталей при безконтактному транспортуванні та маніпулюванні;

встановити закономірності автоматичного забезпечення стійкого процесу формоутворення деталей.

Наукова новизна

1) Вперше запропонована концепція автоматизованої віброрелітаційної імпульсної обробки точінням ТЦД, заснована на використанні негармонічних керованих коливань інструменту та безконтактному методі базування.

2) Доведена можливість не тільки повного усунення радіальних деформацій оброблюваних деталей, але і зміни їх знаку на протилежний.

3) Одержала подальший розвиток концепція безконтактних гнучких автоматизованих виробництв, яка заснована на використанні безконтактних механізмів на всіх стадіях технологічного процесу.

4) Показана можливість зміни пружнодеформованого стану об'єктів обробки без зміни настроювального положення виконавчих органів технологічного обладнання.

5) Розроблені моделі процесів взаємодії різального інструменту, що здійснює радіальні негармонічні коливання, з деталями при контактному та безконтактному базуванні.

6) Розроблена модель безконтактного ТЦД з немагнітних матеріалів у процесі транспортування та маніпулювання.

Практичне значення та реалізація одержаних результатів. На основі створених математичних моделей розроблена нова автоматизована технологія ТЦД, що дозволяє підвищити точність форми розмірів при мінімізації енергетичних витрат. Створені оригінальні пристрої для транспортування, маніпулювання та обробки, які згуртовані єдиним конструктивно-технологічним підходом. Розроблені алгоритми і програми розрахунку пристроїв, що використовуються на всіх стадіях реалізації технології обробки ТЦД.

Основні технічні рішення захищені 68-и авторськими свідоцтвами та патентами.

Результати виконаної роботи знайшли відображення у 3-х навчальних посібниках, виданих з грифом Міністерства України у 1987, 1992 і 1997 р.р., що використовуються при навчанні студентів у СевДТУ та інших вузах України за спеціальностями автоматизація виробничих процесів, технологія машинобудування, приладобудування, металорізальні верстати та інструменти.

Промислове впровадження результатів роботи здійснено у НВО "Комплекс" (м. Новгород, Росія), в ВНДІ Електроапарато-будування (м. Харків), на заводі "Фіолент" (м. Сімферополь), у ВО "Фотон" (м. Сімферополь) у складі роботизованих технологічних комплексів з загальним економічним ефектом понад 650 тис. карбованців (по курсу до 1990 р.), а також на ряді інших підприємств колишнього СРСР.

Апробація результатів дисертації. Результати роботи доповідалися і обговорювалися на наступних науково-технічних конференціях, семінарах та нарадах: "Наукові основи технології і прогресивні технологічні процеси у машино- та приладобудуванні" (м. Москва, 1970); "Розрахунок, конструювання та дослідження устаткування виробництва джерел струму" (м.м. Москва-Одеса, 1970); "Прогресивні технологічні процеси у машинобудуванні" (м. Київ, 1971 р.); "Автоматизація виробничих процесів у машино- та приладобудуванні" (м. Волгоград, 1971); "Роботи-маніпулятори для автоматизації ручних та допоміжних робіт" (м. Ленінград, 1972); "Автоматизація та

обчислювальна техніка в управлінні виробництвом" (м. Оренбург, 1974); "Оптимізація управління прогресивними технологічними процесами у машинобудуванні" (м. Єреван, 1980); "Робототехнічні системи" (м. Київ, 1980); "Заміна ручної праці машинною на базі промислових роботів і маніпуляторів" (м. Севастополь, 1981); "Прогресивна технологія і автоматизація технологічних процесів у машинобудуванні та приладобудуванні" (м. Ленінград, 1982); "Прогресивні технологічні процеси та устаткування для опорядження труб" (м. Челябінск, 1983); "Технологічне управління триботехнічними характеристиками вузлів машин" (м. Москва, 1983); "Технологічне забезпечення автоматизації виробничих процесів" (м. Оренбург, 1983); "Розробка та впровадження прогресивних технологічних процесів та обладнання складально-монтажного виробництва" (м. Ленінград, 1984); "Верстати з числовим програмним управлінням і гнучкі автоматизовані металооброблювальні комплекси" (м. Новгород, 1985), "Прогнозування та обґрунтування точності механічної обробки деталей" (м. Севастополь, 1986, 1987); "Підвищення продуктивності та якості продукції в умовах гнучкої автоматизації машино- та приладобудування" (м. Севастополь, 1988); "Проблеми автоматизації переналажувальних виробництв у машинобудуванні" (м. Волгоград, 1988); "Прогресивна технологія машинобудування" (м. Дніпропетровськ, 1992); "Автоматика-96" (м. Севастополь, 1996).

Публікації. Результати досліджень відбиті у 3-х монографіях (навчальних посібниках), у 15-ти статтях у наукових журналах та збірках наукових праць, у 2-х брошурах товариства "Знання", у 15-ти працях конференцій, семінарів та нарад і у 68-ми авторських свідоцтвах та патентах.

Структура та обсяг роботи

Дисертаційна робота складається із вступу, п'яти розділів, висновків, списку джерел, що використовувалися з 248 найменувань і додатків. Загальний обсяг роботи – 438 сторінок, в тому числі 130 рисунків і 27 таблиць.

ОСНОВНА ЧАСТИНА РОБОТИ

У введенні розкрита важливість обраної проблеми, обґрунтована актуальність теми, визначена мета та завдання досліджень, наведені основні положення, що відбивають наукове та практичне значення роботи.

У першому розділі проведено аналіз методів та засобів автоматизованої обробки точіння ТЦД, що становлять замкнуті плоскі

криволінійні стержні, у яких радіус кривизни r у 8...10 разів переважає товщину стінок h . При $r/h \geq 100$ тонкостінні циліндричні деталі відносяться до оболонок.

Основною причиною виникнення погрішностей форми і розмірів ТЦД внаслідок точіння є їх неспроможність внаслідок малої радіальної жорсткості протистояти дії зовнішніх сил не тільки на стадії формоутворення, але і на стадіях, транспортування, завантаження–розвантаження (маніпулювання).

Збільшення жорсткості елементів системи ВПІД у напрямку дії зовнішніх сил і, в першу чергу, радіальної складової сили різання, сприяє підвищенню точності обробки, однак відомі контактні способи, що застосовуються для цього та технічні засоби викликають деформування деталей, переносять теплові та силові деформації верстату і пристрою на деталь, і не можуть бути використані для усунення деформацій, що виникають на стадіях зберігання, транспортування, завантаження–розвантаження в умовах автоматизованого виробництва.

Способи точіння, засновані на використанні традиційних підходів, а також на збільшенні жорсткості за допомогою додаткового технологічного оснащення або на управлінні пружнодеформованим станом об'єктів обробки, не дозволяють уникнути погрішностей їх форми і розмірів, конструктивно складні, метало- та енергоємні, а також неефективні в умовах комплексно автоматизованого виробництва з причини затримування росту продуктивності та гнучкості.

Вібраційне точіння з застосуванням гармонійних коливань різального інструменту, у т.ч. ультразвукових, створюючи передумови для автоматизації виробництва та умови підвищення фіктивної жорсткості об'єктів обробки внаслідок зменшення радіальної складової сили різання, дозволяє зменшити більш, ніж у 10 разів деформації останніх, проте сприяти повному їх усуненню не може.

За конструктивними особливостями та характером взаємодії затискних елементів з базовими поверхнями оброблюваних деталей існуючі верстатні затискні пристрої можуть бути об'єднані у три групи: пристрої з зосередженими зусиллями затиску; пристрої з розподіленими по колу зусиллями затиску; пристрої з осьовим затиском.

Технологічне устаткування, засноване на застосуванні безконтактних, в тому числі аеростатичних опор, забезпечує підвищення

точності обробки, а існуючі методики розрахунку та конструктивне рішення опор можуть використовуватись стосовно умов обробки, операціям завантаження-розвантаження та транспортування ТЦД з урахуванням вагогабаритних та міцнісних характеристик останніх.

В умовах детермінованого виробництва, з урахуванням вагогабаритних параметрів ТЦД та з метою забезпечення конструктивного поєднання з основним технологічним оснащенням, автоматизацію завантаження-розвантаження та транспортування доцільно здійснювати з допомогою пневматичних роботів та транспортних засобів, створюючих умови безконтактного захвату, утримання, переміщення і базування.

Сформульована мета і завдання досліджень, що базуються на результатах аналізу технологічних особливостей обробки ТЦД в умовах комплексно автоматизованого виробництва.

В другому розділі, присвяченому технологічним аспектам автоматизованої обробки точінням ТЦД, на основі аналізу погрішностей обробки та причин їх виникнення показано, що такими є погрішності установки деталей і динамічної настройки розмірних і кінематичних ланцюгів системи ВПІД.

Показано, що із всього балансу переміщень у цьому ланцюгу найбільшу величину, при відносно високій жорсткості інструменту, шпінделя і його опор, корпусу, настановних та затискних елементів, стиків заготовка-затискні елементи - приводний (розтискний) елемент, мають переміщення, які пов'язані з пружними деформаціями тонкостінної заготовки (деталі) силами затиску та радіальної сили, що складає сили різання.

У загальному обсязі засобів технологічного оснащення велику частку мають верстатні пристрої, призначені для установки і закріплення деталей, що обробляються, а також прилади для зміни статичних та динамічних характеристик системи ВПІД (або її підсистем) (рис. 1). Підсистема пристрій-деталь (ПД), є найбільш слабкою ланкою стосовно жорсткості, яка залежить від способу силового впливу на деталь затискними елементами пристроїв та виявляє превалюючий вплив на точність форми і розмірів.

У одних випадках для забезпечення необхідної якості обробки необхідно і достатньо застосування тільки затискних пристроїв. У інших випадках необхідне застосування додаткових пристроїв, що поліпшують статичні та динамічні характеристики системи ВПІД, або її підсистем.

