

Міністерство освіти і науки України
Донбаська державна машинобудівна академія

ХОРОШАЙЛО ВАДИМ ВІКТОРОВИЧ



УДК 621.941.1

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ОТВОРІВ
НА ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ
ВІБРОСТІЙКОЇ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2016

Дисертацією є рукопис.

Дисертація виконана на кафедрі «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології» Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий керівник кандидат технічних наук, доцент,
старший науковий співробітник
Гузенко Віталій Семенович,
Донбаська державна машинобудівна академія,
м. Краматорськ,
професор кафедри комп'ютеризованих мехатронних систем, інструментів та технологій

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Луців Ігор Володимирович,
Тернопільський національний технічний університет ім. Івана Пулюя, м. Тернопіль,
завідувач кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин;

кандидат технічних наук, доцент
Юрчишин Оксана Ярославівна,
Механіко-машинобудівний інститут
НТУУ «Київський політехнічний інститут»,
доцент кафедри конструювання верстатів та машин.

Захист відбудеться 1 липня 2016 р. о 15.00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К12.105.02 у Донбаській державній машинобудівній академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72, корп. 2, ауд. 2313.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: 84313, Донецька обл., м. Краматорськ, вул. Шкадінова, 72, корп. 1 або за web-адресою: <http://www.dgma.donetsk.ua/zahisti-u-radi-d12.105.02.html>.

Автореферат розісланий 30 травня 2016 р.

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



С. Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Найважливішим завданням машинобудівного виробництва України є випуск конкурентної на світовому ринку продукції. До машин, які випускають заводи важкого машинобудування, ставляться високі вимоги, а це, у свою чергу, ставить проблемні завдання в області механічної обробки великогабаритних деталей машин. Аналіз показників процесу обробки різанням деталей прокатного, гірничорудного, енергетичного обладнання свідчить, що ефективна обробка отворів великих діаметрів у деталях типу втулок і циліндрів є важливим актуальним завданням. Заготовками для таких деталей є поковки цілісні і з прошитим отвором, виливки сталеві і чавунні, які виготовляються з великими припусками під механічну обробку. Процес обробки отворів на токарних верстатах розточувальними різцями ускладнюється тим, що виникають несприятливі умови різання, які пов'язані з великими вильотами інструменту, що веде до втрати вібростійкості різального інструменту. Високий рівень вібрацій інструменту при розточуванні отворів призводить до значного зниження параметрів точності та якості оброблюваних поверхонь, а також до зниження зносостійкості інструменту та продуктивності обробки.

На підставі викладеного науково-технічна задача з підвищення ефективності розточування отворів великого діаметра на токарних верстатах є актуальною, і її можна вирішити шляхом створення вібростійкої інструментальної системи.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Виконана робота здійснювалася у рамках науково-дослідних тем ДК 08-04 «Удосконалення технологічного середовища для автоматизованого виробництва продукції важкого машинобудування» (№ 0105U002445), ДК 01-2014 «Підвищення надійності і продуктивності комп'ютеризованих мехатронних верстатно-інструментальних систем важкого машинобудування» (№ 0114U002757), Д-01-2015 «Підвищення енергоефективності процесів механообробки на основі багатокритеріальної оптимізації параметрів технологічних систем важкого машинобудування» (№ 0115U003122) кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології» Донбаської державної машинобудівної академії.

Тема дисертаційної роботи відповідає науковій тематиці кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології» ДДМА в області розроблення верстатно-інструментальних систем важкого машинобудування.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є підвищення ефективності обробки отворів деталей типу циліндрів і втулок на токарних верстатах шляхом розроблення вібростійкої інструментальної системи, використання якої забезпечує підвищення продуктивності, точності та якості обробки при зниженні її собівартості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

1. Провести аналіз умов експлуатації розточувальних різців при обробці отворів на токарних верстатах для виявлення можливостей підвищення ефективності розточування.

2. Розробити методикау теоретичних і експериментальних досліджень характеристик розточувальних різців та інструментальних систем, які здійснюють процес обробки на токарних верстатах.

3. Розробити математичну модель і структурну схему вібростійкої інструментальної системи з двоопорним закріпленням державки розточувального різця.

4. Запропонувати конструкцію вібростійкої інструментальної системи для розточування отворів великих діаметрів на токарних верстатах і провести дослідження її характеристик на тривимірних моделях.

5. Провести експериментальні дослідження характеристик розточувальних різців і процесу обробки отворів на токарних верстатах при консольному та двоопорному закріпленні інструменту.

6. Розробити рекомендації з підвищення продуктивності і якості обробки отворів великих діаметрів при розточуванні на токарних верстатах.

Об'єкт дослідження. Процес розточування отворів великих діаметрів на токарних верстатах.

Предмет дослідження. Функціональні зв'язки між параметрами вібростійкості розточувальних різців і параметрами точності, якості і продуктивності обробки.

Методи досліджень. Теоретичні дослідження виконані на основі фундаментальних положень математики, опору матеріалів, динаміки, теорії різання, проектування верстатів та інструментів. У роботі застосовувалося аналітичне і тривимірне моделювання, метод скінченних елементів, реалізований у комп'ютерних системах проектування й інженерного аналізу. Експериментальні дослідження проводилися в лабораторних і виробничих умовах. Оброблення експериментальних даних здійснювалося за допомогою сучасних методів математичної статистики.

Наукова новизна отриманих результатів

1. Розроблено математичну модель коливальних розточувального різця, що дозволяє уперше прогнозувати вплив параметрів жорсткості інструментальної системи з додатковою рухомою опорою різця на амплітудні характеристики вібрацій процесу розточування.

2. Уперше розроблено інструментальну систему для розточування на токарних верстатах, яка забезпечує підвищення вібростійкості процесу різання за рахунок двоопорного закріплення інструменту.

3. Розроблено тривимірну модель інструментальної системи для розточування, яка дозволяє оцінити вплив пружних деформацій на динамічні характеристики інструменту при розточуванні.

4. Встановлено вплив застосування розробленої інструментальної системи для розточування на підвищення точності, якості і продуктивності обробки отворів великих діаметрів на токарних верстатах.

Практична цінність отриманих результатів

1. Розроблено комплексну методикау математичного й тривимірного моделювання розточувальних різців і інструментальних систем, яка може

використовуватися при проектуванні інструментів на машинобудівних і інструментальних підприємствах.

2. Запропоновано спосіб розточування отворів великих діаметрів на токарних верстатах із двоопорним закріпленням розточувального різця.

