

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ

Буховець Валерій Миколайович

УДК 621.941-229.3

**КОМПЛЕКСНЕ САМОНАЛАГОДЖУВАЛЬНЕ
ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНОГО ЗАТИСКУ ТА
БАГАТОРІЗЦЕВОЇ ОБРОБКИ**

05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Тернопіль – 2019

Дисертація на правах рукопису

Роботу виконано на кафедрі конструювання верстатів, інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя Міністерства освіти і науки України, м. Тернопіль.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор, заслужений працівник освіти України
Луців Ігор Володимирович,
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, професор кафедри конструювання верстатів інструментів та машин

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор, заслужений винахідник України
Кузнєцов Юрій Миколайович,
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри конструювання верстатів та машин

кандидат технічних наук, доцент
Редько Ростислав Григорович,
Луцький національний технічний університет, декан факультету комп'ютерних наук та інформаційних технологій

Захист відбудеться «04» жовтня 2019 р. об 11 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 58.052.03 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корп. 2, ауд. 79

З дисертацією можна ознайомитись у науково-технічній бібліотеці Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, корп. 2

Автореферат розіслано «03» вересня 2019 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради

А.Є. Дячун

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Вирішення актуальної проблеми обробки нежорстких деталей на токарних верстатах полягає в керуванні процесом обробки конструкторськими і технологічними методами за рахунок створення надійних затискних пристроїв і забезпечення регулювання режимів обробки. Це в кінцевому результаті призводить до забезпечення стабільних показників якості обробки відповідно до вимог робочих креслень деталей.

Під час кінцевих токарних операцій крутильні коливання, які виникають у приводі, призводять до коливань сили різання, що в свою чергу викликає погіршення точності і якості оброблюваної поверхні. Через різну кількість затискних елементів затискного пристрою і їх положення відносно радіальної сили різання виникає зміна складових радіальних відтискань, викликаних різною податливістю елементів затискного патрона. Окрім того, в процесі обробки змінюються умови різання, що теж зумовлює утворення різноманітних похибок токарної обробки, особливо деталей малої жорсткості. Головною проблемою при обробці кільцевих деталей є недостатня жорсткість заготовки і в цілому технологічної системи. У таких випадках деформації деталі внаслідок закріплення у багатьох випадках співрозмірні з допуском на механічну обробку. Тому досягнення заданих параметрів точності форми обробленої поверхні кільцевих заготовок стає складним технологічним та виробничим завданням. Досягнення мінімізації похибки обробки можливе лише при правильно вибраних методах і засобах технологічної підготовки виробництва.

Очевидно, що зменшення похибок обробки слід шукати у комплексному вирішенні проблеми обробки і затиску. Застосування дво- і багаторізевого оснащення адаптивного типу поряд із досягненням стабільності затиску заготовок може забезпечувати за рахунок саморегулювання режимів різання стабільність показників якості обробки нежорстких деталей. При цьому в структурі верстатно-інструментального оснащення мають створюватись внутрішні механізми адаптації всієї системи до зміни умов різання. Це є одним із ефективних способів покращення точності та якості поверхонь нежорстких деталей при обробці на токарних верстатах.

Тому дослідження такої комплексної системи затиску і обробки, яка забезпечує адаптацію багатолезового оснащення до умов обробки при забезпеченні необхідної радіальної жорсткості затискних пристроїв є актуальною науково-прикладною задачею.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами і темами. Дисертаційна робота пов'язана з виконанням плану науково-дослідної роботи викладачів Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя згідно до Постанови Кабінету Міністрів України № 516 від 18.04.2006 р. «Державна програма розвитку машинобудування», за програмою наукових досліджень Міністерства освіти та науки України, а також на основі держбюджетної науково-дослідної теми «Енергоефективні технології обробки деталей з полімерних матеріалів для обладнання магістральних газопроводів»

(01.01.2013 р. 31.12.2014 р.) (номер державної реєстрації НДР: 0113U000252), під час реалізації якої здобувач був виконавцем окремих етапів.

Мета роботи й завдання дослідження. *Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності токарної обробки деталей малої жорсткості на основі створення комплексних конструкцій самоналагоджувальних систем із затискними патронами з розширеним діапазоном і рівномірно розподіленим зусиллям затиску і забезпеченням процесу самоналагоджування багаторізевої обробки.*

Для досягнення мети в роботі поставлені й вирішені такі завдання:

- 1) аналіз проблеми забезпечення високої якості токарної обробки деталей малої жорсткості і труднощів її досягнення та пошук шляхів її реалізації;
- 2) створення конструкційних схем багаторізових самоналагоджувальних систем з розширеним діапазоном затиску і рівномірно розподіленим зусиллям затиску та обробки адаптивного типу;
- 3) встановлення впливу геометрії різних типів втулкових затискних елементів на діапазон затиску заготовок та їх напружено-деформований стан;
- 4) аналіз динамічних характеристик самоналагоджувальної системи багатолезової обробки адаптивного типу в комплексі із затискними пристроями із рівномірно розподіленим зусиллям затиску;
- 5) експериментальні дослідження характеристик затиску і якості обробки багаторізових самоналагоджувальних систем та порівняння результатів теоретичних і експериментальних досліджень;
- 6) вироблення практичних рекомендацій щодо використання багаторізових самоналагоджувальних систем в комплексі із затискними пристроями з елементами адаптації.

Об'єкт дослідження – процеси, що виникають при багаторізовій токарній обробці деталей малої жорсткості та при їх рівномірно розподіленому затиску.

Предмет дослідження – комплексні самоналагоджувальні системи багаторізової обробки і затиску для точіння деталей малої жорсткості.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження ґрунтуються на фундаментальних наукових положеннях теорії різання, опору матеріалів, теоретичних основах розрахунку верстатів і машин, динаміки верстатів, теорії контактної жорсткості, методів розрахунку точності машин. Експериментальні дослідження виконувались в лабораторних умовах із використанням методик проведення експерименту, сучасної вимірювальної апаратури, спеціальних пристроїв.

Наукова новизна отриманих результатів.

1. Доведено, що об'єднання в одній комплексній системі рівномірно розподіленого затиску і багатолезового різання підвищеної продуктивності і вібростійкості дозволяє досягнути підвищення точності токарної обробки, якості обробленої поверхні та подрібнення зливної стружки.

2. Вперше на основі варіаційного методу розрахунку точності машин розроблена аналітична модель, яка дозволила провести оцінку впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення, що виникають в результаті силової дії з боку різальних елементів та затискного пристрою, на

вихідну точність оброблюваних циліндричних поверхонь консольно закріплених деталей.

3. Вперше отримані відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по кути повороту, що враховують малі лінійні зміщення і кути повороту, викликані поперечним заклинюванням заготовки в затискному патроні та малі лінійні зміщення, викликані деформаціями різцевих блоків під дією складових сил різання. Встановлено постійність відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по довжині у певних кутових положеннях, що свідчить про доцільність застосування багаторіцевого самоналагоджувального оснащення.

4. В результаті комп'ютерного моделювання з використанням САД/САЕ-системи вперше отримані залежності діапазону затиску заготовок гідравлічними токарними патронами з різними типами втулкових елементів затиску від товщини стінки та силового навантаження зі сторони приводу затиску. Отримані картини напружено-деформованого стану втулкових елементів затиску, на основі чого визначені максимальні переміщення їх затискної частини.

Практичне значення отриманих результатів. На основі проведених теоретичних та експериментальних досліджень:

1. Розроблено конструкційні схеми багаторіцевих самоналагоджувальних систем для токарної обробки з розширеним діапазоном і рівномірно розподіленим зусиллям затиску та вирівнюванням зусиль різання адаптивного типу.

2. На основі отриманих результатів аналізу динамічної поведінки багатолезової системи самоналагоджувальної обробки підтверджено підвищення стійкості проти автоколивань при багаторіцевій обробці з рівномірним затиском заготовок порівняно із одноріцевою.

3. Розроблено експериментальний стенд та методику експериментальних досліджень похибок затиску заготовок малої жорсткості при використанні затискних елементів адаптивного типу в діапазоні його діаметрів затиску. При випробуваннях комплексного самоналагоджувального оснащення виявлені позитивні ефекти збільшення продуктивності обробки у 2,4 рази, зменшення радіальних похибок – у 2,1 рази, шорсткості поверхні обробки у 1,7 рази, подрібнення стружки порівняно із традиційною токарною обробкою.

4. Окремі матеріали дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ «ТехС» (м. Тернопіль) та УМГ «Прикарпаттрансгаз». Отримано патент України на корисну модель.

5. Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри конструювання верстатів інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету при вивченні дисциплін «Металообробне обладнання» та «Проектування верстатів та верстатних комплексів».

Особистий внесок здобувача. Основні результати теоретичних і експериментальних досліджень отримані дисертантом самостійно. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачем проведені наступні теоретичні дослідження: розроблені основи створення комплексного

самоналагоджувального оснащення для стабільного затиску і багаторізевої обробки деталей [4, 8, 9, 13] та здійснено моделювання його складових [2, 3, 21, 24]; розроблені аналітичні і комп'ютерні моделі прогнозування похибок обробки малошорстких деталей з використанням комплексного оснащення [1, 5-7, 10-12, 15, 16]; проведено оцінку ефективності використання комплексного технологічного оснащення адаптивного типу [14, 18, 19, 22, 23]. Здобувачем самостійно проведена основна частина експериментальних досліджень характеристик комплексного оснащення [4, 14, 17, 20]. При виконанні роботи у співавторстві отримано патент України на корисну модель [25].