Цьому сприяє застосування пристроїв, які призначені для збільшення жорсткості підсистем, що входять до їх складу (наприклад, підсистеми пристрій-деталь), а також застосування пристроїв для

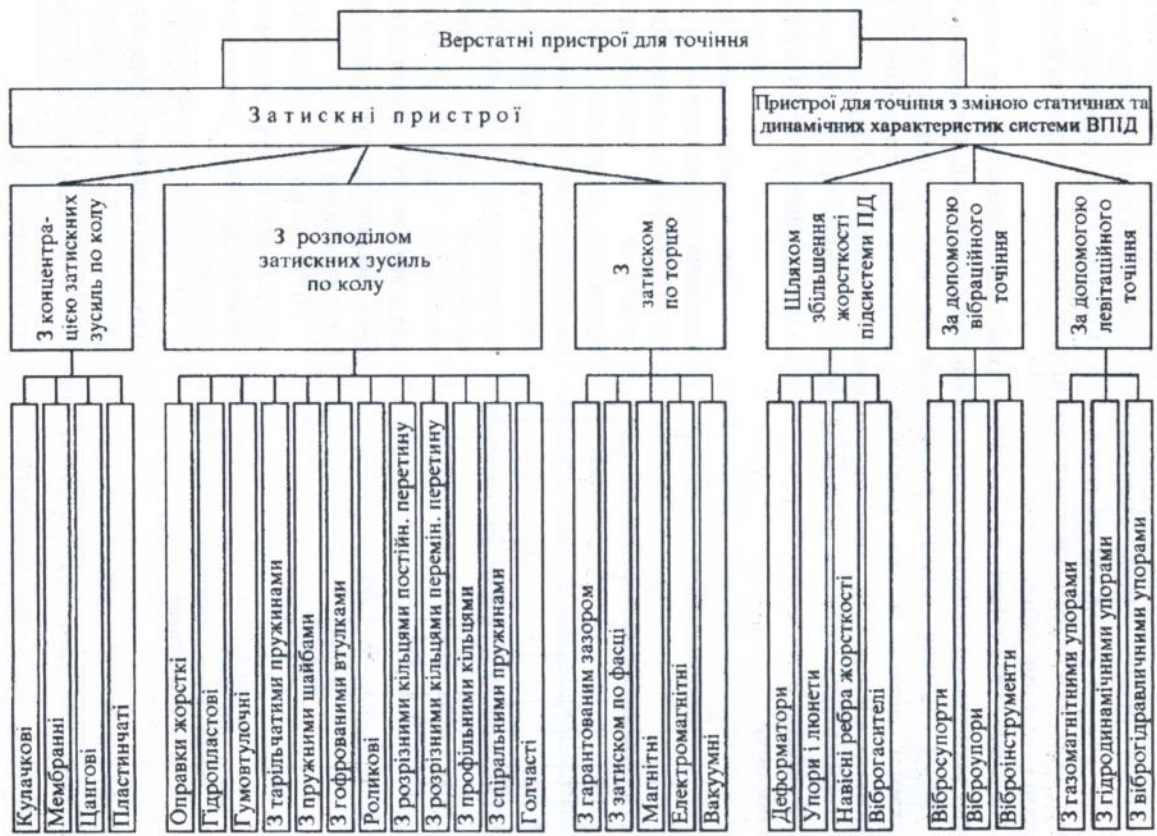


Рис. 1. Класифікація верстатних пристроїв для обробки ТЦД

вібраційного та левітаційного точіння, що змінюють умови роботи рухомих з'єднань у складі системи.

Надано методики розрахунку пружних деформацій ТЦД різного класу і при різних схемах закріплення і зміні пружнодеформованого стану деталей, а також від дії радіальної складової сили різання P_y , в основу яких покладено чисельне співвідношення радіусу серединної поверхні і товщини стінки.

На відміну від схеми закріплення і обробки кілець і втулок, коли зусилля затиску і радіальна складова діють практично в одній площині, і при цьому зусилля затиску розподілені по всій базовій поверхні закріпленої деталі, а дія радіальної складової P_y сприймається затискними елементами, схеми закріплення і обробки стаканів і гільз характеризуються тим, що поперечні перерізи, у яких діють зазначені сили, рознесені в осьовому напрямку і співпадають лише на початку і у кінці обробки.

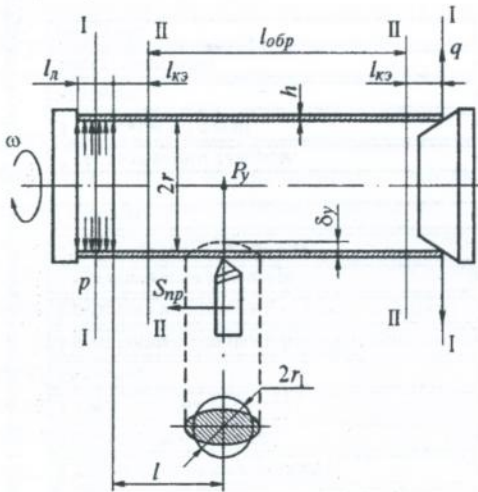


Рис. 2. Визначення прогибу тонкостінної гільзи при дії радіальної складової сили різання

При обробці гільз по зовнішній поверхні з використанням затискних пристроїв, утворюючих відповідно, локальний тиск p та кільцеву силу q , діючих у перетинах I-I (рис. 2), межі розповсюдження впливу крайового ефекту, який викликано дією цих сил знаходяться у перетинах II-II, віддалених на відстань $l_{кр}$ від перетинів I-I.

Після обробки гільз по всій довжині та зняття зусиль затиску, ділянки довжиною $(l_{кр} + l_d/2)$ і $l_{кр} \geq 2,33\sqrt{rh}$ будуть мати менший діаметр,

на відміну від ділянки довжиною $l_{обр}$.

Відомо, що при $l \geq 1,29\sqrt{r/h}$ і $r/h \geq 100$ максимальна величина деформації від дії P_y при защемлених або опертих кінцях гільзи

$$\delta_y = P_y \left[l^3/6r^3 + 1,7(r/h)^{3/2} \right] / [\pi E h],$$

де E – модуль пружності матеріалу гільзи.

З достатньою для практичних цілей точністю можна вважати, що зона деформації має форму кола з радіусом $r_1 \approx 2,33\sqrt{rh}$, тобто кордони зони залежать від величини розповсюдження крайового ефекту.

При закріпленні і обробці тонкостінних кілець і втулок у пристроях з зосередженими зусиллями затиску максимальна величина деформації, що спостерігається у перетині між сусідніми затискними елементами,

$$\delta_{\max} = \delta_2 + \delta_3 = k_2 P_3 r^3 / (EJ_z) + k_3 P_y r^3 / (EJ_z),$$

де δ_2 – деформація від зусиль затиску P_3 ; δ_3 – деформація від дії радіальної складової сили різання P_y ; k_2, k_3 – коефіцієнти, що визначаються з табл. 1.

Для забезпечення заданої точності форми необхідно, щоб виконувалася умова $\delta_{\max} \leq \Delta$, де Δ – допуск форми циліндричної поверхні.

Максимально допустиме значення P_y , при якому забезпечується одержання необхідної точності форми з урахуванням допуску Δ , визначається з умови

$$P_y \leq \Delta (h/r)^3 / B_0,$$

де $B_0 = (187,5k_2/n + 12k_3) / (Eb_0)$, м/Н; n – число затискних елементів; b_0 – ширина деталі.

Значення коефіцієнту B_0 залежно від числа затискних елементів n , коефіцієнтів k_2 та k_3 при $b_0 = 0,01$ м наведені у табл. 1. При визначенні допустимого значення P_y для деталей шириною $b_i > b_0$, замість значення B_0 , вибраного з табл. 1, використовується відношення B_0/C_1 , де $C_1 = b_i/b_0$ – безрозмірний коефіцієнт.

Таблиця 1

Значення коефіцієнтів k_2, k_3 і B_0 для визначення
максимально допустимої величини P_y

Кількість затискних елементів, n	2	3	4	6	8	
Коефіцієнт, k_2	0,0685	0,0141	0,005	0,0016	0,001	
Коефіцієнт, k_3	0,154	0,034	0,0246	0,0144	0,0098	
$B_0 \times 10^{-9}$, м/Н	сталь	3,996	0,58	0,26	0,1	0,07
	латунь	8,41	1,22	0,54	0,22	0,13
	алюміній	11,64	1,69	0,74	0,3	0,186

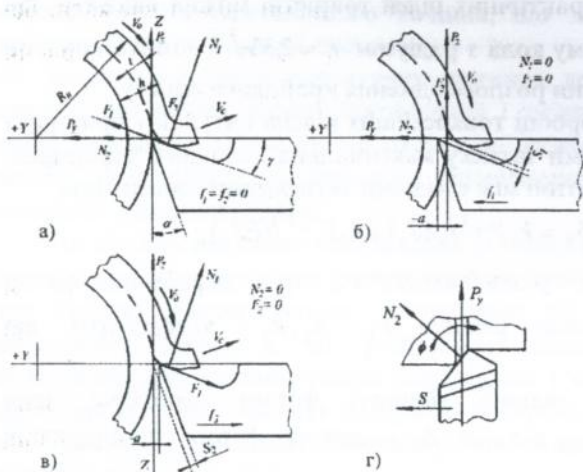


Рис. 3. Схема сил, які діють на деталь при точінні з коливаннями різця у напрямку P_y

У третьому розділі відображені дослідження, які пов'язані з розробкою теоретичних основ вібролевітаційного точіння ТЦД.

Особливість механізму точіння з використанням негармонійних коливань, показана на рис. 3, міститься в тому, що створюються умови, які забезпечують появу ефекту

вібротранспортування східної стружки по передній поверхні різця як у напрямі її сходу, так і у зворотному напрямі, що перешкоджає сходу.