3. Створено інструментальну систему для розточування, яка забезпечує підвищення ефективності процесу розточування на токарних верстатах за рахунок додаткової рухомої опори державки розточувального різця.

4. Розроблена інструментальна система для розточування на токарних верстатах впроваджена на ТОВ «НДПТмаш – дослідний завод» і ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» з очікуваним економічним ефектом 11 000 грн на рік.

5. Методику математичного і тривимірного моделювання інструментальних систем впроваджено в навчальний процес кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології», ДДМА (м. Краматорськ).

Особистий внесок здобувача. Авторів належать основні положення наукової новизни. Теоретичні та експериментальні дослідження, що увійшли до дисертації, виконані автором самостійно. Науковий керівник брав участь у формуванні постановки завдань і визначенні можливості їх вирішення.

Апробація результатів дисертації. Основні наукові положення й результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» (м. Краматорськ, 2006 р., 2013–2015 рр.); Міжнародна науково-технічна конференція молодих учених і студентів «Актуальні задачі сучасних технологій» (м. Тернопіль, 2015 р.), 9th International Conference «Interdisciplinarity in Engineering» (Tirgu – Mures, Romania, 2015).

Публікації. За результатами проведених досліджень опубліковано 14 наукових робіт: 1 стаття – у виданні, яке включено до міжнародних наукометричних баз; 4 статті – у спеціалізованих фахових виданнях, що входять до переліку ВАК; 1 стаття і 6 тез – у виданнях матеріалів науково-технічних конференцій; отримано 2 патенти України.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, загальних висновків по роботі, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить 149 сторінок; містить 91 ілюстрацію, 6 таблиць, 5 додатків, список використаних джерел зі 135 найменувань.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі наведено обґрунтування актуальності теми, сформульовано мету й завдання досліджень, показано наукову новизну і практичну цінність отриманих результатів, вказано на зв'язок дисертації з науковою тематикою, галузевими та державними планами та програмами. Визначено особистий внесок здобувача у вирішенні науково-технічної задачі підвищення ефективності розточування отворів на токарних верстатах.

У першому розділі на основі проведеного узагальнення особливостей процесу розточування отворів на токарних верстатах аналізувались літературні джерела за напрямом досліджень причин виникнення вібрацій у процесі різання та їх впливу на точність, якість обробки і зносостійкість. Також проведено аналіз засобів зниження рівня коливань при обробці отворів.

Досягнення високої продуктивності розточування при одночасному забезпеченні необхідної точності й шорсткості обробленої поверхні стримується наявністю вібрацій, що виникають у процесі різання.

Найбільш поширеним видом вібрацій при роботі на металорізальних верстатах є автоколивання. Вагомий внесок у розвиток теорії автоколивань при обробці різанням зробили А. І. Каширін, В. О. Кудинов, І. Г. Жарков, Г. С. Лазарев, В. І. Локтев, В. М. Подураєв, А. П. Соколовський, М. Є. Ельясберг, Д. Кумабе та інші.

Основними причинами автоколивань при розточуванні є наявність координатного зв'язку в підсистемі «деталь – інструмент», нестабільність сили різання і її фазове відставання від товщини зрізу. При цьому автоколивання ініціюються, як правило, найбільш слабкою ланкою технологічної системи, якою при розточуванні є різальний інструмент.

Дослідженню факторів, що чинять вплив на відхилення форми отворів і шорсткість обробленої поверхні при розточуванні, і методів їх зменшення присвячено багато робіт, з яких зрозуміло, що сили різання викликають пружні деформації елементів технологічної системи, а коливання сил різання призводять до постійної зміни пружних відтискань. Під час технологічної операції розточування домінують пружні переміщення й коливання різального інструменту стосовно заготовки, що призводить до постійної зміни товщини зрізу.

Аналіз літератури в області досліджень вібрацій при обробці розточуванням показує, що існують два основні напрями пошуку рішень для зниження рівня коливань: підвищення жорсткості та демпфування різального інструменту. При цьому методи підвищення жорсткості інструменту при розточуванні на токарних верстатах досліджені недостатньо.

Виходячи з результатів аналізу літературних джерел, сформульовано мету й завдання досліджень.

У наступних розділах вирішувались задачі дисертаційної роботи на основі комплексного системного підходу до створення верстатно-інструментальних систем з використанням наукових принципів вітчизняних науковців, зокрема: Ю. М. Внукова, А. І. Грабченка, Г. І. Грановського, В. С. Гузенка, В. О. Залози, Ю. М. Кузнєцова, Г. П. Клименко, В. Д. Ковальова, І. В. Луціва, П. П. Мельничука, Є. В. Мироненка, Н. С. Равської, П. Р. Родіна, В. Б. Струтинського та інших.

У другому розділі наведено основні методики теоретичних і експериментальних досліджень інструментальних систем для розточування. Методика теоретичних досліджень заснована на математичному та геометричному моделюванні.

На основі загальної схеми механічної обробки, яка стосується зв'язку первинних параметрів механічної обробки з її результатами через фактори самого процесу різання, було виділено напрямок дослідження таких параметрів процесу, як жорсткість технологічної системи та її вібростійкість.

Для дослідження статичних і динамічних характеристик розточувальних інструментів запропоновано методику, яка включає математичне й комп'ютерне моделювання з наступним проведенням експериментів. Зокрема, розроблено методику математичного моделювання консольнозакріплених розточувальних різців, у якій різець розглядався як стрижень певного перерізу. Розроблені математичні моделі дозволяють теоретично розраховувати прогини розточувального різця під дією підсумкової сили різання в залежності від довжини його консольної частини. Також розроблено методику розрахунку власної частоти коливань різця з прямокутним перерізом державки в залежності від його відносного вильоту.

У роботі запропоновано методику моделювання та розрахунку інструментальних систем із використанням комп'ютерної програми APM Structure 3D, що дозволяє моделювати конструкції окремих стрижнів і їх комбінацій з різноманітними видами закріплень і навантажень. Цей метод дозволяє проводити швидкий аналіз і синтез конструкцій інструментальних систем і розраховувати їх характеристики. Моделювання здійснюється за допомогою набору типових елементів, для розрахунку яких використовують методи опору матеріалів і теорії пружності. Для реалізації цього методу достатньо задати принципovu геометричну схему конструкції, місця і способи закріплень, величину і напрям навантажень, а також матеріал, форму і розміри перерізів стрижнів. Незважаючи на деяку ідеалізацію конструкцій, метод стрижневого моделювання дає достатньо достовірні результати. Методика розроблення динамічної моделі розточувального інструменту заснована на теоретичних дослідженнях координатного зв'язку В. О. Кудинова, Г. С. Лазарева і М. Є. Ельясбергу. Для моделювання вібропереміщень вершини розточувального інструменту використано диференціальні рівняння, які враховують змінні сили різання, сили пружності й опору.