Апробація матеріалів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи обговорювались на: 4-ій та 5-тій міжнародних науково-практичних конференціях «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (Україна, Херсон, 29-31 травня 2012 р. та 28-30 травня 2013 р.); 17-ій і 18-ій наукових конференціях ТНТУ ім. І. Пулюя (Україна, Тернопіль, 20-21 листопада 2013 р. та 29-30 жовтня 2014 р.); 5-тій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» (Україна, Херсон, 1-3 жовтня 2014 р.); 12-ому міжнародному симпозиумі українських інженерів-механіків у Львові (Україна, Львів, 28-29 травня 2015 р.); 13-тій міжнародній конференції «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» у Донбаській державній машинобудівній академії (Україна, Краматорськ, 2-4 червня 2015 р.); 6-тій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування» Херсонська державна морська академія (Україна, Херсон, 24-25 вересня 2015 р.); I-ій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу - 2015», Херсонський національний технічний університет (Україна, Херсон, вересень 2015р.); 3-ій та 5-ій всеукраїнських науково-технічних конференціях «Прогресивні технології машинобудування» (Україна, Львів, 2-6 лютого 2015 р. та 8-12 лютого 2016 р.); IV міжнародній науково-технічній конференції ТК-2016 (Україна, Луцьк, 26-28 травня 2016 р.); II-ій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні технології промислового комплексу - 2016», Херсонський національний технічний університет (Україна, Херсон, 14-18 вересня 2016 р.); всеукраїнській науково-практичній конференції «Обладнання та технології сучасного машинобудування», ТНТУ ім. І. Пулюя (Україна, Тернопіль, 11-12 травня 2017 р.); 8-ій міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», Херсонська державна морська академія (Україна, Херсон, 28-29 вересня 2017 р.); 6-ій міжнародній науково-технічній конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні» (Україна, Львів, 6-10 лютого 2018 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 25 друкованих праць, з них 7 – статей (одна – у закордонному виданні; 6 – у фахових наукових виданнях України, з них 3 – у журналах, що входять до міжнародних наукометричних баз даних EBSCO, Index Copernicus, Ulrichs Web, Google

Scolar) та 17 – матеріалів доповідей на конференціях. Отримано патент України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, 4 розділів, загальних висновків, списку використаних джерел (175 найменувань), 3 додатків. Повний зміст роботи викладений на 201 сторінці машинописного тексту, з них 160 сторінок основного тексту, 19 сторінок списку літератури, 9 сторінок додатків, 58 рисунків, 14 таблиць.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність роботи, сформульовано мету й задачі досліджень, представлено наукову новизну й практичну значимість отриманих результатів, наведено загальну структуру роботи.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану проблеми, визначення об'єкту, предмету, мети і завдання досліджень, проаналізовано методи підвищення точності обробки на токарних верстатах, зроблено аналіз відомих методів і пристроїв затиску заготовок під час обробки. Відзначено, що значний внесок у розробку та дослідження затискних пристроїв верстатів здійснили Кузнецов Ю.М., Іванюк І.О., Сидорко В.І., Литвин О.В., Кушик В.Г., Редько Р.Г., Волошин В.Н. (Україна), Вачев А.А, Сяров С.П., Недельчева П.М. (Болгарія), Schultz H., Wagner H.-D., Mette U., Spur G., Uhlmann F. (Німеччина), Хамуйела Ж.А. Герра (Ангола) та інші.

Визначено досягнення відомих вчених Соколовського А.П., Кудінова В.О., Вейца В.Л., Попова В.І., Рижова Е.В., Грановського Г.І., Родіна П.Р., Равської Н.С., Кузнецова Ю.М., Петракова Ю.В., Струтинського В.Б., Залози В.О., Ковальова В.Д., Мельничука П.П., Шевченка О.В., Данильченка Ю.М., Нагорняка С.Г., Драчова О.І., Луціва І.В. та ін., що займалися проблемами жорсткості технологічної оброблювальної системи (ТОС), особливостями динаміки процесу різання, її зв'язками з пружною системою верстату, моделюванням і керуванням обробними процесами при різанні. Проведений огляд робіт, що стосуються традиційного багатолезового оснащення та конструкції багаторізцевого обладнання.

У **другому розділі** проаналізовано системи стабільного затиску заготовок на токарних верстатах, визначені складові самоналагоджувального комплексного оснащення для токарної обробки і їх характеристики (рис. 1).

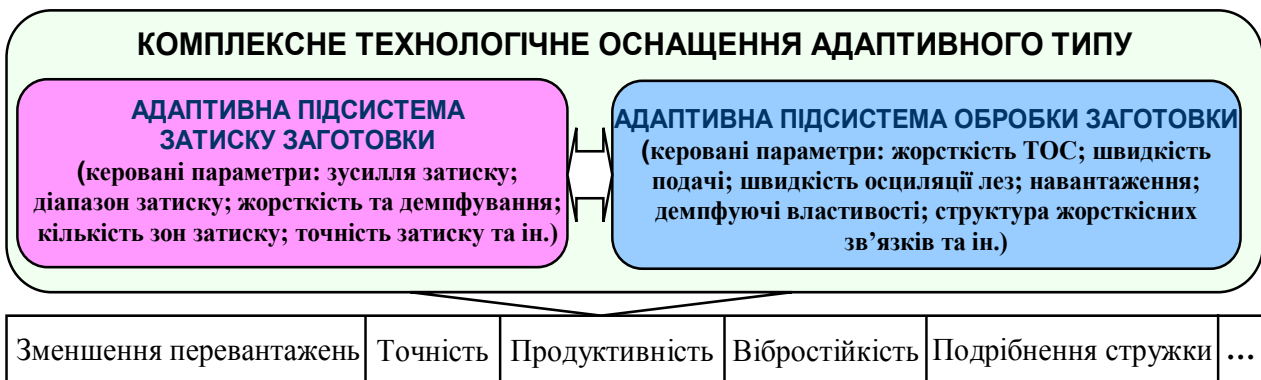


Рис. 1. Складові комплексного самоналагоджувального оснащення

Встановлено, що точність отримання деталі певної форми та розмірів при токарній обробці забезпечується формоутворюючою системою токарного верстату шляхом накладання похибок положення ланок формоутворюючої системи на номінальні траєкторії руху ланок.

Визначено, що оцінка впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення на вихідну точність поверхонь, оброблюваних на токарному верстаті передбачає їх декомпозицію. Так, ці похибки можна розбити на дві групи: похибки, що виникають в затискному пристрої і похибки, що виникають при використанні багатолезового оснащення (рис. 2).



Рис. 2. Похибки складових комплексного самоналагоджувального оснащення

Розглянемо детальніше складові елементи комплексного оснащення. В результаті аналізу досліджень основних характеристик пристроїв для затиску заготовок токарних верстатів та процесів, які в них відбуваються, можна виділити адаптацію затискних пристроїв для забезпечення необхідної жорсткості системи затиску (забезпечення однакового радіального зміщення деталі в різних положеннях різального інструменту; забезпечення однакової радіальної жорсткості затискного пристрою в різних кутових положеннях та ін.). Зокрема, щодо пристроїв для затиску заготовок з рівномірним розподілом зусилля затиску, то механізми затиску із різною схемою замикання сил затиску по контуру деталі можуть передбачати компенсацію радіального биття і зменшення конусності при певному вильоті заготовки. Найкращим з точки зору забезпечення показників точності затиску та незмінності радіальної жорсткості по куту повороту є варіант затискного пристрою із закритим замкнутим силовим контуром.

Щодо іншого компоненту комплексного оснащення, то дворізцеві системи із пристроями самоналагодження у вигляді міжінструментального зв'язку (МІЗ)

забезпечують вирівнювання осьових, а значить і радіальних складових зусиль різання від різних різців.

В ідею їх конструкцій покладено те, що з метою регулювання перехідних процесів різання забезпечено узгодження між швидкістю подачі, яку забезпечує привід, і швидкостями подачі лез різальних елементів. При цьому існує можливість створення в структурі верстатно-інструментального оснащення внутрішніх механізмів адаптації всієї системи до умов різання.

Коливання різальних елементів в напрямку подачі можна задати налагодженням зв'язків між лезами (кінематичного чи електромеханічного типу), або умовами різання, і отримати вимушені взаємопов'язані зворотно-поступальні переміщення різальних лез. При цьому різальні елементи встановлюються опозитно один до одного (при дворізцевій обробці) або ж симетрично по периметру січення заготовки (при трирізцевому точінні) і, таким чином, вирівнюють дію один одного щодо виникнення радіальних відтискань заготовки. В даному випадку принциповим фактором є те, що головні різальні леза інструментів знаходяться в одному січення зрізу і зрізають один і той же шар оброблюваного матеріалу. Таким чином, за допомогою зміни подачі в якості параметра керування можна організувати надзвичайно тонкий і чутливий механізм регулювання пружних переміщень. Зміна ж подачі, пов'язана із зміщеннями вздовж напрямку подачі (осі X) не впливає негативно на якість поверхні.

В роботі проведено моделювання оцінки впливу похибок комплексного самоналагоджувального технологічного оснащення.

Векторний баланс точності токарного верстату із комплексним самоналагоджувальним технологічним оснащенням можна представити залежністю

$$\Delta \bar{r}_0 = \varepsilon_0 A_1^6 A_2^3 A_3^1 \bar{r}_3 + A_1^6 \varepsilon_1 A_2^3 A_3^1 \bar{r}_3 + A_1^6 A_2^3 \varepsilon_2 A_3^1 \bar{r}_3 + A_1^6 A_2^3 A_3^1 \varepsilon_3 \bar{r}_3, \quad (1)$$

де ε_i ($i=0,1,2,3$) - матриця повної похибки положення i -ої ланки формоутворюючої системи; A_1^6 , A_2^3 , A_3^1 - матриці, що описують, відповідно, обертання шпинделя, переміщення поздовжнього і поперечного супортів; \bar{r}_3 - радіус вектор вершини різця.