При звичайному точінні, тобто без вібрацій $f_1 = f_2 = 0$ (рис. 3, а). Надання різцю коливань уздовж осі Y з частотою підводу до деталі f_1 , більшої, ніж частота відводу від деталі f_2 , викликає зміну схеми дії сил у зоні різання. При підводі відбувається відрив передньої поверхні різця від стружки на величину S_1 (рис. 3, б), $N_1 = 0, F_1 = 0$. При відводі різця з утворенням зазору $N_2 = 0, F_2 = 0$ (рис. 3, в).

Збільшення часу відвода Δt_2 у порівнянні з часом підводу Δt_1 , дозволяє забезпечити рівність імпульсів P_y при русі різця на деталь і у зворотному напрямі, тобто

$$\vec{N}_2 \cos \phi \Delta t_1 = \vec{F}_1 \cos \gamma \cos \phi \Delta t_2 + \vec{N}_1 \sin \gamma \cos \phi \Delta t_2,$$

де $F_1 = N_1 f_{TP}$ - сила тертя, що створюється відносним переміщенням стружки і передньої поверхні різця; f_{TP} - коефіцієнт тертя; $N_1 = P_z / \cos \gamma$, $N_2 = P_y / \cos \phi$ - нормальні сили; P_z - тангенціальна складова сили різання.

При рівності лівої і правої частин даного рівняння стінка деталі у зоні різання не зазнає деформацій від дії P_y .

Процес поведінки тонкостінної деталі у зоні різання описується рівнянням з імпульсною правою частиною, що має вигляд

$$m \frac{d^2 \delta_2(t)}{dt^2} + c \frac{d\delta_2(t)}{dt} + k\delta_2(t) = P'_y(t);$$

$$P'_y(t) = \begin{cases} N_2 \cos \varphi, \dot{\delta}_1(t) > (-V) + \dot{\delta}_2(t); \\ -(|F_1| \cos \varphi \cos \gamma + N_1 \sin \gamma \cos \varphi), \dot{\delta}_1(t) \leq (-V) + \dot{\delta}_2(t), \end{cases}$$

де $m = \pi r_1^2 h \gamma_m = 2,33 \pi \gamma_m h \sqrt{r h}$ - маса коливальної зони деформації (рис. 2); γ_m - питома вага матеріалу деталі; $c = 2k / \omega_\partial$ - коефіцієнт демпфірування; $\omega_\partial = \sqrt{k/m}$ - частота власних коливань деталі; $k = P_y / \delta_2$; $\delta_2(t)$ - жорсткість деталі у зоні різання; $\delta_2(t)$ - прогнуття стінки деталі у зоні різання; $P'_y(t)$ - радіальна складова сили різання при наявності вібрації; $|F_1|$ - модуль сили тертя стружки об передню поверхню різця; $\dot{\delta}_1(\tau)$ - швидкість вібраційного руху різця; $\dot{\delta}_2(t)$ - швидкість руху стінки деталі, яка зазнає деформації; V - швидкість різання; t - час.

Переміщення різця, здійснюючого бігармонічні коливання, визначаються за допомогою виразу

$$\delta_1(t) = \begin{cases} \delta_1'(t) = a \sin(\omega_1 t + \varphi_1), \dot{\delta}_1(t) \geq 0; \\ \delta_1''(t) = a \sin(\omega_2 t + \varphi_2), \dot{\delta}_1(t) < 0, \end{cases}$$

де a - амплітуда коливань різця; $\omega_1 = 2\pi f_1$, $\omega_2 = 2\pi f_2$ - кругові частоти коливань при прямому і зворотному рухах різця ($\omega_1 > \omega_2$); f_1, f_2 - частоти коливань різця, відповідні $T_1 = 1/f_1$ та $T_2 = 1/f_2$; φ_1 та φ_2 - фазові зміщення коливань.

Графічне зображення переміщення і швидкості різця має вигляд, показаний на рис. 4, а, б,

де $t_1 = T_1 / 2 = \pi / \omega_1$; $t_2 = t_1 + t_{1,2} = \pi [(\omega_1 + \omega_2) / \omega_1 \omega_2]$.

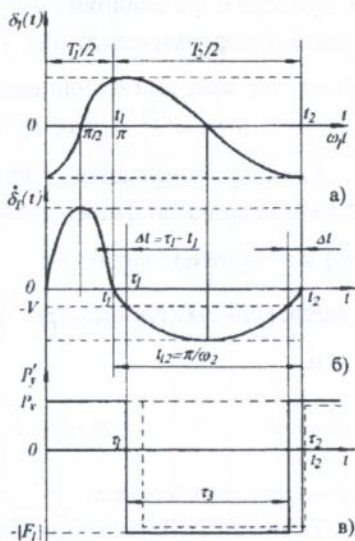


Рис. 4. Діаграми переміщення різця при точінні с бігармонійними коливаннями

Швидкість $(-V)$ нанесена штриховою лінією на графік $\delta_1(t)$. Точка з координатами $[(-V), \tau_1]$ визначає зміну знаку і величини $P'_y(t)$. Графік змін $P'_y(t)$ має вигляд, показаний на рис. 4, в.

Внаслідок того, що фазовий зсув не впливає на прогнуття, графік $P'_y(t)$ може бути для зручності математичного опису зміщений уздовж осі праворуч на величину Δt . Використовуючи цей графік і одиничні функції Хевісайта, вираз для $P'_y(t)$ на одному періоді $\tau_2 = 2T$, позначений як $P(t)$, приводиться до вигляду

$$P(t) = P_y \cdot 1(t) - (|F_1| + P_y) \cdot 1(t - \tau_1) + |F_1| \cdot 1(t - \tau_2),$$

Вихідне диференціальне рівняння з урахуванням періодичності функції $P(t)$ у операторній формі при нульових початкових умовах $\delta_2(t) = 0$ та $\dot{\delta}_2(t) = 0$ приймає вигляд

$$mp^2\delta_2(p) + cp\delta_2(p) + k\delta_2(p) = \left[P_y - (|F_1| + P_y)e^{-\tau_1 p} + |F_1|e^{-2T p} \right] \left[(1 - e^{-2T p}) p \right],$$

звідки

$$\delta_2(p) = \frac{P_y - (|F_1| + P_y)e^{-\tau_1 p} + |F_1|e^{-2T p}}{(mp^2 + cp + k)(1 - e^{-2T p}) p},$$

де p - оператор Лапласа.

Точне аналітичне визначення $\delta_2(t)$ викликає значні труднощі, тому завдання вирішується наближено. Функції $e^{2T p}$ і $e^{\tau_1 p}$ розкладаються у степеневий ряд і вираз для $\delta_2(p)$ приводиться до вигляду

$$\delta_2(p) = (a_2^0 p^2 + a_1^0 p + a_0^0) / [(p^2 + b_1 p + b_2)(p^2 + d_1 p + d_2) p].$$

Для виконання операцій, зворотних перетворенню (перехід від зображення до оригіналу), одержаний вираз розкладається на найпростіші дробі :

$$\delta_2(p) = \frac{a_2^0 p^2 + a_1^0 p + a_0^0}{(p^2 + b_1 p + b_2)(p^2 + d_1 p + d_2) p} = \frac{A p + B}{p^2 + b_1 p + b_2} + \frac{C p + D}{p^2 + d_1 p + d_2} + \frac{E}{p}$$

Постійні A, B, C, D, E знаходяться за методом невизначених коефіцієнтів.

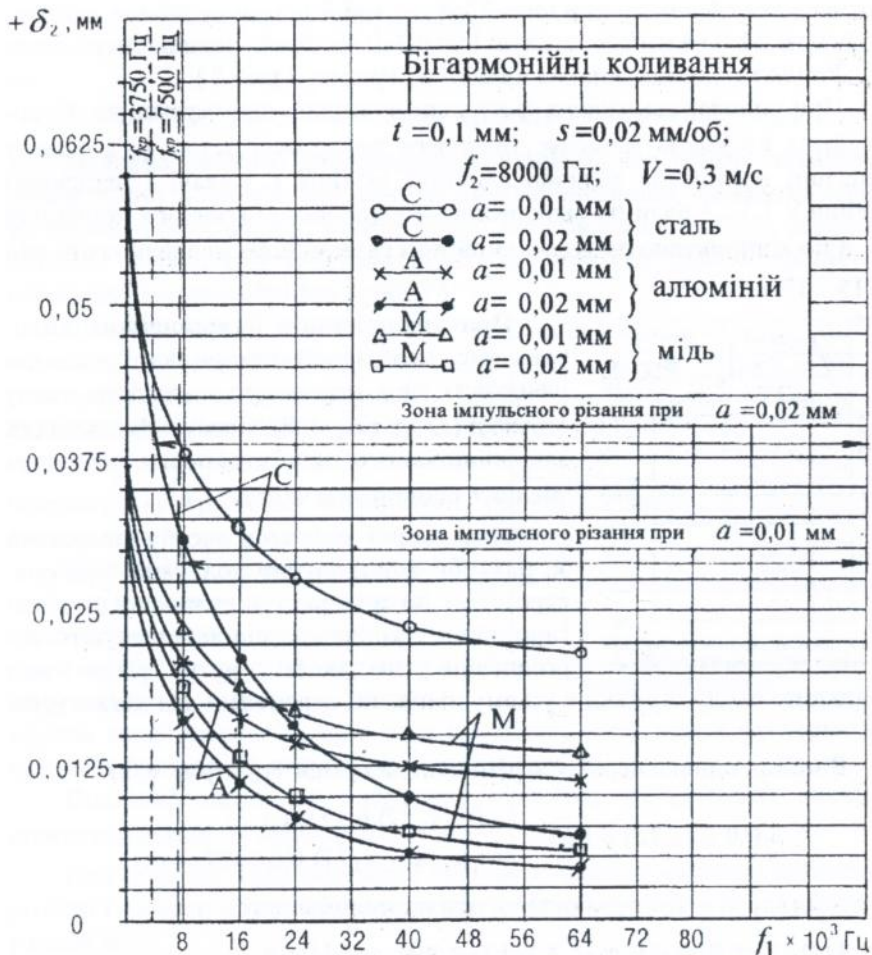


Рис. 5. Залежність прогинів деталі від частоти і амплітуди бігармонійних коливань

Рішення вихідного рівняння залежить від коренів P_1, P_2 поліному $p^2 + b_1 p + b_2$. Так як корені знаменника визначено, перехід від зображення до оригіналу не викликає труднощі і тому через громіздкість виразів у авторефераті не наводиться.