Для того щоб провести поглиблене теоретичне дослідження динамічних характеристик інструментальних систем, використовувалось тривимірне моделювання в програмі «Компас 3D» з подальшими інженерними розрахунками за методом скінченних елементів у програмах APM Studio і APM Structure 3D.

Розроблена методика передбачає, що після комплексного аналізу з використанням різних методів моделювання інструментальних систем необхідно застосувати експериментальні методи дослідження процесу розточування і його результатів у лабораторних і виробничих умовах.

У третьому розділі наведено результати моделювання інструментальної системи для розточування на токарних верстатах, що проводилося згідно з розробленою методикою досліджень. На основі всебічного аналізу обґрунтовано використання інструментальної системи з додатковою рухомою опорою розточувального різця для підвищення вібростійкості процесу розточування.

Структурні схеми консольнозакріпленого розточувального різця й інструментальної системи з двоопорним закріпленням різця (рис. 1) розроблено з використанням стрижневого моделювання. Стрижньову модель інструментальної системи розраховано при навантаженнях, які застосовувались і до консольнозакріпленого стрижня, що імітував розточувальний різець. Зокрема, отримано результати розрахунку прогинів і власних частот стрижнів із квадратними перерізами 25×25 і 32×32 мм як консольнозакріплених, так і з додатковою опорою для різних довжин стрижня. Програма дозволяє визначати як сумарні переміщення у вузлах, так і переміщення в напрямках координатних осей, що дає змогу розраховувати величини жорсткості за цими напрямками. Графіки залежностей сумарних прогинів Δ і власних частот f від вильоту L наведено на рис. 2, 3

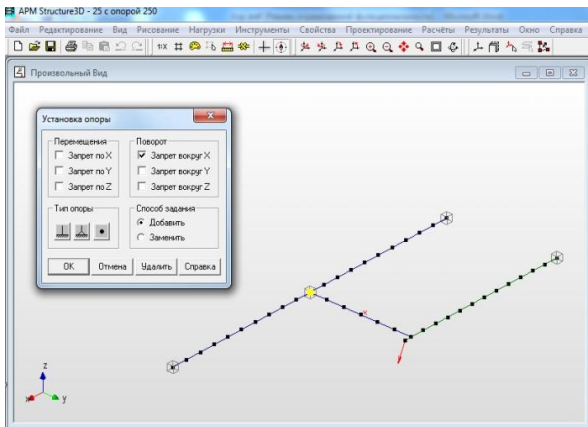


Рисунок 1 –

Модель інструментальної системи з двоопорним закріпленням розточувального різця

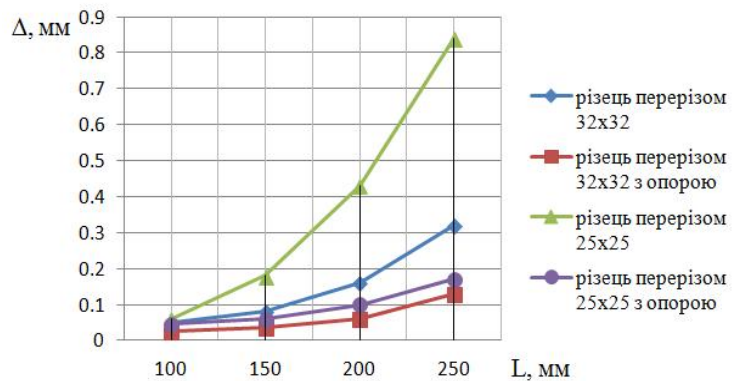


Рисунок 2 – Графік залежності прогинів різця від вильоту

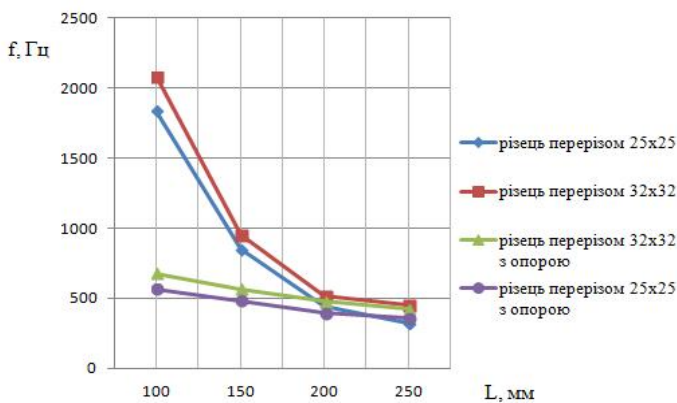


Рисунок 3 – Графік залежності власних частот різців від вильоту

дозволяє визначити вібропереміщення вершини різця в радіальному й тангенціальному напрямках під дією сил різання, що періодично змінюються, та враховувати сили пружності й демпфування, які виникають при відхиленні вершини різця.

Для теоретичного дослідження коливань вершини розточувального різця розроблено схему дії сил різання на систему «різець – супорт» у площині YZ , яка перпендикулярна до вісі оброблюваної деталі (рис. 4). Пружна система представлена у вигляді двох пружин, орієнтованих під деяким кутом θ до координатної системи, при цьому з використанням додаткової опори кут орієнтації зменшується до θ_1 .

Така модель пружної системи

Для створення математичної моделі прийнято допущення, що значення складових сил різання змінюються в часі за гармонійним законом. Величини пружних сил пропорційні переміщенням у напрямках головних осей жорсткості, а сили опору – пропорційні швидкості.