Для оцінки впливу похибок затискного пристрою із заготовкою та різцевих блоків багатолезового самоналагоджувального оснащення на похибки оброблюваної деталі, прийнято похибки всіх решти ланок і підланок формоутворюючої системи і їх відносні переміщення абсолютно точними. Тоді залежність для визначення похибки положення точок оброблюваної поверхні описано вектором: $\Delta \bar{r}_0 = \varepsilon_0 A_1^6 A_2^3 A_3^1 \bar{r}_3 + A_1^6 A_2^3 A_3^1 \varepsilon_3 \bar{r}_3$.

Підставивши відповідні матриці та перемноживши за правилами матричного аналізу, отримано вектор похибок:

$$\Delta \bar{r}_0 = \begin{pmatrix} -(\gamma_0 R + \delta_{y3}) \sin \varphi + \delta_{x3} \cos \varphi + \beta_0 \cdot z + \delta_{x0} \\ \delta_{x3} \sin \varphi + (\gamma_0 R + \delta_{y3}) \cos \varphi - \alpha_0 \cdot z + \delta_{y0} \\ -\beta_0 \cdot R \cdot \cos \varphi + \alpha_0 \cdot R \cdot \sin \varphi + \delta_{z0} + \delta_{z3} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

де R - віддаль від осі обертання заготовки до вершин різців різцевих блоків; $\delta_{x0}, \delta_{y0}, \delta_{z0}$ - малі лінійні переміщення (лінійні похибки положення) затискного пристрою; $\delta_{x3}, \delta_{y3}, \delta_{z3}$ - малі лінійні переміщення (лінійні похибки положення) інструментального дворізцевого блоку; $\alpha_0, \beta_0, \gamma_0$ - малі повороти (кутові похибки положення) затискного пристрою; φ - кут повороту затискного пристрою; z - координата вершин різця різцевого блоку.

Оцінку вихідної точності циліндричної поверхні деталі, зумовлену похибками складових комплексного самоналагоджувального оснащення, здійснено за відхиленням радіуса циліндра в даній точці від номінального. В якості граничних оцінок можуть служити дві величини коливання діаметра: в заданому перерізі і в будь-якому перерізі.

Векторний баланс точності для циліндричної поверхні деталі в нормальному напрямку визначено за залежністю:

$$\Delta r_n = (\beta_0 z + \delta_{x0} + \delta_{x3} \cos \varphi) \cos \varphi - (\alpha_0 z + \delta_{y0} + \delta_{y3} \cos \varphi) \sin \varphi. \quad (3)$$

Із отриманої залежності випливає, що на точність циліндричної поверхні в заданому перерізі або в будь-якому перерізі впливають тільки малі зміщення вздовж осей X і Y та малі кути повороту навколо цих осей.

Оцінку впливу пружних похибок комплексного оснащення можна провести згідно відомої розрахункової схеми пружної системи патрон-заготовка при однорізцевій обробці і розрахункової схеми пружної системи патрон-заготовка в поперечному перетині при дворізцевій обробці (рис. 3).

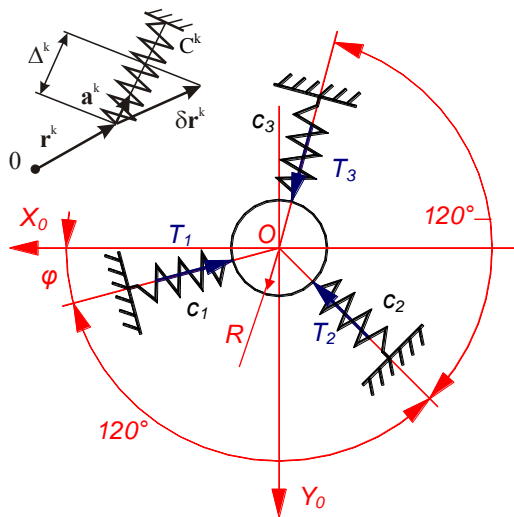


Рис. 3. Розрахункова схема пружної системи патрон-заготовка в поперечному перетині при дворізцевій обробці

Деталь, защемлену в кулачках, можна вважати жорстким циліндричним тілом, яке опирається на дискретні пружні односторонні опори, що моделюють приведену жорсткість стиків затискних елементів. Умова рівноваги системи:

$$C_0 \cdot \bar{\Delta}_0 = \bar{F}_0, \quad (4)$$

де C_0 - симетрична матриця жорсткості, $\bar{\Delta}_0 = (\delta_{x0}, \delta_{y0}, \delta_{z0}, \alpha_0, \beta_0, \gamma_0)^T$ - вектор похибки системи координат деталі в результаті контактних деформацій стиків; $\bar{F}_0 = (F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z)^T$ - вектор узагальненого навантаження.

В результаті визначення елементів матриці жорсткості отримано:

$$c_{11} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{xk}^2 = c_1 \cos^2 \varphi + c_2 \cos^2 (\varphi + 120^\circ) + c_3 \cos^2 (\varphi + 240^\circ);$$

$$c_{22} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{yk}^2 = c_1 \sin^2 \varphi + c_2 \sin^2 (\varphi + 120^\circ) + c_3 \sin^2 (\varphi + 240^\circ);$$

$$c_{12} = c_{21} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{xk} a_{yk} = c_1 \cos\varphi \sin\varphi + c_2 \cos(\varphi + 120^\circ) \sin(\varphi + 120^\circ) + \\ + c_3 \cos(\varphi + 240^\circ) \sin(\varphi + 240^\circ),$$

де c_k – жорсткість k -ої опори ($k=1,2,3$); a_{xk}, a_{yk}, a_{zk} – компоненти одиничного вектора напрямку осі k -ї опори \bar{a}_k .

Решта елементів матриці жорсткості C_0 дорівнюють нулю.

Елементи вектора силового навантаження:

$$F_y = -T_1 \sin\varphi - T_2 \sin(\varphi + 120^\circ) - T_3 \sin(\varphi + 240^\circ); \\ F_x = -T_1 \cos\varphi - T_2 \cos(\varphi + 120^\circ) - T_3 \cos(\varphi + 240^\circ),$$

де T_1, T_2, T_3 – сили затиску кулачками затискного патрона.

Решта елементів вектора узагальненого навантаження дорівнюють нулю.

Таким чином, система рівнянь для визначення малих лінійних і кутових зміщень внаслідок поперечного заклинювання заготовки в затискному пристрої має вигляд:

$$\begin{cases} c_{11}\delta_{x0} + c_{12}\delta_{y0} = -T_1 \cos\varphi - T_2 \cos(\varphi + 120^\circ) - T_3 \cos(\varphi + 240^\circ); \\ c_{21}\delta_{x0} + c_{22}\delta_{y0} = -T_1 \sin\varphi - T_2 \sin(\varphi + 120^\circ) - T_3 \sin(\varphi + 240^\circ). \end{cases} \quad (5)$$

Із даної системи рівнянь визначаються малі лінійні зміщення деталі δ_{x0}, δ_{y0} . При поперечному заклинюванні кутові зміщення $\alpha_0=0, \beta_0=0$.

Визначене також мале лінійне переміщення, яке викликане деформаціями різцевих блоків під дією радіальних складових сил різання. При дворізцевій паралельній токарній обробці за методом поділу подачі різці знаходяться в одному січенні зрізу, зусилля різання вирівняні і деформації власне заготовки усунуті. Різцевий блок можна вважати жорстким тілом, яке опирається на дискретні пружні односторонні опори, що моделюють приведену радіальну жорсткість стиків у напрямних та приведену радіальну жорсткість стиків приводу їх поперечних налагоджувальних переміщень.

При визначенні матриці повної похибки положення різцевого блоку прийнято наступні припущення: зміщення і кути повороту елементів системи малі; власна жорсткість різцевого блоку набагато більша від контактної жорсткості стиків; лінійна залежність зміщень від навантаження в діапазоні діючих зусиль. Оцінку впливу похибок технологічного оснащення проведено, використовуючи розрахункову схему рис. 4.

Умова рівноваги системи, записана через вектор узагальненої похибки системи координат різцевих блоків в результаті контактних деформацій їх стиків $C_3 \cdot \bar{\Delta}_3 = \bar{F}_3$, де C_3 – симетрична матриця жорсткості; F_3 – вектор узагальненого навантаження; $\bar{\Delta}_3 = (\delta_{x3}, \delta_{y3}, \delta_{z3}, \alpha_3, \beta_3, \gamma_3)^T$ – вектор похибки системи координат різцевих блоків в результаті контактних деформацій стиків.