За допомогою одержаних виразів моделювався описаний вище процес обробки сталевих, алюмінієвих та мідних гільз зі слідуючими параметрами: $L = 0,2 \text{ м}$ - довжина гільзи; $r = 50 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - радіус гільзи; $h = 0,5 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ - товщина гільзи; $l = 5 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ - відстань від торця (перетину, у якому діють сили затиску) до точки контакту різця з по-

верхню, яка оброблюється (рис. 2); $t = 0,1; 0,2; 0,3$ мм - глибина різання; $S = 0,02; 0,04; 0,06$ мм/об - подача; $V = 0,3; 0,6; 0,9$ м/с - швидкість різання.

Результати моделювання надано на графіку (рис. 5).

При аналізі одержаних результатів видно, що перехід до бігармонійних коливань дозволяє зменшити деформації деталі δ_2 в усьому діапазоні прийнятих величин глибини різання t , подачі і швидкості різання у 1,5...4 рази по відношенню до величин статичного прогнуття δ_2 , а по відношенню до деформацій при гармонійних коливаннях ($f_1 = f_2$) на 15...17%.

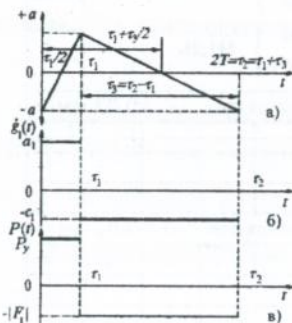


Рис. 6. Діаграми переміщення різця при точінні з пиловидними коливаннями

При використанні бігармонійних коливань час, необхідний для розгону різця до швидкості, що перевищує швидкість сходу стружки (Δt на рис. 4, б), знижує ефективність запропонованого засобу обробки, тому що зменшує відношення частот f_1 / f_2 .

Подальший розвиток засобу можливий за рахунок зміни закону коливань, зокрема, переходом до використання пиловидних негармонійних коливань, що забезпечують перевищення швидкості руху різця над

швидкістю сходу стружки в усьому діапазоні переміщень від деталі (рис. 6).

В межах одного періоду переміщення різця $\delta_1(t)$ (рис. 6, а)

$$\delta_1(t, 0 \leq t \leq 2T) = g_1(t) = \begin{cases} a_1(t - \tau_1/2), & 0 \leq t \leq \tau_1; \\ -c_1(t - \tau_1 - \tau_3/2), & 0 \leq t \leq 2T = \tau_2, \end{cases}$$

де $a_1 = 2a / \tau_1$, $c_1 = 2a / \tau_3$ - коефіцієнти пропорційності;

$$\tau_1 = \pi / \omega_1; \tau_3 = \pi / \omega_2; \tau_2 = 2T = \tau_1 + \tau_3 = \pi(\omega_1 + \omega_2) / \omega_1 \omega_2.$$

Залежність швидкості $\dot{g}_1(t)$ надано на рис. 6, б, з якого випливає, що слід виконувати умову $V < c_1$, яка забезпечує одержання основного ефекту вібраційного точіння з застосуванням пиловидних коливань, що полягають у зменшенні P_y не тільки до нульового значення, але і до від'ємних, і повністю виключають прогнуття стінки деталі та дозволяють керувати глибиною різання.

Враховуючи, що $\tau_3 = \pi / \omega_2$ і $c_1 = 2a / \tau_3$, одержуємо $\omega_2 > \pi V / 2a$.

На рис. 6, в зображено графік зміни сили, яка діє на деталь у радіальному напрямі протягом одного періоду, що може бути виражена як

$$P(t) = P'_y(t, 0 \leq t \leq 2T) = P_y \cdot l(t) - (|F_1| + P_y) \cdot l(t - \tau_1) + F_1 \cdot l(t - \tau_2).$$

Загальне рішення диференційного рівняння, що описує поведінку деталі у зоні різання з періодичною правою частиною, що має на одному періоді такий вигляд, подане вище. Моделювання показує стійкість режимів точіння при знехтувальномалому часі перехідного процесу у порівнянні з часом обробки (рис. 7).

При імпульсній віброобробці сталевих, алюмінієвих і мідних гільз вдається досягнути не тільки нульових значень деформації деталі δ_2 у зоні різання, але і забезпечити одержання від'ємних значень прогнуття (рис. 8).

Збільшення амплітуди коливань призводить до зменшення критичної частоти при якій спостерігається імпульсний характер вібраційного різання, знижує верхню межу частот f_1 , при яких проходить досягнення нульових та від'ємних прогнуттів деталі у зоні різання (рис. 8).

Показано вплив на одержання нульових та від'ємних значень прогнуття деталі δ_2 переднього кута γ .

При обробці ТЦД має місце чистове точіння з малими глибинами різання і малими подачами, що істотно змінює величину головного кута у плані ϕ .

При точінні різцями з радіусом закруглення вершини $r_1 = 0,5 \dots 1,0$ мм, максимальна глибина різання, тобто на практиці не перевищує $0,15 \dots 0,3$ мм. У процесі точіння глибина різання періодично зростає на величину амплітуди коливання, що призводить до зменшення головного кута у плані. Залежність між глибиною різання і головним кутом у плані приймає вигляд

$$\cos \phi = [1 - 0,5(t + a) / r_1]^{0,5}.$$



Рис. 7. Вплив матеріалу деталі на час перехідного процесу

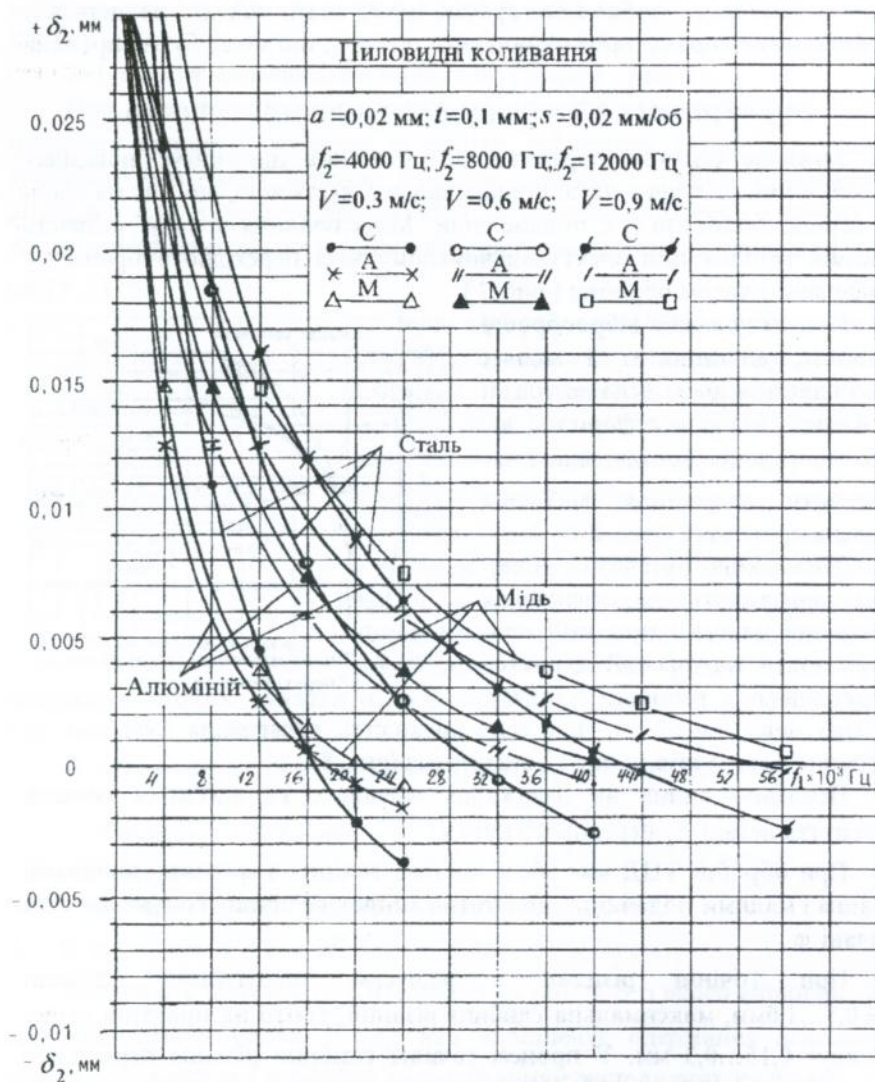


Рис. 8. Залежність прогинів деталей від частоти коливань різця при точінні з амплітудою $a = 0,02 \text{ мм}$

Зменшення кута φ підвищує ефективність точіння за рахунок зменшення величини деформації деталі у 2...3 рази.