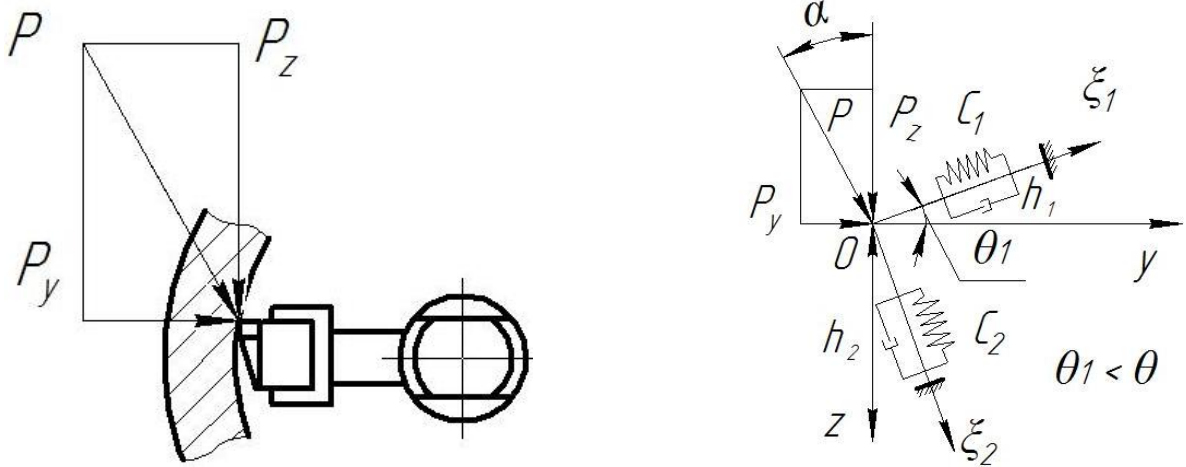


Рисунок 4 – Схема дії сил різання на пружну інструментальну систему «різець – супорт» у площині YZ з урахуванням додаткової опори

Таким чином, математична модель може бути представлена у вигляді системи диференціальних рівнянь (1):

$$\begin{cases} m \cdot \ddot{\xi}_1 + h_1 \cdot \dot{\xi}_1 + c_1 \cdot \xi_1 = (P_y + P_{y0}) \cdot \cos \theta - (P_z + P_{z0}) \cdot \sin \theta; \\ m \cdot \ddot{\xi}_2 + h_2 \cdot \dot{\xi}_2 + c_2 \cdot \xi_2 = (P_y + P_{y0}) \cdot \sin \theta + (P_z + P_{z0}) \cdot \cos \theta. \end{cases} \quad (1)$$

Щоб перейти від системи рівнянь в осях ξ_1 і ξ_2 до системи в осях Y і Z, необхідно використати формули (2), (3):

$$\xi_1 = y \cdot \cos \theta - z \cdot \sin \theta; \quad (2)$$

$$\xi_2 = y \cdot \sin \theta + z \cdot \cos \theta. \quad (3)$$

Після підстановки формул переходу до осей Y і Z і перенесення складових отримуємо систему рівнянь (4):

$$\begin{aligned} & (\ddot{y} \cdot \cos \theta - \ddot{z} \cdot \sin \theta) \cdot m = \\ & = [(P_y + P_{y0} \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \cos \theta - (P_z + P_{z0} \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \sin \theta - \\ & \quad - h_1 \cdot (\dot{y} \cdot \cos \theta - \dot{z} \cdot \sin \theta) - c_1 \cdot (y \cdot \cos \theta - z \cdot \sin \theta)]; \\ & (\ddot{y} \cdot \sin \theta + \ddot{z} \cdot \cos \theta) \cdot m = \\ & = [(P_y + P_{y0} \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \sin \theta + (P_z + P_{z0} \cdot \cos(\omega \cdot t)) \cdot \cos \theta - \\ & \quad - h_2 \cdot (\dot{y} \cdot \sin \theta + \dot{z} \cdot \cos \theta) - c_2 \cdot (y \cdot \sin \theta + z \cdot \cos \theta)]. \end{aligned} \quad (4)$$

де m – зведена маса консольної частини державки розточувального різця; θ – кут орієнтації осей жорсткості; P_z, P_y – постійні складові сил різання; P_{z0}, P_{y0} – амплітудні складові сил різання; ω – кругова частота коливань; c_1, c_2 – коефіцієнти жорсткості; h_1, h_2 – коефіцієнти демпфування.

Система цих рівнянь розв'язувалася числовим методом за допомогою комп'ютерної програми проведення математичних розрахунків Mathcad. Для розв'язання системи рівнянь задавалися такі незмінні умови: постійні й амплітудні складові сил різання $P_z = 1000$ Н, $P_y = 300$ Н, $P_{z0} = 250$ Н, $P_{y0} = 75$ Н, коефіцієнти демпфування – $h_1 = h_2 = 0,2$.

З уведенням в систему додаткової жорсткості за рахунок використання спеціальної інструментальної системи, яка створює рухому опору державки різця поблизу вузла кріплення різальної пластини, зменшується кут орієнтації осей жорсткості, а величини жорсткості збільшуються.

У результаті розв'язання системи рівнянь визначалися вібропереміщення в часі за осями Y і Z . При низьких значеннях жорсткості і $\theta = 30^\circ$ амплітуда вібрацій досить велика й коливання мають форму биття, що є показником нестійкої коливальної системи (рис. 5). При збільшенні значень жорсткості й зміні кута орієнтації осей жорсткості з $\theta = 30^\circ$ до $\theta_1 = 15^\circ$ і рівності інших початкових умов вид коливань змінюється, амплітуди коливань зменшуються й вид коливань близький до гармонійного, що говорить про підвищення вібростійкості системи (рис. 6).

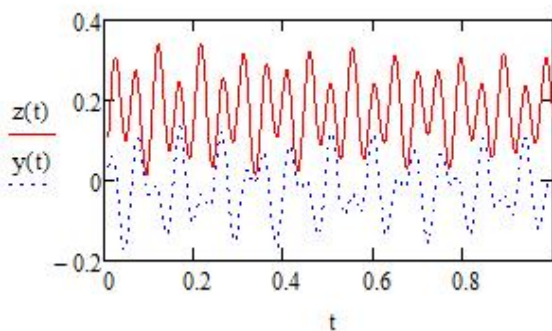


Рисунок 5 – Вібропереміщення вершини консольнозакріпленого різця

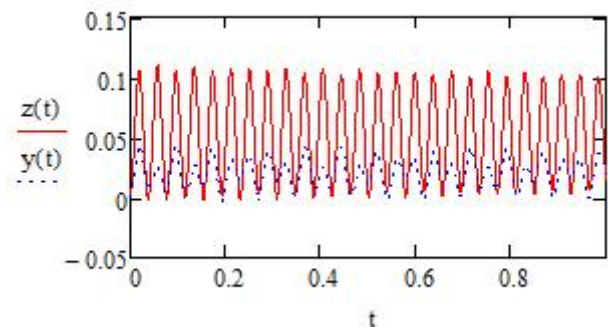


Рисунок 6 – Вібропереміщення вершини двоопорнозакріпленого різця

Аналіз розроблених математичних і стрижневих моделей дозволив довести доцільність створення додаткової опори державки розточувального різця для підвищення вібростійкості процесу розточування.

У четвертому розділі розроблено принципову конструкцію інструментальної системи з двоопорним закріпленням розточувального різця, на основі якої створено тривимірні моделі, які аналізувалися за допомогою методу скінченних елементів.