Враховуючи вихідні дані для розрахунку вектора похибок, отримано елементи матриці жорсткості (c_i^b – жорсткість i -ої ($i=1,2,3$) опори різцевого блоку; геометричні параметри l_1, l_2, b_3 показані на рис. 4):

$$c_{11} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{xk}^2 = c_3^b; \quad c_{22} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{yk}^2 = c_1^b + c_2^b; \quad c_{16} = c_{61} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{xk} m_{zk} = c_3^b b_3;$$

$$c_{26} = c_{62} = \sum_{k=1}^3 c_k a_{yk} m_{zk} = c_1^b l_1 + c_2^b l_2; \quad c_{66} = \sum_{k=1}^3 c_k m_{zk}^2 = c_1^b l_1^2 + c_2^b l_2^2 + c_3^b b_3^2.$$

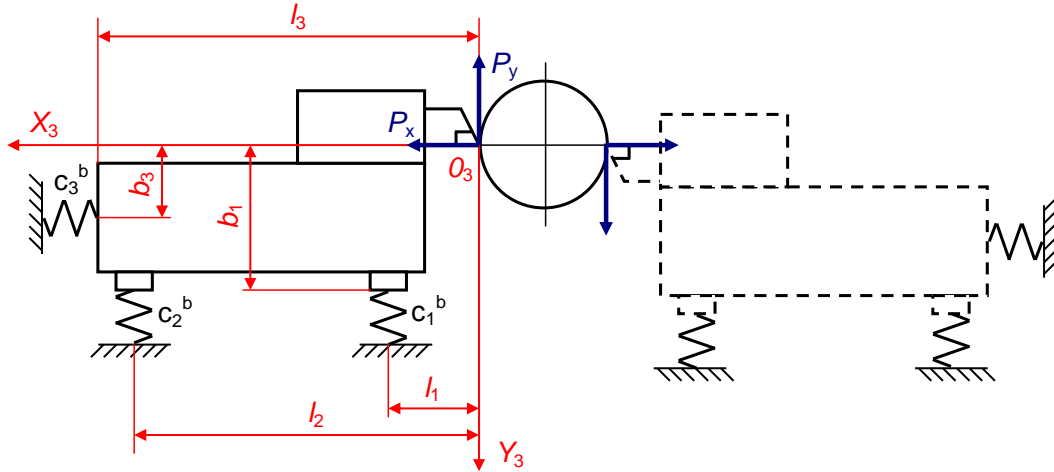


Рис. 4. Розрахункова схема пружної системи різцевих блоків

Решта елементів матриці жорсткості C_3 дорівнюють нулю.

Система рівнянь для визначення малих лінійних і кутових зміщень різцевого блоку

$$\begin{cases} c_{11}\delta_{x3} + c_{16}\gamma_3 = P_x; \\ c_{22}\delta_{y3} + c_{26}\gamma_3 = -P_y; \\ c_{16}\delta_{x3} + c_{26}\delta_{y3} + c_{66}\gamma_3 = 0, \end{cases} \quad (6)$$

де P_x, P_y - силові фактори відповідно до рис. 4; γ_3 - малий поворот (кутова похибка положення) різцевого блоку.

Із даної системи рівнянь визначено δ_{x3} та γ_3 .

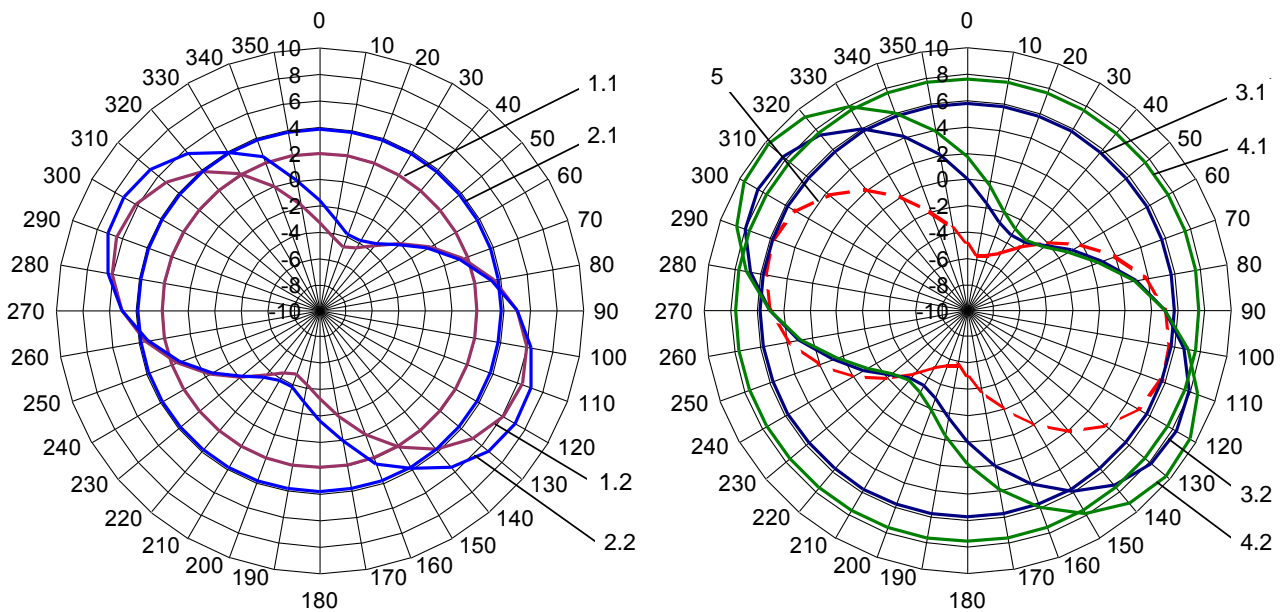


Рис. 5. Вплив похибок комплексного самоналаджувального оснащення на вихідну точність циліндричної поверхні

Результати моделювання впливу похибок комплексного самоналагоджувального оснащення на вихідну точність циліндричної поверхні представлені на діаграмах (рис.5). На діаграмах показані відхилення радіуса циліндра (мкм) при різних кутових положеннях затискного елемента (ЗЕ) в град.: 1.1, 2.1, 3.1, 4.1 – при P_x відповідно 100 Н, 200 Н, 300 Н, 400 Н та рівних силах затиску ЗЕ $T_1=T_2=T_3=10$ кН; 1.2, 2.2, 3.2, 4.2 – при P_x відповідно 100 Н, 200 Н, 300 Н, 400 Н та силах затиску ЗЕ $T_1=10$ кН; $T_2=9$ кН; $T_3=9,5$ кН; 5 – викликане тільки затискним пристроєм при силах затиску ЗЕ $T_1=10$ кН; $T_2=9$ кН; $T_3=9,5$ кН.

У третьому розділі проведено аналіз динамічної поведінки верстатно-інструментального оснащення адаптивного типу при багаторізцевій обробці, структурну схему якого можна зобразити умовно узагальненою блок-схемою, показаною на рис. 6,а. Забезпечення рухомості x_1 та x_2 різальних елементів багаторізцевого оснащення адаптивного типу в напрямку подачі, а, отже, варіювання миттєвих подач цих елементів, призводить до необхідної зміни товщин зрізаного шару Δa_1 , Δa_2 . При цьому досягається вирівнювання зусиль різання P_1 та P_2 , а отже і їх радіальних складових, які деформують (у) оброблювану деталь. В результаті цієї адаптації відбувається компенсація похибок еквівалентної пружної системи (ЕПС) при обробці.

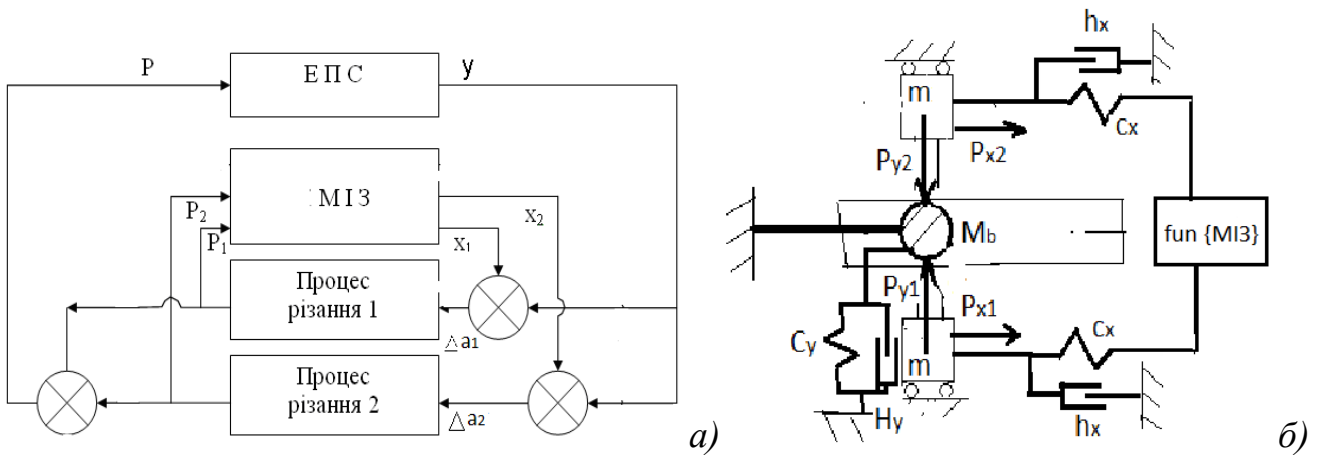


Рис. 6. Блок-схема (а) структури дворізевого оснащення адаптивного типу з міжінструментальним зв'язком (МІЗ) і його динамічна розрахункова схема (б)

В результаті використання складених рівнянь математичної моделі функціонування дворізевого оснащення (схема рис. 6,б) з врахуванням представлення його як системи автоматичного керування, знаходимо передаточну функцію розімкнутої системи дворізевого оснащення для підсистеми шпindel-патрон-заготовка при обробці мало жорстких деталей:

$$W = \frac{2\mu_{mp}(\cos\varphi_{II})^2 k_p S(mS + h_x)}{[S(mS + h_x)(1 + [T_p]S) + \mu_{mp}(\sin\varphi_{II})^2 k_p][M_b S^2 + H_y S + 1/\delta_{11}]}, \quad (7)$$

де k_p – коефіцієнт різання відповідно до динамічної характеристики процесу різання за В.О. Кудиновим, $[T_p]$ – постійна часу стружкоутворення на кожному різці; M_b і H_y – інерційна та дисипативна характеристики еквівалентної пружної системи; $\delta_{11}=1/c_y$ – приведена податливість системи; m і h_x – відповідно

інерційна та демпфувальна характеристики різальних блоків, c_x – приведена осьова жорсткість елементів МІЗ, які забезпечують вирівнювання осевих навантажень; $\mu_{тр}$ та φ_{II} – коефіцієнт тертя стружки до передньої поверхні та головний кут в плані різця, S - оператор Лапласа. Функція $\text{fun}\{\text{МІЗ}\}$ виконує процедуру: осьові переміщення різальних елементів при їх осциляції є рівними за величиною і протилежними за знаком.