У режимі стаціонарного точіння бігармонійними коливаннями при $t \rightarrow \infty$ величина прогнуття стінки деталі

$$\delta_2(\infty) = P_y / K - \{(|F_1| + P_y)\omega_1[\pi - 2\arcsin(V / a\omega_2)]\} / [k\pi(\omega_1 + \omega_2)],$$

$$\text{звідки } \omega_1 = [(k\delta_2 - P_y)\omega_2] / \{P_y - (|F_1| + P_y)[\pi - 2\arcsin(V / a\omega_2)] - k\delta_2\}.$$

При використанні пиловидних коливань, вираз для розрахунку величини прогнуття у зоні різання при $t \rightarrow \infty$ має вигляд

$$\delta_2(\infty) = (P_y\omega_2 - |F_1|\omega_1) / [k(\omega_1 + \omega_2)].$$

У ряді випадків при виборі параметрів процесу різання зручно користуватися не абсолютними значеннями частот f_1 і f_2 , а їх співвідношенням $q = f_1/f_2$. При такому підході $\delta_2 = (P_y - |F_1|q) / [k(1 + q)]$.

Одержані вирази дозволяють визначити або ω_1 при заданих ω_2 , і δ_2 , або q при заданих δ_2 , тобто

$$\omega_1 = [(P_y - k\delta_2)\omega_2] / (|F_1| + k\delta_2); \quad q = (P_y - k\delta_2) / (|F_1| + k\delta_2).$$

Для забезпечення необхідної точності форми величину прогнуття δ_2 у виразах приймають за рівну Δ - допуску форми циліндричної поверхні залежно від заданого квалітету допуску розміру.

Виходячи з міркувань енергетичних витрат, обробку доцільно здійснювати при використанні якомога більш низьких частот коливань інструменту, враховуючи при цьому, що нижня межа частоти обмежена умовою $\psi V < 28,8\pi\omega_2 atg\gamma$, де $\psi = 1,2 \dots 1,3$ - коефіцієнт запасу, що забезпечує стабільне імпульсне вібраційне точіння з відривом передньої поверхні різця від стружки.

Схема левітайщого точіння представлена на рис. 9. Тонкостінна деталь 3, діаметром D_H , розміщується з гарантованим зазором у отворі зовнішнього статора 1 діаметром D_C пристрою для точіння, з виконаними на полосних наконечниках карманами 2, в які нагнітається повітря (рідина) під тиском p_g , центруючим деталь відносно полосних наконечників. Заживленням фазних обмоток статора

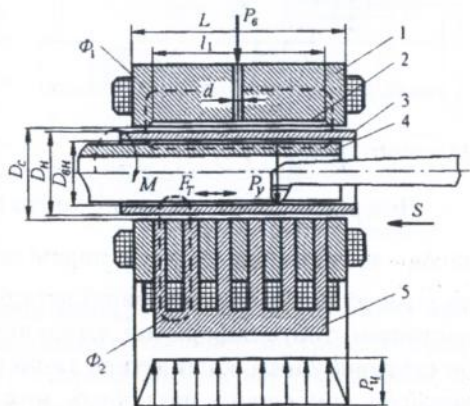


Рис. 9. Принципова схема левітайщого точіння

перемінним струмом, створює обертове магнітне поле і у тонкостінній деталі магнітними потоками $\Phi 1$ індукуються ЕДС, спрямована по твірній циліндру. Під дією цієї ЕДС у деталі виникають вихрові струми, що, взаємодіючи з обертальним магнітним полем, створюють електромагнітні сили і обертаючий момент. Осьові переміщення деталі здійснюються за допомогою лінійних двигунів 5, створюючих силу тяги F_T . Для зменшення втрат магнітних потоків $\Phi 1$ і $\Phi 2$ може використовуватись внутрішній статор 4, розміщений всередині деталі, яка обробляється.

Узагальнений аналіз імпульсного вібраційного і левітаційного точіння показує, що їх об'єднання у один комбінований спосіб точіння дозволяє одержати принципово нову технологію обробки нежорстких деталей, адаптованих до умов гнучкого автоматизованого виробництва, завдяки можливостям зміни частоти і щільності коливань, що притаманне імпульсному вібраційному точінню, а також жорсткості і демпфуючій спроможності підсистеми пристрій - деталь, що властиво левітаційному точінню.

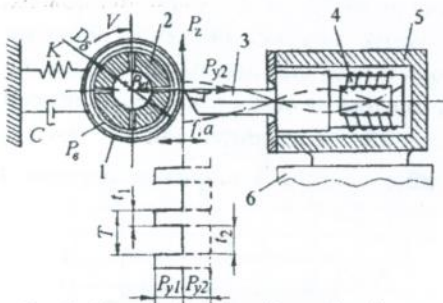


Рис. 10. Схема імпульсного віброрезаційного точіння

Узагальнена схема віброрезаційного точіння, представлена на рис. 10. Деталь 1, встановлена на аеростатичній оправці 2 і приводиться в обертання магнітним полем, що обертається, обробляється за допомогою різця 3, зв'язаного шляхом концентратора коливань з вібратором 4, змонтованим у корпусі 5, який закріплено у свою чергу

на супорті верстату 6.

При рівності імпульсів сил, тобто при $\vec{P}_{y1} \Delta t_1 = \vec{P}_{y2} \Delta t_2$,

де Δt_1 - час врзання, Δt_2 - час подачі деталі на різець, положення вершини різця відносно оброблюваної деталі у процесі різання можна вважати постійним, тобто деформації деталі відсутні. При цьому створюються як би статичні умови, коли деталь та інструмент залипаються нерухомими відносно один одного, що робить можливим виконання особливо точної обробки.

При забезпеченні нерівності $\vec{P}_{y2} \Delta t_2 > \vec{P}_{y1} \Delta t_1$ відбувається подача деталі на різець, тобто збільшення глибини різання без поперечної подачі супорту верстата, а при $\vec{P}_{y1} \Delta t_1 > \vec{P}_{y2} \Delta t_2$ здійснюється або звичайне вібраційне різання, зі всіма властивими йому характерними особливостями, або зменшення глибини різання за рахунок відтиску стінки деталі від різця.

Оскільки $\Delta t_1 = 1/f_1$, $\Delta t_2 = 1/f_2$, змінюючи співвідношення $q = f_1/f_2$, можна одержати процес різання, який відповідає одній з трьох наведених вище умов обробки.

Сумарна величина переміщення стінки деталі у зоні різання $\delta_\Sigma = \delta_2 + \delta_o$, де δ_2 - прогнуття стінки деталі, δ_o - зміщення деталі у напрямку дії P_y через податливості аеростатичної опори.

Порівняння величин статичного прогину стінки деталі у зоні різання і радіального зміщення всієї деталі через податливість опори показує, що при практичних розрахунках останніми можна нехтувати. Крім того, ці зміщення можуть бути компенсовані за рахунок подачі стінки деталі на різець, оскільки величини від'ємних прогинів деталі спільномірні і навіть перевершують величини цих зміщень.

При реалізації обробки з більш інтенсивними режимами різання податливість аеростатичних опор може бути врахована за допомогою розглянутої у роботі двохмасної моделі імпульсного точіння.

Перехід до віброрезітаційного точіння дозволяє кардинально змінити у бік спрощення кінематику верстатів, які використовуються для обробки ТЦД.

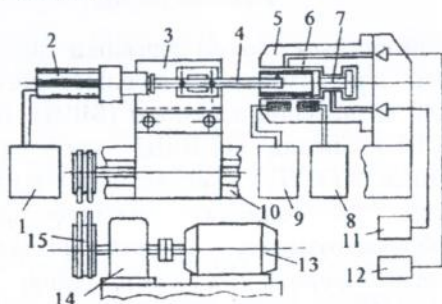


Рис. 11. Схема токарного верстата для віброрезітаційного точіння

На рис. 11 схематично показана конструкція спеціалізованого верстату, налагодженого для віброрезітаційної обробки внутрішніх поверхонь циліндричних деталей, де: 1 - керований генератор імпульсів; 2 - вібратор; 3 - супорт; 4 - борштанга-хвилевід; 5 - пристрій для левітаційного точіння; 6 - ТЦД; 7 - левітуючий упор; 8, 9 - електронні комутатори обмоток двигунів обертального і поступального руху; 10 - аеростатичні напрямні супорта; 11, 12 - пропорційні електропневморозподільники.

ки; 13 - електродвигун; 14 - вібратор; 15 - клиноремінна передача (у якості приводного для супорта може використовуватися ліншійний двигун).

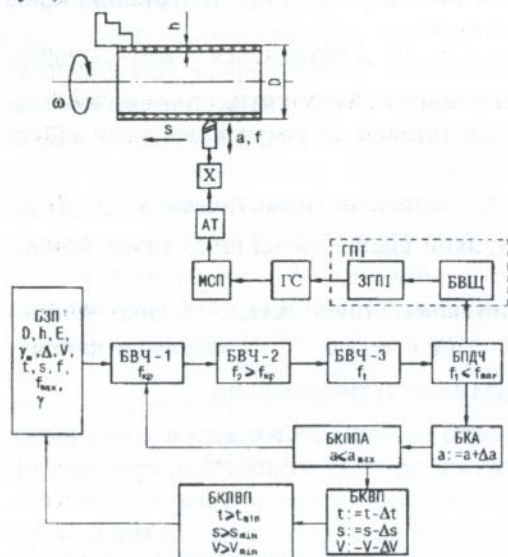


Рис. 12. Структурна схема системи керування імпульсним вібраційним точінням

здійснюється блоком перевірки досягнення частоти (БПДЧ), є підставою для визначення щільності сигналу $q=f_1/f_2$, що реалізується блоком визначення щільності (БВЩ) генератора прямокутних імпульсів (ГПІ). Сигнал від БВЩ крізь генератор, що задає прямокутні імпульси (ЗГПІ) у вигляді напруги надходить на генератор струму (ГС) і далі на обмотку магнітострикційного перетворювача (МСП) віброінструмента, перетворюється у поздовжні коливання магнітопровода з амплітудою a , підсилюються акустичним трансформатором (АТ) і за допомогою хвилеводу (Х), передається ріжучій частині рязця.