Створення інструментальної системи для розточування здійснювалось із використанням можливості застосування рухомої опори для забезпечення підвищення параметрів жорсткості державки розточувального різця, що працює при значних вильотах. Внаслідок цього очікується підвищення динамічних характеристик процесу різання.

На першому етапі проектування розроблено схему технологічного налагодження обробки отвору на токарному верстаті з використанням двоопорного закріплення розточувального різця (рис. 7). За цією схемою заготовка встановлюється в кулачках планшайби або в кулачках патрона токарного верстата. Через отвір заготовки проходить оправка 1, яка з одного боку жорстко закріплюється конічним хвостовиком у пінолі задньої бабки 2, а з іншого боку спирається центровим отвором на обертовий центр 3. Державка розточувального різця 4 закріплюється в різцетримачі 5 і рухомій опорі 6. Після встановлення необхідної глибини різання відбувається фіксація системи для забезпечення нерухомого розташування елементів конструкції в радіальному й тангенціальному напрямках.

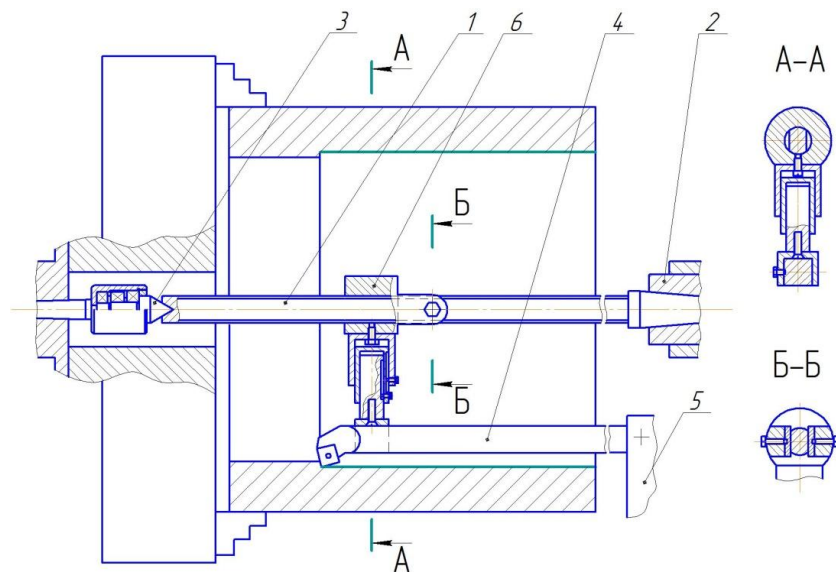


Рисунок 7 – Принципова схема розробленої інструментальної системи

Після розроблення принципової схеми й ескізного проекту для створення дослідної конструкції інструментальної системи застосовувався метод тривимірного моделювання з проведенням інженерного аналізу й наступним розробленням конструкторської документації в програмі «Компас 3D». На рис. 8 наведено скінченно-елементну модель з прикладеним до неї навантаженням і закріпленнями.

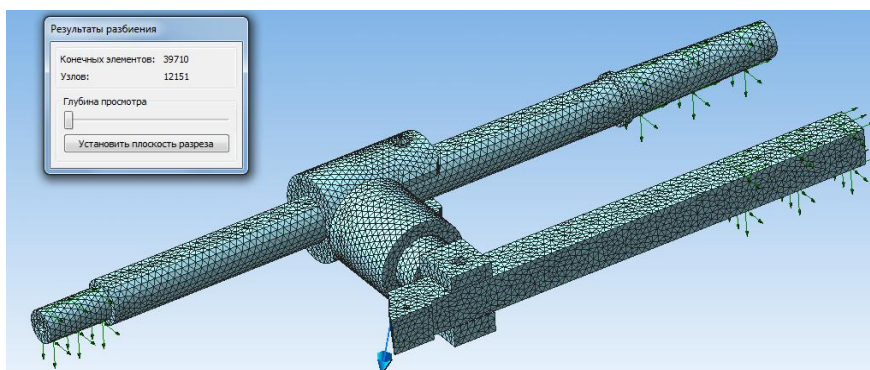


Рисунок 8 – Скінченно-елементна модель інструментальної системи для розточування

Для моделювання розроблено ряд розточувальних різців із різними довжинами консольної частини державок, щоб досліджувати моделі з вильотом 100, 150, 200 і 250 мм. Створені моделі розточувальних різців розраховувалися як окремо, так і в інструментальній системі. У результаті проведеного розрахунку отримано карти результатів переміщень і власних частот (рис. 9).