Після певних перетворень вказаної розімкнутої передаточної функції отримані значення для дійсної Re та уявної Im частин амплітудної фазо-частотної характеристики (АФЧХ) розглядуваної нами динамічної системи комплексного оснащення. На основі проведеного аналізу побудованих АФЧХ для дворізевої обробки з використанням комплексного оснащення у порівнянні із традиційним однорізцевим різанням встановлено, що відрізок, який відтинається АФЧХ на від'ємній частині осі Re менший від відповідного відрізка для випадку однорізевої обробки, а відповідний запас динамічної стійкості зростає у 1,5-4,1 рази в залежності від умов обробки нежорстких деталей.

В роботі також побудована комп'ютерна модель напружено-деформованого стану пристроїв для затиску заготовок з рівномірним розподілом зусилля затиску. Для різних варіантів конструктивного виконання втулкових елементів затиску проведені розрахунки з використанням CAD/CAE-системи.

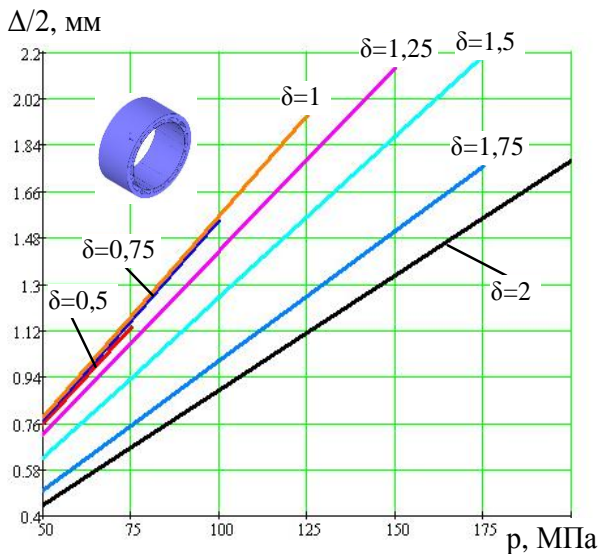


Рис. 7. Результати моделювання втулкового затискного елемента, який забезпечує максимальний діапазон затиску

втулкового затискного елемента, який забезпечує максимальний діапазон затиску, при різних значеннях товщини його стінки δ .

У четвертому розділі проведені результати експериментальних досліджень процесу стабільного затиску заготовок. Для досліджень був обраний затискний токарний патрон гідравлічного типу із рівномірно розподіленим зусиллям затиску (рис. 8).

Процедура такого розрахунку передбачає побудову 3-D моделі втулкового затискного елемента, генерацію кінцево-елементної сітки, накладання граничних умов, формування навантаження. В результаті комп'ютерного моделювання отримано картини деформаційних зміщень і картини напруженого стану втулкових затискних елементів.

Після обробки отриманих даних побудовані залежності діапазону затиску від товщини стінки різних конструкцій втулкових елементів затиску та гідравлічного тиску у їх порожнинах. На рис. 7 приведені результати моделювання для

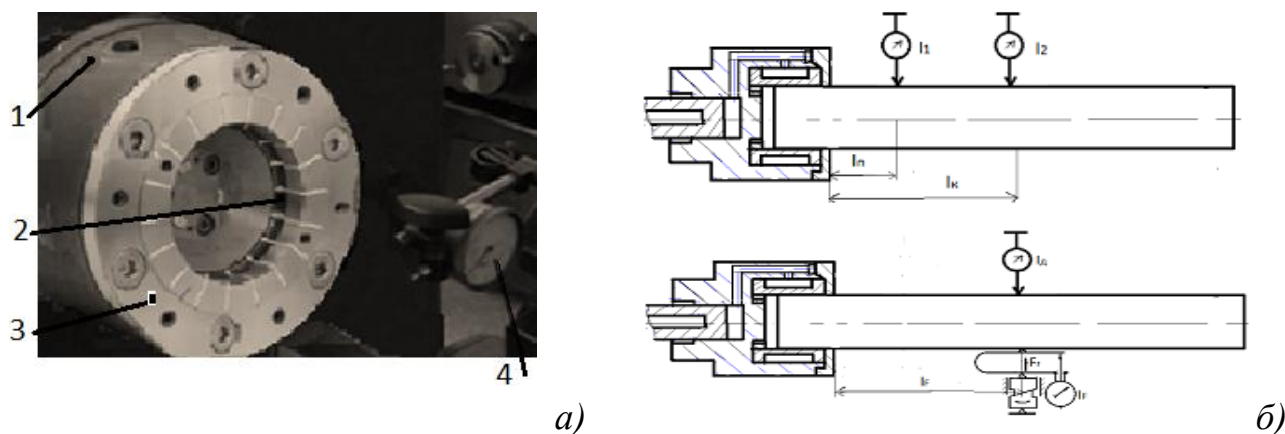


Рис. 8. Експериментальний патрон (а) для вимірювання параметрів затиску і схеми вимірювань (б) радіального биття, конусності та радіальної жорсткості

У корпусі 1 токарного патрону виготовлена порожнина гідравлічного циліндра, у якій рухається в осьовому напрямку поршень, що викликає затискні деформації елементів 2 у вигляді пружних втулок, що фіксуються у корпусі кришкою 3. Роль заготовок відігравали дослідні оправки; радіальні переміщення вимірювались за допомогою індикаторів 4. Дослідження показали, що радіальне биття експериментального патрона зменшується у 1,63-1,74 рази у порівнянні із трикулачковим патроном залежно від коефіцієнту відносної жорсткості заготовки l/d при практично ідентичній конусності. Що стосується радіальної жорсткості пружної системи патрон-оправка, то ця характеристика для патрона із рівномірним затиском збільшується у порівнянні із аналогічними показниками традиційного трикулачкового патрона в 1,33-1,59 рази.

Одночасно проводились експериментальні дослідження впливу багаторізевої обробки на точність обробки деталей при застосуванні самоналагодження процесу (рис. 9). Експериментальні дослідження параметрів точності геометричної форми проводилися з допомогою профілометра-профілографа мод. 296 та кругломіра ВЕ-20А.

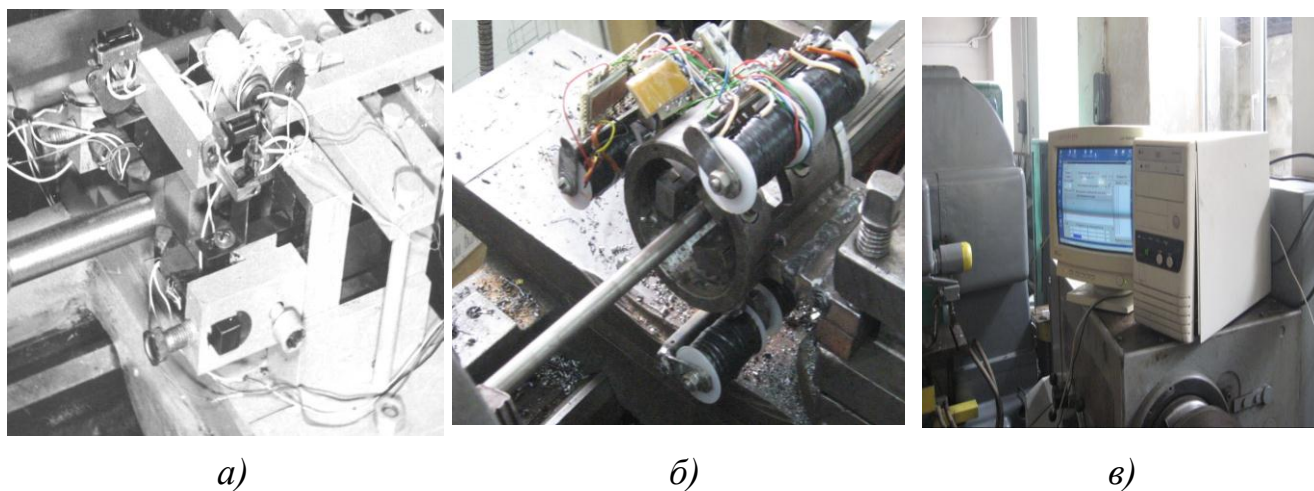


Рис. 9. Фото експериментального стенду для дослідження переміщень елементів багаторізевого токарного пристрою адаптивного типу (а), багаторізевої головки (б), встановленої на токарно-гвинторізному верстаті мод. 16К20 та використовуваного комп'ютерного обладнання (в)

В цілому вони довели працездатність дворізцевого пристрою та добру відповідність результатів теоретичних та експериментальних досліджень (похибка складає 10-30%).

Оцінка макропохибок в поперечному січенні при дворізцевій обробці показала, що зокрема, при обробці довгого нежорсткого вала діаметром 20мм при подачі супорта 0,42 мм/об в діапазоні оброблюваних діаметрів 120-180мм радіальні похибки зменшувались в 1,33-3,44 рази. Спостерігалось зменшення шорсткості отриманої поверхні в 1,7 рази та ефективно подрібнення зливної стружки в процесі різання. Крім того, можна досягти збільшення продуктивності обробки в середньому у 2,4 рази.