Якщо треба забезпечити $f_1 > f_{max}$, блок перевірки досяжності частоти (БПДЧ) виробляє сигнал для збільшення амплітуди коливання a , що дозволяє зменшити $f_{кр}$. Далі сигнал надходить у блок корекції амплітуди (БКА), після якого, пройшовши блок контролю

Структура розімкнутої системи керування процесом імпульсної віброобробки точінням показана на рис. 12.

На підставі значень V , a і γ , що надходять із блоку завдання параметрів (БЗП), блок визначення частоти (БВЧ-1) виробляє значення критичної частоти коливання інструменту $f_{кр}$, що служить для визначення частоти $f_2=(1,1\dots1,3)f_{кр}$. У БВЧ-3 з урахуванням рівності $\delta_2=\Delta$ визначається частота f_1 , значення якої після перевірки виконання умови $f_1 \leq f_{max}$, яка

граничних параметрів амплітуди (БКППА), при виконанні умови $a \leq a_{\max}$ надходить у БВЧ-1, викликаючи зниження критичної частоти $f_{кр}$, що у свою чергу приведе до зменшення частот f_2 та f_1 . Ітераційний процес продовжується до тих пір, доки не виконає умову $a \leq a_{\max}$.

При неможливості виконання умови $a \leq a_{\max}$ сигнал від БКППА надходить у блок корекції вхідних параметрів (БКВП). При незмінності параметрів $D, h, E, \gamma_m, \Delta, f_{\max}$ і у разі зміні підлягають параметри, характеризуючі режими точіння, тобто t, s і V .

Від БКВП сигнал надходить у блок контролю граничних вхідних параметрів (БКПВП) і при виконанні умов $V \geq V_{\min}$, $t \geq t_{\min}$ і $s \geq s_{\min}$ надходить БЗП, що формує нові значення t, s і V . Ітераційний процес знову починається з визначення параметра a . Якщо зміну t, s і V не приведе до досягнення необхідних умов обробки, необхідно або змінювати величину переднього кута різця γ , для чого потрібна заміна ріжучої частини віброінструмента, або змінювати параметри АТ у сторону збільшення коефіцієнту передачі K_k , що приведе до можливості досягнення більших значень амплітуди коливань ріжучої частини.

У четвертому розділі розглянуті оригінальні конструкції технологічного каавтоматизованого оснащення, покликаного забезпечити необхідну точність обробки ТЦД.

Проведений аналіз затискних пристроїв показує, що поліпшення точносних характеристик ТЦД може бути забезпечене або шляхом більш рівномірного розподілу зусиль затиска по периметру базової поверхні, або за рахунок зміни їх пружнодеформованого стану, що підвищує жорсткість стінок і всієї деталі у радіальному напрямку, або шляхом переходу до безконтактного базування і фіксування.

У кулачкових затискних пристроях підвищення рівномірності розподілу зусиль затиску досягається збільшенням числа затискних елементів, усуненням у центруючому механізмі рухомих з'єднань з гарантованим зазором, введенням у центруючий механізм пружних елементів, що гасять вібрацію, виникаючу у процесі обробки.

Приведені конструкції кулачкових затискних пристроїв із збільшеним числом затискних елементів, об'єднаних загальною спрямовуючою центрангових пристроїв із безззорними центруючими механізмами; пружних пристроїв із підвищеним числом пружногнучких пластинчатих затискних елементів (до 24).

До пристроїв з рівномірним розподілом зусиль затиску віднесені конструкції пристроїв з профільними спіральними затискними елементами, гольчаті самозатискні оправки та пристосування з розрізними кільцями перемінного перетину. Показана ефективність застосування розрізних кілець у складі пристроїв для левітаційного точіння. Описані конструкції оправок, патронів, задніх бабок і росточних пристроїв на їх основі. Дана методика розрахунку і проєктування стосовно до закріплення ТЦД.

Пристрої для точіння зі зміною статичних та динамічних характеристик системи ВПІД являють сукупність затискних пристроїв і спеціальних конструктивних елементів, кінематично зв'язаних між собою, покликаних забезпечити необхідні умови обробки ТЦД і, в першу чергу, підвищення жорсткості підсистеми пристрій-деталь. Приведені конструкції і блок-схеми управління пристроями для придання пружнодеформованого стану деталям різного класу з застосуванням радіальних, осьових та крутильних спрямованих і керованих деформацій, такі як: рухомі люнеті-деформатори; упори-віброгасителі, що змінюють по заданому закону свою жорсткість; центральні упори-деформатори, виконані у вигляді пружногнучких циліндрів, змінюючих свою форму під впливом керованого електромагнітного поля.

Показана можливість застосування навісних (змінних) елементів-супутників, що дозволяють збільшити радіальну жорсткість деталей на час обробки, таких як затискні (роз'ємні) кільця перемінного перетину і поларілатові розпорні втулки.

Описані конструкції розташованих всередині ТЦД пристроїв з трубчатими кільцевими розпірними елементами з наповнювачами у вигляді кульок і карбонільного мілкодисперсного заліза, принцип роботи яких заснований на використанні центробіжних сил і електромагнітних полів.

Пристрої для точіння з вібраціями представлені конструкціями віброінструменту з вздовжніми, крутильними і комбінованими коливаннями; віброупорів, що становлять собою автономні коливальні системи механічного і гідравлічного типів, працюючі у високочастотному і ультразвуковому режимах. Приведені блок-схеми управління режимами роботи цих пристроїв.

Запропонована конструкція вібросупорта для дворізцевої обробки, застосування якого дозволяє виключити вплив періодичної зміни сили різання на кромках різців, які приводять до виникнення пружних зміщень та некерованих коливань оброблюваної деталі і ріжучого

інструменту, що носять нерегулярний характер і частоту, що має місце при звичайному дворізцевому точінні без вібрацій.

Аналізується магнітна система магнітострикційних перетворювачів (МСП) віброінструмента, розглянуті режими роботи МСП, приведена методика розрахунку коливальної системи. Показано, що, змінюючи робочу частоту збудження МСП, можна у широкому діапазоні керувати величиною амплітуди пружних коливань на виході коливальної системи. Приведена принципова схема системи управління пристроями для імпульсного вібраційного точіння з використанням прямокутних, експоненціальних та пилоподібних імпульсів струму з перемінною щільністю.

Описані конструкції пристроїв для левітаційного точіння ТЦД класу чіпів, гільз та стаканів.

Пятий розділ присвячений автоматизації транспортування, завантаження та розвантаження ТЦД з урахуванням запропонованої концепції вібролевітаційної обробки, що обумовлює необхідність створення нових методів і засобів автоматизації допоміжних операцій на основі принципу безконтактного базування, переміщення та маніпулювання.

Показана доцільність використання в умовах детермінованого виробництва, робіт з багатопозиційними (цифровими) пневмоприводами. Приведені конструкції демпфірованих цифрових пневмоприводів поступального та обертального руху.

Для захвату і утримання ТЦД запропоновані конструкції вакуумних, електромагнітних та левітаційних захватних пристроїв (ЗП). Останні характеризуються відсутністю механічного контакту з об'єктами маніпулювання і враховують інерційніе зміщення об'єктів у процесі розгону і гальмування маніпулятора ПР, а також дія гравітаційних сил, викликаючих зміщення об'єктів відносно захватних елементів.

Виключення можливості пошкодження захватними пристроями тонкостінних деталей у процесі їх витягу із транспортної тари, у якості якої переважно використовуються касети, досягається застосуванням левітаційних касет. Приведені конструкції стаціонарної та змінної касети.

Для виключення контактів ТЦД на стадії транспортування з спрямовуючими елементами транспортних систем призначена конструкція левітаційного лотка-транспортера, представлена на рис. 13, що складається з траверси 1 з кронштейнами 2 і робочих секцій 4 з каналами 3 для підводу стислого повітря до аеростатичних опор,

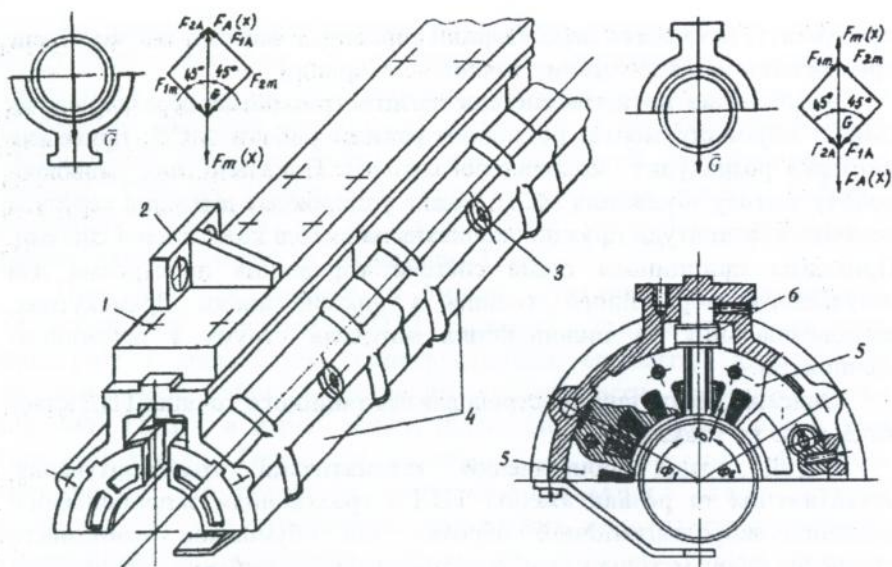


Рис. 13. Конструкція левітаційного лотка-транспортера

виконаних на полосних наконечниках дугостаторних лінійних асинхронних двигунів (ДЛД) 5, розділених плоским лінійним двигуном 6. Захват, центрування і утримання ТЦД здійснюється за рахунок урівноваження пневматичної підйомної сили F_A і ваги деталі G магнітною силою F_m , створюваною обмотками дугостаторних двигунів, а переміщення уздовж лотка – за допомогою плоского лінійного двигуна. Динаміка процесу захвату і утримання ТЦД описується рівнянням

$$m\ddot{x}_1 = F_A(x_1) - F_m(x_1) + G - k\dot{x}_1,$$

де m – маса деталі; $\ddot{x}_1, \dot{x}_1, x_1$ – відповідно ускорення, швидкість і переміщення ТЦД; $F_A(x_1)$ – пневматичне зусилля, що створене опорою; $F_m(x_1)$ – рівнодійна магнітна сила утримання; G – вага ТЦД; k – коефіцієнт демпфірування, визначений експериментально, залежний від магнітної індукції і аеродинамічного опору у повітряному зазорі між ТЦД і полосними наконечниками ДЛД.