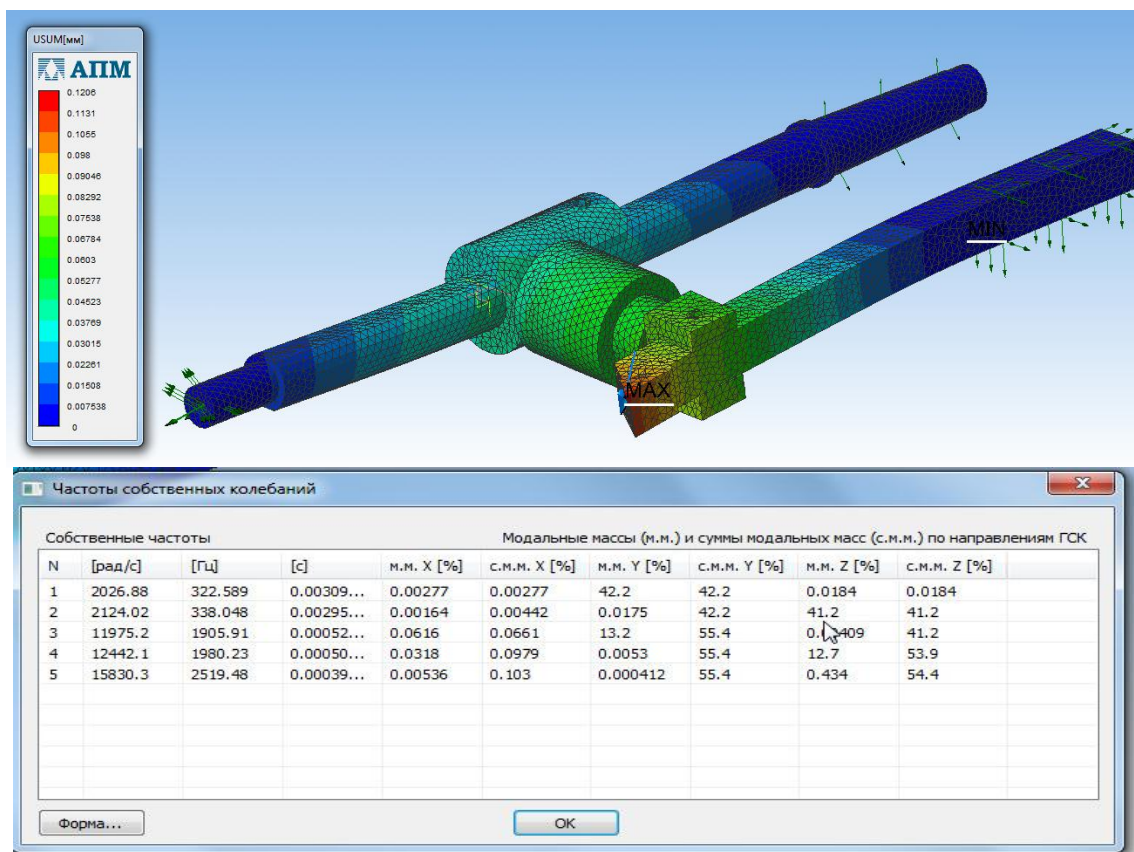


Рисунок 9 – Карти результатів переміщень і власних частот інструментальної системи для розточування

Для дослідження динамічних показників інструментальної системи розроблена тривимірна модель була розрахована в програмі APM Structure 3D. Моделювання коливального процесу консольно-закріплених розточувальних різців і різців із двоопорним закріпленням в умовах динамічного напруження проводилося за умови дії змінної сили різання, що періодично змінюється в часі. Зміни складали до 25 % від сталої сили різання й відбувалися з певною частотою, близькою до першої власної частоти розточувального різця при певних вильотах із урахуванням застосування інструментальної системи. У результаті розрахунку отримано графіки вібропереміщень вершини різця в напрямках осей Y і Z. Для отримання значень у програмі APM Structure 3D передбачений експорт результатів у числовому вигляді в програму Excel. Встановлено, що при великих вильотах державки різця амплітуди коливань знижуються в середньому в 2,3 рази.

У п'ятому розділі наведено експериментальне дослідження статичних і динамічних характеристик інструментальної системи для розточування в лабораторних і виробничих умовах.

Лабораторні експерименти для дослідження статичних характеристик інструментальної системи для розточування проводилися за схемою (рис. 10), у якій різець 1 навантажується при обертанні гвинта 2, який встановлено в поворотному кронштейні 3. Сила навантаження встановлюється за динамометром 4; прогини державки різця фіксуються індикатором 5. Експеримент проводився на токарно-гвинторізному верстаті моделі 16К20.

Розточувальні різці з розмірами перерізів 25×25 і 32×32 мм встановлювалися з різним вильотом, в умовах консольного й двоопорного закріплення. Динамометр встановлювався так, щоб гвинт створював зусилля в напрямку модельованої підсумкової сили різання, для чого поворотний кронштейн із гвинтом був нахилений під кутом 20° до вертикальної вісі й був надійно закріплений (рис. 11).

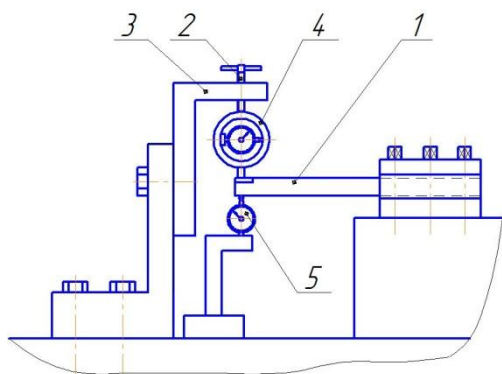


Рисунок 10 – Схема проведення статичного експерименту

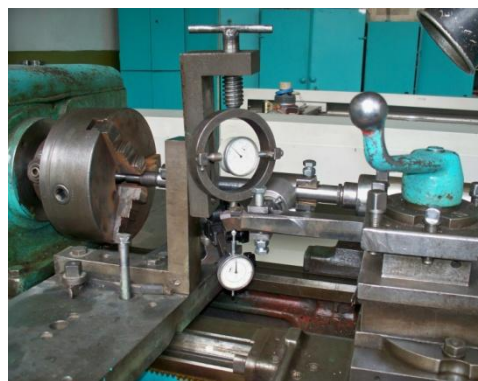


Рисунок 11 – Інструментальна система, підготовлена для проведення статичного експерименту

Експериментально визначено прогини консольно- і двоопорнозакріплених розточувальних різців під навантаженням, яке відповідало умовам попереднього моделювання.

Експериментальне дослідження власних частот консольнозакріплених розточувальних різців і розробленої інструментальної системи проводилося з допомогою датчика-акселерометра ДН-4, який встановлювався поблизу вузла кріплення пластини й був з'єднаний з цифровим осцилографом RIGOL DS5022M. Цей осцилограф забезпечений апаратним частотоміром і реєстратором осцилограм із вбудованою функцією аналізатора спектра.

Експериментальні дослідження власних частот державок розточувальних різців проводилися таким чином. При завданні удару по державці 1, поблизу вузла кріплення різальної пластини, легким молотком із гумовим наконечником збуджувалися вільні коливання, які передавалися з датчика 2 на аналого-цифровий перетворювач осцилографа 3. Після передавання даних проаналізовано результати на комп'ютері 4 за допомогою програми Ultrascop, яку спеціально розроблено для цифрових осцилографів RIGOL. Схему і вид вимірювального комплексу наведено на рис. 12, 13.

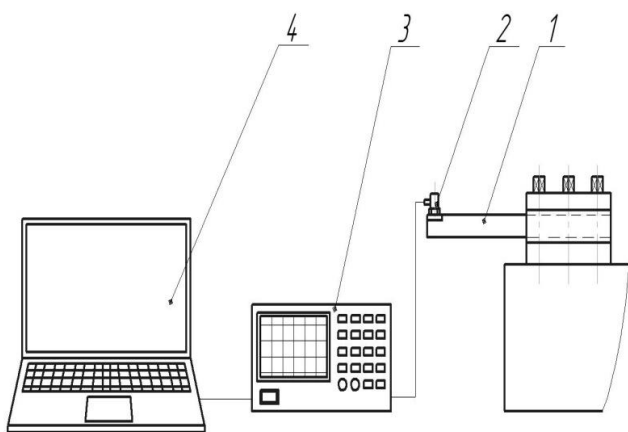


Рисунок 12 – Схема вимірювального комплексу для визначення власних частот



Рисунок 13 – Вид вимірювального комплексу для визначення власних частот

Результати експериментального дослідження прогинів і власних частот консольно- та двоопорнозакріплених розточувальних різців дозволили довести адекватність створених тривимірних моделей.