В дисертаційній роботі розроблені рекомендації щодо раціонального використання комплексного самоналагоджувального оснащення затиску і обробки при багаторізцевому різанні. Проведено обґрунтування рекомендацій щодо використання дворізцевого комплексного оснащення при обробці деталей кільцевого типу, яке забезпечує рівність радіальних і тангенціальних складових сил різання. Запропоновано методику визначення похибки форми кільцевих деталей, яка враховує вплив сил різання при обробці дворізцевим оснащенням та сил реакції в стикі між заготовкою і затискними елементами. Її основою стали теоретичні підходи до визначення деформації кільцевих заготовок при зовнішньому навантаженні силами затиску та внутрішніми навантаженням, викликаними силами різання, що виникають при обробці багаторізцевим самоналагоджувальним оснащенням (рис.10).

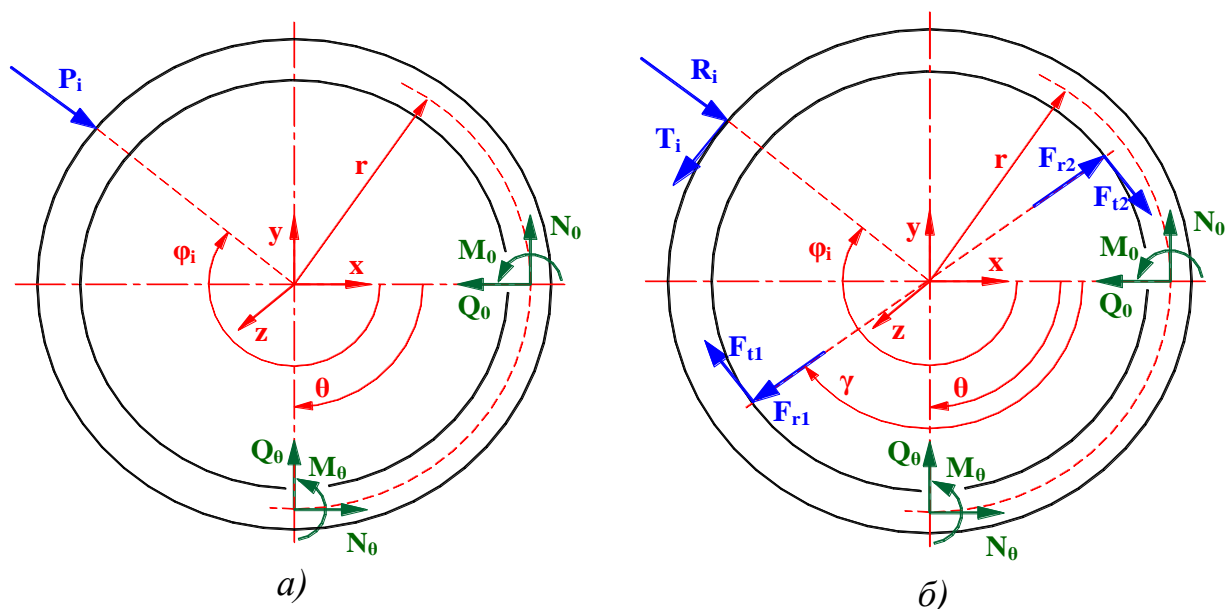


Рис. 10. Навантаження затискного елемента при затиску заготовки кільцевого типу (а) та сили різання і відповідні сили реакцій на затискних елементах при дворізцевому розточуванні (б)

Умови рівноваги при дії на кільце складових сил різання F_{r1} , F_{r2} , F_{t1} , F_{t2} від дворізцевого інструментального оснащення та індукованих на n кулачках радіальних та тангенціальних сил R_i , T_i мають вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum F_x = \sum_{i=1}^n R_i \sin \varphi_i + \sum_{i=1}^n T_i \cos \varphi_i - F_{r1} \sin \gamma - F_{r2} \sin(\gamma + \pi) - F_{t1} \cos \gamma - F_{t2} \cos(\gamma + \pi) = 0; \\ \sum F_y = \sum_{i=1}^n R_i \cos \varphi_i + \sum_{i=1}^n T_i \sin \varphi_i - F_{r1} \cos \gamma - F_{r2} \cos(\gamma + \pi) + F_{t1} \sin \gamma + F_{t2} \sin(\gamma + \pi) = 0; \\ \sum M_z = -F_{t1} r_{\theta n} - F_{t2} r_{\theta n} + \sum_{i=1}^n T_i r_{\theta n} = 0. \end{array} \right. \quad (8)$$

В результаті розв'язку отримано сили реакцій на кулачках від дії сил різання дворізецевого інструментального оснащення. Після цього отримано деформації кільця під зовнішнім навантаженням від сил затиску P_i затискними елементами та індукованих на кулачках радіальних та тангенціальних сил R_i , T_i . Дана методика дозволяє за кінцевим профілем після обробки дворізецевим самоналагоджувальним оснащенням і прогнозуючій моделі сил реакції затискних елементів визначати мінімальну кількість ЗЕ та діапазон прийнятних сил затиску, що гарантує необхідний допуск круглості кільцевих циліндричних деталей, забезпечуючи їх надійний затиск під час обробки.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В дисертації вирішено науково-прикладну задачу розроблення та практичної реалізації багаторізецевого оснащення адаптивного типу у комплексі із затискними патронами з розширеним діапазоном і рівномірно розподіленим зусиллям затиску, що дозволяє підвищити ефективність токарної обробки деталей малої жорсткості.

1. Аналіз проблеми підвищення ефективності токарної обробки деталей малої жорсткості показав, що об'єднання в одній комплексній системі рівномірного затиску і багатолезового різання адаптивного типу підвищеної продуктивності і вібростійкості дозволить досягнути ряду позитивних ефектів, зокрема підвищення точності обробки, її ефективності і якості, подрібнення зливної стружки.

2. Розроблені конструкційні схеми комплексного самоналагоджувального оснащення із дворізецевими системами з вирівнюванням зусиль різання адаптивного типу та затискними пристроями із розширеним діапазоном і рівномірно розподіленим зусиллям затиску для токарної обробки деталей малої жорсткості.

3. На основі варіаційного методу розрахунку точності машин розроблена аналітична модель, яка дозволила провести оцінку впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення, що виникають в результаті силової дії зі сторони процесу різання та затискного пристрою, на вихідну точність оброблюваних циліндричних поверхонь консольно закріплених деталей малої жорсткості.

4. Отримані залежності для визначення малих лінійних зміщень і кутів повороту, викликаних поперечним заклинюванням заготовки в затискному патроні та малих лінійних зміщень, викликаних деформаціями різцевих блоків під дією складових сил різання.

5. Отримані відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по куту повороту, що враховують малі лінійні зміщення і кути повороту, викликані поперечним заклинюванням заготовки в затискному патроні та малі лінійні зміщення, викликані деформаціями різцевих блоків під дією складових сил різання. За результатами моделювання встановлено постійність відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по довжині у певних кутових положеннях, що свідчить про доцільність застосування багатолезового самоналагоджувального технологічного оснащення. В результаті комп'ютерного моделювання встановлено зміну у 1,52 рази максимального відхилення радіуса реальної циліндричної поверхні від номінальної при зміні радіальної сили різання від 100 до 400 Н та різниці сил затиску на затискних елементах до 1 кН.

6. В результаті комп'ютерного моделювання з використанням CAD/CAE-системи отримані залежності діапазону затиску заготовок затискними патронами з рівномірним розподілом сил затиску для різного типу втулкових елементів затиску від товщини стінки і силового навантаження зі сторони приводу затиску та отримано картини їх напружено-деформованого стану. Визначено максимальні переміщення затискної частини втулкових елементів затиску, виходячи із умови здійснення пружних деформацій матеріалу елемента затиску. Для втулкового елемента затиску, який забезпечує максимальний діапазон затиску, вони складають 0,45-2,2 мм при товщині стінки 1,5 мм.

7. На основі аналізу динамічної стійкості багатолезової системи самоналагоджувальної обробки підтверджено підвищення стійкості проти автоколивань при багаторізцевій обробці з рівномірним затиском заготовок порівняно із однолезовою. Моделювання показує, що запас динамічної стійкості зростає у 1,5-4,1 рази залежно від умов обробки нежорстких деталей.

8. Експериментальні дослідження показали, що радіальне биття експериментального патрона зменшується у 1,63-1,74 рази залежно від коефіцієнту відносної жорсткості заготовки l/d при практично ідентичній конусності. Що стосується радіальної жорсткості пружної системи патрон-оправка, то ця характеристика для патрона із рівномірним затиском збільшується у порівнянні із трикулачковим патроном в 1,33-1,59 рази. При випробуваннях комплексного самоналагоджувального оснащення виявлені позитивні ефекти збільшення продуктивності обробки у 2,4 рази, зменшення радіальних похибок в середньому у 1,33-3,44 рази, шорсткості поверхні обробки у 1,7 рази, подрібнення стружки. Результати експериментальних досліджень підтвердили теоретичні розрахунки, проведені за допомогою комп'ютерного моделювання.