Рівняння регресії має вигляд:

$$y = -56625 \cdot 10^4 \cdot x_1 + 2,9664 \cdot 10^{12} \cdot x_2 + 0,023645 \cdot x_3 - 18559 \cdot 10^2 \cdot x_4 + \\ + 56687 \cdot 10^3 \cdot x_5 - 48097 \cdot 10^4 \cdot x_6 + 29279,$$

де y – тиск у зазорі δ ; x_1 – величина зазору δ ; x_2 – величина зазору δ у квадраті; x_3 – тиск на вході; x_4 – відстань від осі отвору для подачі

тиску; $x_5 = x_4^2$ – перемінна регресивної моделі; $x_6 = x_4^3$ – перемінна регресійної моделі

Лінійна залежність $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ не дозволяє одержати адекватну модель, т. як перевірка по критерію Фішера не виконується. Дослідження показали, що для одержання адекватної моделі по зазначеному критерію, необхідно враховувати перемінні члени регресійної моделі x_5 і x_6 . На підставі t - статистики всі перемінні є значимими; F - значення підтверджує адекватність моделі.

Пневматичне зусилля F_A у зазорі δ визначається за допомогою виразу

$$F_A = \int_0^{x_{4\max}} y(x_4) 2\pi x_4 dx_4 = 2\pi x_{4\max}^2 [K_1 / 2 + (Ax_{4\max}) / 3 + (Bx_{4\max}^2) / 4 + (Cx_{4\max}^3) / 5],$$

де $K_1 = -56625 \cdot 10^4 x_1 + 2,9664 \cdot 10^{12} x_2 + 0,023645 x_3 + 29279$;

$$A = -18559 \cdot 10^2; B = 56687 \cdot 10^3; C = -48097 \cdot 10^4.$$

Результати розрахунку показують, що захоплена деталь осцилує навколо значення $x_1 \approx 4 \cdot 10^{-5}$ м (захват було проведено з відстані $x_1 = 10^{-4}$ м), а розмах коливань не перевищує величину $3 \cdot 10^{-5}$ м.

Експериментальні дослідження левітаційних захватних і транспортних пристроїв, зв'язані з визначенням силових характеристик і навантажувальних характеристик, що входять до їх складу аеростатичних опор, застосовно до ТЦД з товщиною стінок 0,5 ... 2,0 мм і діаметром до 100 мм, підтверджують достовірність теоретичних розробок. Одержані залежності зміни діаметрального зазору у опорах від зусилля навантаження.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ І РЕКОМЕНДАЦІЇ

У результаті роботи над проблемою вібролевітаційної обробки точінням тонкостінних циліндричних деталей в умовах автоматизованого виробництва створені теоретичні основи для її комплексного рішення.

На підставі загального аналізу і систематизованого вивчення процесів формоутворення ТЦД підтверджена придатність, ефективність та перспективність використання вібролевітаційної технології для створення гнучких автоматизованих оброблюючих систем. Створені методи керування процесами обробки базуються на розкритих закономірностях пружно-пластичного стану деталей на стадіях зберігання, транспортування, завантаження-розвантаження, закріплення і обробки, що визначають точність і якість формоутворення.

Виявлені зв'язки пружно-пластичного стану тонкостінних деталей з технологічними параметрами процесів обробки, показниками точності і стабільності форми втілені у нових способах і конструкціях пристроїв для їх реалізації, захищених 68-и авторськими свідоцтвами і патентами.

Вперше показана і за допомогою математичних моделей кількісно обґрунтована можливість управління пружно-деформованим станом оброблюваних ТЦД за допомогою негармонічних коливань інструменту. Показано, що змінюючи щільність негармонічних коливань інструменту можна одержати не тільки нульове значення радіальної складової сили різання, а отже, і прогинів стінки деталі у напрямку її дії, але і змінити її знак на протилежний, тобто керувати глибиною різання без зміни налагоджувального положення ріжучого інструменту.

Запропонована концепція віброрезаційної обробки, що базується на поєднанні імпульсної віброобробки і безконтактного методу базування ТЦД у робочій зоні, відкриває можливості синтезу принципово нових конструкцій спеціалізованого металорізального устаткування.

Показана перспективність застосування безконтактної технології для забезпечення необхідної точності формоутворення ТЦД, заснована на використанні газоманітних опор у поєднанні з обертовими і магнітними полями, що переміщуються лінійно. На цій основі розроблена гама виконавчих пристроїв для автоматизації накопичення, транспортування, захвату, завантаження-розвантаження і обробки ТЦД, конструктивно і технологічно сумісних між собою. Застосування аеростатичних опор при базуванні тонкостінних деталей по внутрішньому діаметру дозволяє у 2 рази підвищити їх жорсткість у радіальному напрямку.

Розроблені і створені демпфіруючі цифрові пневмоприводи підвищеної точності позиціонування. Показана доцільність їх використання у складі маніпуляційних механізмів промислових роботів в умовах детермінованого просторового розміщення нежорстких об'єктів обробки і виконавчих органів основного і допоміжного устаткування гнучких оброблюваних осердь.

Розроблені математичні моделі процесів взаємодії ріжучого інструменту, що здійснює радіальні негармонічні коливання, з тонкостінними деталями при контактному і безконтактному базуванні останніх у робочій зоні. Структура моделей і алгоритми функціонування

дозволяють автоматизувати процес розрахунку і управління параметрами обробки.

Розроблена математична модель безконтактного захвату і утримання тонкостінних деталей у процесі транспортування і маніпулювання, що зв'язує параметри робочих процесів з керуючими перемінними, що дозволяє стабілізувати просторове розміщення деталей відносно виконавчих органів технологічного устаткування.

Експериментально підтверджена можливість розширення діапазону діаметральних зазорів аеростатичних опор, використовуваних у складі основного і допоміжного технологічного оснащення для установки і базування ТЦД, що спрощує їх конструкцію, зменшує економічні витрати при виготовленні і знижує вимоги до точності позиціонування маніпуляційних механізмів ПР.

Впровадження розроблених на основі нової наукової концепції методів і засобів автоматизованої обробки ТЦД дозволяє вирішити проблему забезпечення необхідної точності їх форми і розмірів, підвищити продуктивність за рахунок істотного скорочення основного і допоміжного часу обробки.

Одержані результати і розроблені рекомендації можуть бути ефективно використані при вирішенні завдань автоматизації різноманітних технологічних процесів і, в першу чергу, техпроцесів обробки різанням нежорстких деталей класу валів та дисків.

Економічний ефект, одержаний за рахунок автоматизації технологічних процесів, високої експлуатаційної точності готових деталей і зниження енерго- та матеріалозатрат складає більш 650, 0 тис. руб. (за станом на 1990 рік). Теоретичні положення і практичні розробки впроваджені в навчальний процес і використані при написанні трьох навчальних посібників з грифом Міністерства України.

Основні результати дисертації опубліковані в наступних роботах:

1. Робототехнические системы в сборочном производстве/ Под ред. Е.В.Пашкова . - К.: Вища шк. Головное изд-во, 1987. - 272 с.
2. Пашков Е.В., Кош В.Я., Карлов А.Г. Транспортно-накопительные и загрузочные системы в сборочном производстве. - К.: УМК ВО, 1992. - 536 с.
3. Пашков Е.В., Осинский Ю.А., Четверкин А.А. Электропневмоавтоматика в производственных процессах: Учебное пособие. - Севастополь: Изд-во СевГТУ, 1997. - 368 с.
4. Пашков Е.В. Технологические приемы повышения точности обработки тонкостенных цилиндрических деталей. - К.: Общество "Знание" Украины, 1980. - 24 с.

5. Пашков Е.В. Вибролевитационная токарная обработка тонкостенных деталей. - К.: Общество "Знание" Украины, 1990. - 22 с.

6. Пашков Е.В. Определение величины деформаций тонкостенных цилиндрических деталей при закреплении их в технологической оснастке // Технология и организация производства. - К.: УкрНИИТИ, 1971. - № 1. - С. 103-104.

7. Пашков Е.В., Копп В.Я. Вибрационное точение тонкостенных цилиндров с применением бигармонических колебаний // Вестник СевГТУ: Автоматизация процессов и управление: Севастоп. гос. техн. ун-т. - 1996. - Вып. 2. - С. 23-34.

8. Рабинович А.Н., Пашков Е.В. К вопросу обработки тонкостенных цилиндрических деталей // Механообработка, надежность машин. - Краматорск, 1971. - № 11. - С. 38-40.

9. Рабинович А.Н., Пашков Е.В. Метод зажима тонкостенных цилиндрических деталей // Приборостроение, К.: Техника, 1971. - № 10. - С. 90-94.

10. Пашков Е.В., Копп В.Я., Сопин Ю.К. Моделирование процесса захвата и удержания тонкостенных цилиндров в левитационных транспортных механизмах // Вестник СевГТУ: Моделирование и эксперимент в инженерных задачах; Севастоп. гос. техн. ун-т. - 1995. - Вып. 1. - С. 69-75.

11. Пашков Е.В. О повышении точности обработки тонкостенных цилиндрических деталей на металлорежущем оборудовании // Технология и автоматизация машиностроения. - К.: Техника, 1974. - № 14. - С. 23-25.