Для експериментального дослідження автоколивань, що виникають у процесі різання, застосовувався той самий вимірювальний комплекс, що і при дослідженні власних частот, причому джерелом збудження коливань була змінна в часі сила різання процесу розточування.

Експерименти проводилися у виробничих умовах на токарно-гвинторізному верстаті 16К20 розточувальними різцями з державкою зі сталі 45 перерізом 25×25 і 32×32 мм з механічним кріпленням твердосплавної пластини Т15К6. Оброблялася циліндрична заготовка зі сталі 35 із внутрішнім діаметром 300 мм (режими різання $t = 2$ мм, $s = 0,1$ мм/об, $V = 75$ м/хв). На першому етапі експерименту розточування проводилося без застосування додаткової рухомої опори при різних вильотах державки з різцетримача L, що дорівнює 100, 150, 200, 250 мм. На державці встановлювалися датчики по напрямку вісі Z і по напрямку вісі Y, щоб визначити максимальні тангенціальні й радіальні вібропереміщення вершини різця. На наступному етапі розточування проводилося із застосуванням розробленої інструментальної системи за тих самих умов. На рис. 14 наведено інструментальну систему для розточування, яка підготовлена для проведення досліджень автоколивань. На рис. 15 наведено осцилограми у вікні програми Ultrascop.

Проведено чотири серії дослідів при різних вильотах розточувального різця. Причому для зручності наступного контролю шорсткості були розточені ділянки у вигляді смуг з невеликим послідовним зменшенням діаметра, кожна з яких відповідала певному вильоту. У результаті проведеного експерименту отримано амплітудні значення вібропереміщень вершини розточувального різця у вертикальному й горизонтальному напрямках для різних вильотів. Далі проводилося статистичне оброблення набутих значень відповідно до методики експериментальних досліджень. За допомогою програмного пакета Excel обчислювалися дисперсії паралельних дослідів і перевірялася однорідність дисперсії за критерієм Кохрена, що дозволило зробити висновок про достовірність отриманих результатів.

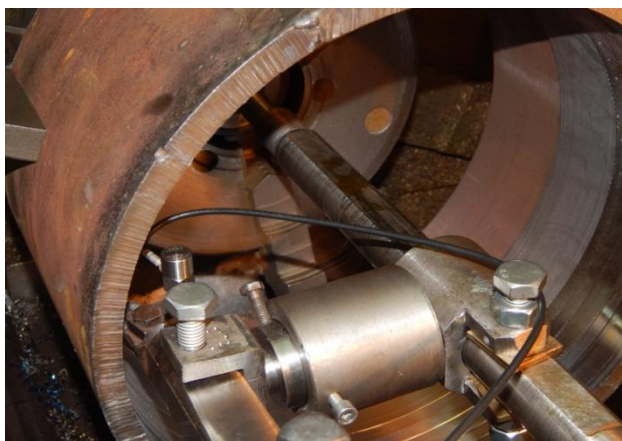


Рисунок 14 – Інструментальна система для розточування

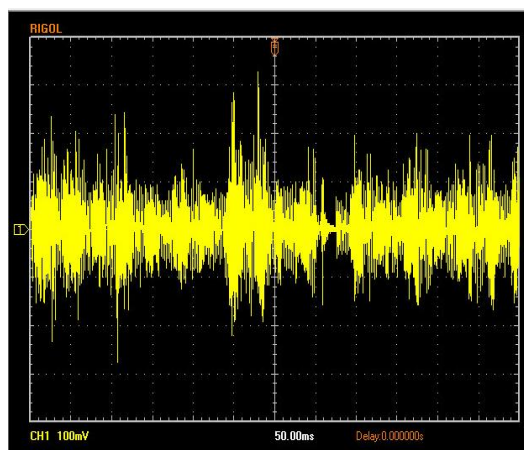


Рисунок 15 – Вид коливань у вікні програми Ultrascope

На рис. 16 наведено гістограму амплітуд коливань вершини різця перерізом державки 25×25 мм і різця перерізом державки 32×32 мм, яка дозволяє оцінити вплив використання розробленої інструментальної системи на рівень вібрації в процесі розточування при різних вильотах інструменту.

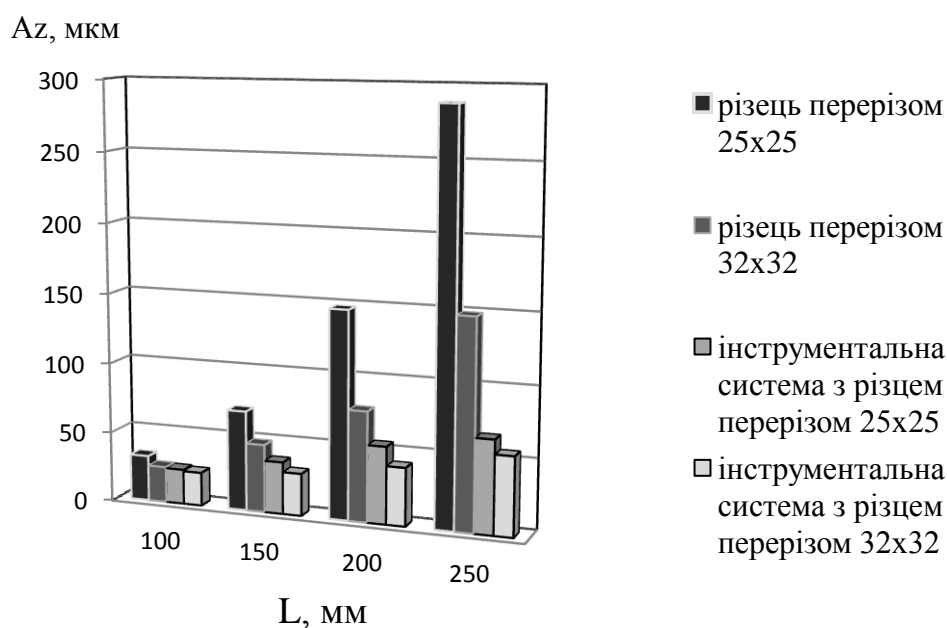


Рисунок 16 – Гістограма залежності амплітуд коливань вершини різця від вильоту

За результатами вимірювань встановлено зниження амплітуди коливань у середньому в 2,5 разу при розточуванні за допомогою розробленої інструментальної системи в порівнянні з розточуванням консольнозакріпленим різцем.