9. Окремі матеріали дисертаційної роботи впроваджені на ТОВ «ТеХС» (м. Тернопіль) та УМГ «Прикарпаттрансгаз». Отримано патент України на корисну модель. Результати роботи використовуються у навчальному процесі кафедри конструювання верстатів інструментів та машин Тернопільського національного технічного університету.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Фахові видання та публікації в закордонних збірниках

1. Lutsiv I. Ring-shaped parts form accuracy improvement in lathe machining using complex self adjusting equipment / Ihor Lutsiv, Vitaliy Voloshyn, Valeriy Buhovets // Professional Studies: Theory and Practise. Technological Sciences. Siauliai State College. Tallinn University of Applied Sciences. Lithuania.- 2016/1 (16). - P. 80-85. *(Здобувачем запропоновано аналітичну модель для прогнозування похибки форми кільцевих циліндричних деталей при розточуванні дволезовим самоналагоджувальним інструментальним оснащенням з врахуванням системи затиску; для підвищення точності обробки запропоновані нові затискні патрони. Індексується в міжнародній наукометричній базі EBSCO databases).*

Публікації у фахових виданнях України

2. Луців І.В. Комп'ютерне моделювання складових самоналагоджувального комплексного оснащення для токарної обробки / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М.Буховець // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2012. - Випуск 746. - С. 28-31. *(Здобувачем досліджено з використанням комп'ютерного моделювання діапазон затиску гідравлічного затискного патрона із різними типами втулкових затискних, а також отримано амплітудно-фазові частотні характеристики системи багатолезової обробки з гідравлічними затискним патроном).*

3. Луців І.В. Комп'ютерний аналіз підсистем затиску та самоналагоджувального оснащення для багатолезової обробки адаптивного типу / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Науковий Вісник Херсонської державної морської академії. – 2013. - Випуск 2(9). – С. 183-190. *(Здобувачем досліджено напружено-деформований стан втулкових затискних елементів гідравлічного затискного патрона та отримано в результаті моделювання діаграми вібростійкості багатолезової системи для токарної обробки).*

4. Кінематичне подрібнення стружки і гнучкість затиску комплексного технологічного оснащення адаптивного типу / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець, О.О. Стахурський // Науковий Вісник Херсонської державної морської академії. – 2015 – Випуск 2(13). - С. 193-201. *(Здобувачем запропонована система комплексного технологічного оснащення адаптивного типу для багатолезової обробки, охарактеризовано її підсистеми).*

5. Луців І. В. Оцінка впливу похибок комплексного само налагоджувального оснащення на точність оброблювальних циліндричних поверхонь / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Вісник національного університету «Львівська політехніка». Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2016. - Випуск 839. - С.

80-85. *(Здобувачем проведено оцінку впливу похибок комплексного самоналагоджувального оснащення, які виникають в результаті силової дії зі сторони процесу різання та затиску, на вихідну точність оброблюваних деталей).*

6. Lutsiv I. Definition of component elements position errors of integrated self-adjusting equipment for turning. / I. Lutsiv, V. Voloshyn, V. Buhovets // Technological complexes. Scientific journal. Lutsk National Technical University. - 2016. - №1 (13). - P. 98-105. *(Здобувачем з використанням варіаційного методу розрахунку точності машин проведено оцінку впливу узагальнених похибок від деформаційних зміщень заготовки у затискному пристрої та різцевих блоків самоналагоджувального оснащення на вихідну точність поверхонь. Індeksuється в міжнародній наукометричних базах Index Copernicus, Ulrichs Web, Google Scholar).*

7. Lutsiv Ihor. Shape forming system model of lathes two-carriage tool systems/ Ihor Lutsiv, Vitaliy Voloshyn, Valeriy Buhovets // Scientific journal of the Ternopil national technical university. - 2018. - №3 (91). – P. 80-87. *(Здобувачем запропоновані комбінації формоутворення токарних верстатів з двосупортними інструментальними системами. Індeksuється в міжнародній наукометричній базі Index Copernicus).*

Тези конференцій та семінари

8. Луців І.В. Самоналагоджувальне комплексне оснащення адаптивного типу для високопродуктивної високоточної токарної обробки / І.В. Луців, В. Н. Волошин, В. М. Буховець // IV Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», 29-31 травня 2012 р.: тези допов. – Херсон, 2012. - Т.2. – С. 96. *(Здобувачем запропоновано структуру оснащення).*

9. Луців І.В. Багатолезові мехатронні самоналагоджувальні системи затиску і обробки / І.В. Луців, В. Н. Волошин, В.М. Буховець // V Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті», 28-30 травня 2013 р.: тези допов. – Херсон, 2013. - Т.2. – С. 125. *(Здобувачем охарактеризовані складові частини мехатронних само-налагоджувальних систем затиску і обробки).*

10. Луців І.В. Моделювання похибки форми тонкостінних циліндричних деталей при обробці багатолезовим самоналагоджувальним оснащенням оптимальним затиском / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // 5-та Міжнародна науково-практична конференція. «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», 1-3 жовтня 2014 р.: тези допов. – Херсон, 2014. - С. 218. *(Здобувачем запропонована модель похибки форми багатолезового оснащення з оптимальним затиском.)*

11. Луців І.В. Формування похибки форми при обробці кільцевих заготовок багатолезовим самоналагоджувальним оснащенням з урахуванням системи затиску / І.В. Луців, В.Н. Волошин., В.М. Буховець // Матеріали III Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та студентів

«Актуальні задачі сучасних технологій», 19-20 листопада 2014 р.: тези допов. – Тернопіль, ТНТУ, 2014. – С. 115-116. *(Здобувачем запропонований порядок обчислення похибки форми з урахуванням системи затиску при обробці кільцевих заготовок з використанням багатолезового оснащення).*

12. Луців І.В. Вплив системи затиску на похибку форми при обробці кільцевих заготовок багатолезовим самоналагоджувальним оснащенням / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Збірник наукових праць III всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології машинобудування», 2-6 лютого 2015 р. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2015. – С. 72-74. *(Здобувачем запропонована характеристика впливу багатолезового самоналагоджувального оснащення на похибку форми оброблених кільцевих заготовок).*

13. Луців І.В. Комплексне самоналагоджувальне оснащення для токарної обробки / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Тези доповідей 12-ого Міжнародного симпозіуму українських інженерів-механіків у Львові, 28-29 травня 2015 р.: тези доп. – Львів: КІНПАТРИ ЛТД, 2015. – С. 88-89. *(Здобувачем визначені характеристики складових частин комплексного самоналагоджувального оснащення).*

14. Обробка з кінематичним подрібненням стружки при використанні комплексного технологічного оснащення адаптивного типу. / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець, О.О. Стахурський // Матеріали 6-ої міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», 24-25 вересня 2015 р.: тези допов. – Херсон, 2015. – С. 137-138. *(Здобувачем охарактеризований ефект подрібнення стружки при використанні комплексного самоналагоджувального оснащення).*

15. Луців І.В. Моделювання впливу силових факторів на похибку форми кільцевих деталей при розточуванні адаптивним багатолезовим оснащенням / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу», випуск 2. – Херсон: Херсонський національний технічний університет, 2015. – С. 38-42. *(Здобувачем подано розрахунок впливу силових факторів на похибку форми кільцевих деталей при розточуванні багатолезовим оснащенням).*

16. Луців І.В. Модель оцінки впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення на вихідну точність токарного верстата / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Збірник наукових праць V-ої Всеукраїнської науково-технічної конференції «Прогресивні технології машинобудування», 8-12 лютого 2016 р. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2016. – С. 72-75. *(Здобувачем обчислені похибки складових комплексного багатолезового оснащення).*

17. Експериментальні дослідження затискних елементів токарних патронів з адаптацією до поверхні затиску / І.В. Луців, В.Н. Волошин, Р.О. Бица, В.М. Буховець // Матеріали II-ої Міжнародної науково-практичної конференції «Сучасні технології промислового комплексу - 2016», 14-18 вересня 2016 р. - Херсон: ХНТУ, 2016. – С. 225-227. *(Здобувач взяв участь у налагоджуванні*

експериментальної установки та проведенні експериментальних досліджень затискних елементів токарних патронів з адаптацією до поверхні затиску).

18. Буховець В.М. Підвищення якості обробки циліндричних деталей на токарних автоматах та верстатах ЧПК / В.М. Буховець, В.Г. Кушик // Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції «Обладнання та технології сучасного машинобудування», 11-12 травня 2017 р.: тези допов. – Тернопіль: ТНТУ, 2017. - С. 43-44. *(Здобувачем проведена оцінка підвищення якості обробки циліндричних деталей з використанням комплексного багатолезового оснащення).*

19. Стабілізація затиску циліндричних деталей на токарних верстатах автоматах / І.В. Луців, В.М. Буховець, В.Г. Кушик, В.В. Білий, А.В. Литвин // 8-ма Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні енергетичні установки на транспорті, технології та обладнання для їх обслуговування», 28-29 вересня 2017 р.: тези допов. – Херсон, 2017. - С. 443. *(Здобувачем охарактеризований стабілізація затиску циліндричних деталей при використанні комплексного самоналагоджувального оснащення).*

20. Експериментальні дослідження токарних самоцентрівних патронів з адаптивними затискними елементами / І.В. Луців, В.Н. Волошин, Р.О. Бица, В.М. Буховець, Н.П. Кашуба // Збірник наукових праць VI-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 6-10 лютого 2017 р. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2017. - С. 70-72. *(Здобувач взяв участь у налагоджуванні експериментальної установки та проведенні експериментальних досліджень токарних самоцентрівних патронів).*

21. Луців І.В. Варіації жорсткості підсистеми затиску заготовки комплексного самоналагоджувального оснащення для токарної обробки / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій» до 100-річчя з дня заснування НАН України та вшанування пам'яті Івана Пулюя (100-річчя з дня смерті), 23-24 травня 2018 р.: тези допов. – Тернопіль: ТНТУ. - С. 126. *(Здобувачем запропонована модель оцінки зміни жорсткості підсистеми затиску заготовки комплексного самоналагоджувального оснащення для токарної обробки).*

22. Забезпечення точності форми кільцевих деталей та подрібнення стружки при обробці багатолезовим оснащенням адаптивного типу / І.В. Луців, В.Н. Волошин, В.М. Буховець, О.О. Стахурський // Збірник наукових праць VII-ої Міжнародної науково-технічної конференції «Прогресивні технології в машинобудуванні», 5-9 лютого 2018 р. – Львів: Національний університет «Львівська політехніка», 2018. - С. 89-90. *(Здобувачем проведена оцінка забезпечення точності форми кільцевих деталей при використанні комплексного самоналагоджувального оснащення).*

23. Буховець В.М. Забезпечення радіальної точності обробки конструкторсько-технологічними методами на токарних верстатах / В.М. Буховець // Матеріали VIII-ва міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем», 12 травня

2018 р.: тези допов. - Чернігів: Чернігівський національний технологічний університет, 2018. - Т.1. - С. 136.