12. Пашков Е.В., Копп В.Я. Позиционное демпфирование приводов поворота промышленных роботов и манипуляторов // Приборостроение- К.: Техника, 1980. - № 28. - С. 19-23.

13. Пашков Е.В. Определение параметров управления вибрационным точением при бигармонических и пилообразных колебаниях инструмента // Вестник СевГТУ: Автоматизация процессов и управление: Севастоп. гос. техн. ун-т. - 1997. - Вып. 7. - С. 39-44.

14. Пашков Е.В., Копп В.Я., Макухина Г.Г. Электромагнитный порошковый демпфер промышленного робота с позиционным управлением // Приборостроение. - К.: Техника, 1981. - № 30. - С. 52-56.

15. Пашков Е.В. Центровая оправка для закрепления тонкостенных цилиндрических деталей // Технология и организация производства. - К.: УкрНИИТИ, 1973. - № 7. - С. 35-37.

16. Бохонский А.И., Пашков Е.В., Рыжкова Н.П. Некоторые особенности токарной обработки тонкостенных цилиндрических оболочек // Приборостроение. - К.: Техника, 1984. - № 36. - С. 11-16.

17. Карлов А.Г., Пашков Е.В., Погорелов Б.В. Сборочные и ориентирующие манипуляторы на базе цифровых пневмоприводов. - В кн. "Роботизация сборочных процессов". - М.: Наука, 1985. - С. 53-58.

18. Пашков Е.В., Карлов А.Г., Наймушин В.С., Кузьмин В.В., Цветков В.Е. Вопросы создания сборочных роботизированных участков на базе промышленных роботов серии РС. - В кн. "Роботи-

зация сборочных процессов". - М.: Наука, 1985. - С. 45-53.

19. Круговой А.Н., Пашков Е.В. Малогабаритный электропневматический преобразователь // Машиностроитель, 1987. - № 3. - С. 11.

20. Круговой А.Н., Пашков Е.В. Электропневмопреобразователь для управления промышленными роботами // Механизация и автоматизация производства, 1987. - № 7. - С. 16-17.

21. Pashkov E.V. Robotic Systems for the Manipulation with the Thin - Walled Cylindrical Objects in Manufacturing and Assembly/ IEEE International Symposium on industrial Electronics, China, 25...27 May, 1992. - P. 409-413.

22. А.с. 487719 СССР, МКИ В 23 В 31/40. Способ зажима тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков, В.А. Яхимович (СССР). - № 1935735/25; Заявлено 27.06.73; Опубл. 15.10.75, Бюл. № 39.

23. А.с. 852447 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки нежестких деталей типа валов / Е.В. Пашков, Н.П. Рыжкова, Т.В. Мозолевская (СССР). - № 2834372/25; Заявлено 01.11.79; Опубл. 07.08.81, Бюл. № 29.

24. А.с. 963694 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков, Н.П. Рыжкова (СССР). - № 3006172/25; Заявлено 21.11.80; Опубл. 07.10.82, Бюл. № 37.

25. А.с. 1057182 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков (СССР). - № 3298632/25; Заявлено 18.03.81; Опубл. 30.11.83, Бюл. № 44.

26. А.с. 1127691 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков (СССР). - № 3580644/25; Заявлено 04.02.83; Опубл. 07.12.84, Бюл. № 45.

27. А.с. 1152711 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков (СССР). - № 3670548/25; Заявлено 08.12.83; Опубл. 30.04.85, Бюл. № 16.

28. А.с. 1171208 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндров / Е.В. Пашков (СССР). - № 3703344/25; Заявлено 22.02.84; Опубл. 07.08.85, Бюл. № 29.

29. А.с. 1189594 СССР, МКИ В 23 В 31/40. Способ закрепления полой цилиндрической детали / Е.В. Пашков, И.Б. Харин (СССР). - № 3712099/25; Заявлено 21.03.84; Опубл. 07.11.85, Бюл. № 41.

30. А.с. 1225694 СССР, МКИ В23 В 1/00, 31/40. Способ подготовки нежесткой цилиндрической детали для обработки и устройство для его осуществления / И.Б. Харин, Е.В. Пашков (СССР). - № 3741232/25; Заявлено 25.05.84; Опубл. 23.04.86, Бюл. № 15.

31. А.с.1247167 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков, И.Б. Харин (СССР). - № 3862658/25; Заявлено 25.02.85; Опубл. 30.07.86, Бюл. № 28.

32. А.с. 1280772 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ токарной обработки нежестких деталей / Е.В. Пашков, Б.В. Погорелов (СССР). - № 3890774/25; Заявлено 26.04.85, ДСП.

33. А.с. 1443289 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ обработки тонкостенных цилиндров точением с вибрациями / Е.В. Пашков (СССР). – № 4075507/25; Заявлено 12.06.86, ДСП.

34. Заявка № 95020456. Способ обработки тонкостенных цилиндрических деталей / Е.В. Пашков; Заявлено 01.02.95. Решение о выдаче патента Украины от 31.01.97 г.

35. Патент 1798183 Россия, МКИ В 25 J 15/00. Захватное устройство / Е.В. Пашков (Украина). - № 4834935/25; Заявлено 05.06.90; Опубл. 28.02.93, Бюл. № 8.

Крім перелічених вище авторських свідоцтв і патентів на способи обробки ТЦД, науково-технічна новизна дисертаційної роботи захищена 54-ма авторськими свідоцтвами і патентами на пристрої для транспортування, маніпулювання, захвату, закріплення і обробки, 27 із яких одержані особисто автором:

386719, 386720, 712364, 722697, 729004, 750144, 750145, 751621, 754126, 768632, 837922, 852537, 853203, 856660, 876420, 891245, 904895, 906646, 952443, 952581, 956168, 971647, 986602, 986624, 986630, 1047598, 1092011, 1099141, 1140887, 1140888, 1171211, 1180170, 1180171, 1228976, 1232388, 1280771, 1301648, 1301700, 1360978, 1392989, 1533125, 1561344, 1563843, 1565675, 1569082, 1569097, 1583217, 1626565, 1776490, 1808694.

Заяви на патент України з позитивним рішенням:

93006518, рішення від 04.04.97; 94022059, рішення від 24.09.96;

94022120, рішення від 24.09.96; 94021923, рішення від 06.05.97.

Пашков Е.В. Теоретические основы и синтез систем автоматизированного виброрезивитационного точения тонкостенных цилиндрических деталей. – Рукопись.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – Автоматизация технологических процессов. – Севастопольский государственный технический университет, Севастополь, 1997.

В работе развивается новое направление создания гибких автоматизированных обрабатывающих систем, основанное на концепции виброрезивитационной технологии. Применение бесконтактных механизмов и импульсного вибрационного точения позволяет устранить деформации тонкостенных цилиндрических деталей (ТЦД) от действия внешних нагрузок. Разработанные модели точения показывают возможность управления упругодеформированным состоянием ТЦД при придании инструменту негармонических колебаний в радиальном направлении. Предложены оригинальные конструктивные решения технологического оборудования и оснастки с улучшенными техническими характеристиками.

Ключевые слова: автоматизация, точение, негармонические колебания, аэростатическая опора, математическое моделирование, радиальная деформация, тонкостенная цилиндрическая деталь.

Пашков Є.В. Теоретичні основи і синтез систем автоматизованого вібролевітаційного точіння тонкостінних циліндричних деталей. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – Автоматизація технологічних процесів. – Севастопольський державний технічний університет, Севастополь, 1997.

У роботі розвивається новий напрямок створення гнучких автоматизованих оброблюючих систем на підставі концепції вібролевітаційної технології. Застосування безконтактних механізмів і імпульсного вібраційного точіння дозволяє усунути деформації тонкостінних циліндричних деталей (ТЦД) від впливу зовнішніх навантажень. Розроблені моделі точіння показують можливість керування пружнодеформованим станом ТЦД при приданні інструменту негармонійних коливань у радіальному напрямку. Запропоновані оригінальні конструктивні рішення технологічного обладнання і оснастки з покращеними технічними характеристиками.

Ключові слова: автоматизація, точіння, негармонійні коливання, аеростатичний опір, математичне моделювання, радіальна деформація, тонкостінна циліндрична деталь.

Pashkov E.V. Theoretical basis and synthesis of the systems of automatic vibro-levitation turning of the thin-walled cylindrical details. - Manuscript.

Thesis for a scientific degree of Doctor of Technical Sciences by speciality 05.13.07 - Automation of technological processes.- Sevastopol State Technical University, Sevastopol, 1997.

A new approach for the creation of the flexible automatic processing systems, based on the concept of vibro-levitation technology has been developed in the dissertation. Application of the non-contact mechanisms and pulsed vibrational turning enables deformations of thin-walled cylindrical details (TCD), due to the influence of the external loading, to be eliminated. The developed models of turning show the possibility of control of elastic deformation conditions of TCD under the influence on the instrument of non-harmonic oscillations in radial direction. Original constructive decisions of technological equipment with improved technical characteristics have been suggested.

Key words: automation, turning, non-harmonic oscillations, aerostatic base, mathematical modeling, radial deformation, thin-walled cylindrical detail.

Підп. до друку 23.10.1997 р. Формат 60×90/16.

Ум. друк. арк. 2. Замовлення № 163. Тираж 100 прим. Безкоштовно.

Видавництво "СевГТУ", Севастополь, 53, Стрелецька балка, Студ-містечко, НМЦ.

As 38.88.88

434458

AB 38.869

Изд. до друку 23.10.1997 р. Формат 60х90/16.

Ум. држк. арт. 2, Законники № 163. Тираж 100 прим. Безкоштовно.

Видавництво "Світ ТН", Сиваспольск, 73, Стрелова балка, Студ-
кентський НМЦ.

8524491