24. Підвищення стабільності затиску заготовок малої жорсткості цанговими патронами із замкнутим контуром / І.В. Луців, В.Г. Кушик, В.М. Буховець, І.Т. Ярема // Матеріали Міжнародної науково-практичної конференції «Важке машинобудування. Проблеми і перспективи розвитку», 29-31 травня 2018 р.: тези допов. - Краматорськ: ДДМА, 2018. - С. 52. *(Здобувачем проведена оцінка підвищення стабільності затиску заготовок малої жорсткості при використанні при обробці комплексного самоналагоджувального оснащення).*

Патент України на корисну модель

25. Пат. 131072 Україна, МПК (2006.01) В 23 В 31/20. Цанга / Буховець В.М., Кушик В.Г., Луців І.В., заявник і патентовласник Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя. - № u201806078; заявл.01.06.2018; опубл. 10.01.2019, Бюл. №1. *(Частка всіх авторів однакова).*

АНОТАЦІЯ

Буховець В.М. Комплексне самоналагоджувальне оснащення для високоефективного затиску та багаторізевої обробки. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 «Процеси механічної обробки, верстати та інструменти». – Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, Тернопіль, 2019.

Дисертація присвячена створенню та дослідженню комплексного самоналагоджувального оснащення для високоефективного затиску та багаторізевої токарної обробки. Розроблені і науково обґрунтовані основи використання багаторізевого оснащення адаптивного типу у комплексі із саморегульованим затиском заготовок. Об'єднання в одній комплексній системі рівномірного затиску і багатолезового різання адаптивного типу підвищеної продуктивності та надійності і вібростійкості дозволить досягнути ряду позитивних ефектів, зокрема підвищення точності обробки, її ефективності і якості, подрібнення зливної стружки. В цьому плані розроблені конструкційні схеми багатолезових самоналагоджувальних систем для токарної обробки з розширеним діапазоном і рівномірно розподіленим зусиллям затиску та вирівнюванням зусиль різання адаптивного типу

На основі варіаційного методу розрахунку точності машин розроблена аналітична модель, яка дозволила провести оцінку впливу похибок складових комплексного самоналагоджувального оснащення, що виникають в результаті силової дії зі сторони процесу різання та затискного пристрою, на вихідну точність оброблюваних циліндричних поверхонь консольно закріплених деталей. Виведені залежності для визначення малих лінійних зміщень і кутів повороту, викликаних поперечним заклинюванням заготовки в затискному

патроні та малих лінійних зміщень, викликаних деформаціями різцевих блоків під дією складових сил різання. Відповідно отримані відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по куту повороту та малі лінійні зміщень. За результатами моделювання встановлено постійність відхилення радіуса циліндричної поверхні деталі по довжині у певних кутових положеннях.

В результаті аналітичного і комп'ютерного моделювання отримані залежності діапазону затиску заготовок затискними патронами для різного типу втулкових елементів затиску від товщини стінки та силового навантаження зі сторони приводу затиску, та отримано картини їх напружено-деформованого стану. Аналіз динамічної стійкості багатолезової системи самоналагоджувальної обробки підтвердив підвищення стійкості проти автоколивань при багатолезовій обробці з рівномірним затиском заготовок порівняно із однолезовою.

Експериментальні дослідження показали, що радіальне биття експериментального патрона зменшується порівняно із традиційним патроном в залежності від співвідношення довжини заготовки до її діаметру l/d при практично ідентичній конусності. Радіальна жорсткість пружної системи патрон-оправка для патрона із рівномірним затиском збільшується у порівнянні із трикулачковим патроном. При випробуваннях комплексного самоналагоджувального оснащення виявлені позитивні ефекти збільшення продуктивності обробки, зменшення радіальних похибок, шорсткості поверхні обробки та подрібнення стружки.

Ключові слова: комплексне оснащення, самоналагодження, адаптивний затиск, точність обробки, радіальні похибки затиску

АННОТАЦІЯ

Буховец В.Н. Комплексная самонастраивающаяся оснастка для высокоэффективного зажима и многолезцовой обработки. - Квалификационный научный труд на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 «Процессы механической обработки, станки и инструменты». - Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя, Тернополь, 2019.

Диссертация посвящена созданию и исследованию комплексной самонастраивающейся оснастки для высокоэффективного зажима и многолезцовой токарной обработки. Разработаны и научно обоснованы основы использования многолезцовой оснастки адаптивного типа в комплексе с саморегулирующимся зажимом заготовок. Объединение в единой комплексной системе равномерного зажима и многолезвийного резки адаптивного типа повышенной производительности, надежности и виброустойчивости позволит достичь ряда положительных эффектов, в частности повышения точности обработки, ее эффективности и качества, измельчения сливной стружки. В этом плане разработаны конструкционные схемы многолезвийных самонастраивающихся систем для токарной обработки с расширенным

диапазоном и равномерно распределенным усилием зажима и выравниванием усилий резания адаптивного типа.

На основе вариационного метода расчета точности машин разработана аналитическая модель, позволившая провести оценку влияния погрешностей составляющих комплексной самонастраивающейся оснастки, возникающих в результате силового воздействия со стороны процесса резания и зажимного устройства, на исходную точность обрабатываемых цилиндрических поверхностей консольно закрепленных деталей. Выведены зависимости для определения малых линейных смещений и углов поворота, вызванных поперечным заклиниванием заготовки в зажимном патроне и малых линейных смещений, вызванных деформациями резцовых блоков под действием составляющих сил резания. Соответственно получены отклонения радиуса цилиндрической поверхности детали по углу поворота и малые линейные смещения. По результатам моделирования установлено постоянство отклонения радиуса цилиндрической поверхности детали по длине в определенных угловых положениях.

В результате аналитического и компьютерного моделирования получены зависимости диапазона зажима заготовок в патронах при разного типа втулочных элементах зажима от толщины стенки и силовой нагрузки со стороны привода зажима, и получены картины их напряженно-деформированного состояния. Анализ динамической устойчивости многолезвийной системы самонастраивающейся обработки подтвердил повышение устойчивости против автоколебаний совместно с равномерным зажимом заготовок по сравнению с однолезвийным точением.

Экспериментальные исследования показали, что радиальное биение экспериментального патрона уменьшается сравнительно с традиционным патроном в зависимости от соотношения l/d при практически идентичной конусности. Радиальная жесткость упругой системы патрон-оправка для патрона с равномерным зажимом увеличивается по сравнению с трехлапчковым патроном. При испытаниях комплексного самонастраивающейся оснастки обнаружены положительные эффекты увеличения производительности обработки, уменьшения радиальных погрешностей, шероховатости поверхности и измельчения стружки.

Ключевые слова: комплексная оснастка, самонастраивание, адаптивный зажим, точность обработки, радиальные погрешности зажима

SUMMARY

Buhovets V.N. Complex self adjusting tooling for high efficiency clamping and multi cut machining. – Qualifying scientific work on the rights of manuscript.

Dissertation for Candidate of Engineering Science scientific degree with major in 05.03.01 «Machining processes, machines and tools». – Ternopil Ivan Puluj National Technical University, Ternopil, 2019.

The thesis deals with the creation and research of complex self adjusting tool accessories for high efficiency clamping and multi cut machining. The basics of using

a multi-tool adaptive-type accessories in combination with a self-regulating work piece clamping have been developed and scientifically based. Combining uniform clamping and multi-tool cutting of adaptive type in a single integrated system of increased productivity, reliability and vibration resistance will allow to achieve a number of positive effects, such as increase the machining accuracy, its efficiency and quality, grinding the continuous chips. In this regard, structural schemes of multi-edge self-adjusting systems for turning with an extended range and a uniformly distributed clamping force and adaptive-type equalizing of cutting forces have been developed.

An analytical model has been developed on the basis of a variation method for calculating the machines accuracy. This model made it possible to evaluate the influence of the errors of the components of the integrated self-adjusting tooling resulting from the force effect from the cutting process and the clamping device, on the initial accuracy of the machined cylindrical surfaces of the cantilever parts. Dependencies are derived for determining small linear displacements and rotation angles caused by transverse jamming of the work piece in the chuck and small linear displacements caused by deformations of the cutting blocks under the action of the cutting force components. Respectively, deviations of the radius of the cylindrical surface of the part in angle of rotation and small linear displacements were obtained. According to the simulation results, the constancy of the deviation of the radius of the cylindrical surface of the part along the length in certain angular positions was established.

As a result of analytical and computer modeling, the dependences of the clamping range of work pieces in the chucks with different types of sleeve elements of the clamp on the wall thickness and the power load from the clamp drive side are developed, and pictures of their stress-strain state are obtained. The analysis of the multi-edge system dynamic stability of the self-adjusting machining confirmed the increase in resistance against self-oscillations together with the uniform clamping of work pieces compared to single-cut turning.

Experimental studies have shown that the radial run-out of the experimental chuck decreases compared to the traditional chuck depending on the ratio l/d with almost identical taper. The radial stiffness of the elastic chuck-mandrel system for a chuck with the uniform clamping increases compared to a three-jaw chuck. When testing complex self adjusting tooling, the positive effects of an increase in machining accuracy, a decrease in radial errors, surface roughness, as well as the chip reduction were found.

Key words: complex tooling, self-adjusting, adaptive clamping, machining accuracy, radial clamping errors