Для визначення впливу величини амплітуди коливань різця на якість обробленої поверхні при розточуванні із застосуванням інструментальної системи проведено вимірювання шорсткості після розточування за планом експерименту.

Вимірювання проводилися у виробничих умовах портативним вимірником шорсткості TR 200. Вимірювання шорсткості поверхні здійснювалися після обробки при одних режимах різання ($t = 1$ мм, $s = 0,1$ мм/об, $n = 80$ об/хв) для різних вільотів державки з різцетримача L, що дорівнює 100, 150, 200, 250 мм, без застосування інструментальної системи, при цьому в процесі обробки фіксувалися амплітуди коливань. Після цього встановлювалася інструментальна система і проводилося розточування по тих же доріжках на різних вільотах і знову проводилися вимірювання шорсткості. Вимірювання шорсткості проводилося тричі після кожного розточування, потім розраховувалися середні показники за профілометром. Результати експерименту наведено на рис. 17.

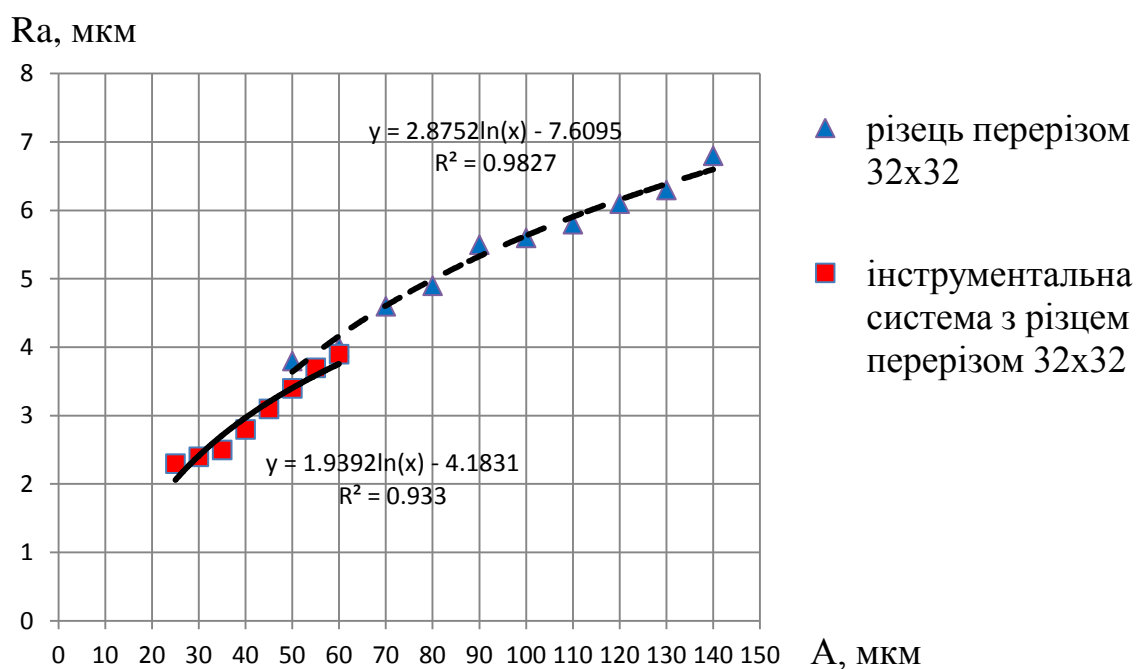


Рисунок 17 – Графіки залежностей шорсткості обробленої поверхні від амплітуди коливань

У результаті досліджень процесу розточування при різних режимах обробки встановлено, що використання розробленої інструментальної системи дозволяє проводити розточування із заданими параметрами шорсткості при вищих режимах обробки. Внаслідок зменшення амплітуди коливань показники шорсткості обробленої поверхні при розточуванні з використанням розробленої інструментальної системи знизилися в середньому в 1,3 разу. При проведенні експериментальних досліджень показників точності обробки отвору в поперечному та повздовжньому перерізах встановлено, що при використанні інструментальної системи при розточуванні отвору $\varnothing 300$ мм і довжині 250 мм різниця діаметрів початкового та кінцевого перерізів зменшилась з 0,09 до 0,02 мм, радіальне биття зменшилось з 0,15 до 0,03 мм, у порівнянні з обробкою консольнозакріпленим розточувальним різцем.

У шостому розділі розроблено рекомендації з експлуатації інструментальної системи для розточування отворів на токарних верстатах і наведено аналіз результатів її використання.

Розроблена інструментальна система може використовуватися для розточування отворів діаметром 150–500 мм, завдовжки 100–400 мм у деталях класу втулок при обробці на середніх і великих токарних верстатах як універсальних, так і оснащених системою ЧПК. Для ефективного використання інструментальної системи рекомендовано дотримуватися вірних режимів обробки, які потрібно призначити за загальномашинобудівними нормативами. З урахуванням підвищення жорсткості розточувальних різців при обробці з використанням інструментальної системи рекомендується вводити нові коефіцієнти на подачу, які залежать від співвідношення вильоту й висоти державки різця, порівняно з тими самими коефіцієнтами для розточування різцями, консольнозакріпленими в різцетримачі. Введення нових коефіцієнтів при визначенні величини подачі дає змогу підвищити її для різних відношень вильоту різця і висоти його перерізу в середньому в 1,24 разу.

У результаті підвищення вібростійкості процесу розточування досягнуто збільшення середнього періоду зносостійкості інструменту в 1,37 разу.

Для оцінювання ефективності застосування розробленої інструментальної системи з урахуванням змін у режимах різання при розточуванні на токарних верстатах був визначений коефіцієнт зміни продуктивності обробки, який показує підвищення продуктивності обробки на 8,4 %.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-технічну задачу підвищення ефективності обробки отворів великих діаметрів на токарних верстатах за рахунок створення вібростійкої інструментальної системи.

1. Уперше розроблено методичне й конструктивне забезпечення створення вібростійкої інструментальної системи для розточування отворів на токарних верстатах, використання якої дозволяє підвищити точність, якість і продуктивність обробки.

2. На підставі досліджень характеристик розточувальних різців при обробці отворів на токарних верстатах встановлено, що зі збільшенням вильоту інструмента із різцетримача істотно підвищується величина прогину державки під дією сили різання. Так, для різця з перерізом державки 32×32 мм зі збільшенням вильоту зі 150 до 250 мм прогин збільшується в 3,5 разу.

3. Отримано розрахункову формулу для визначення власної частоти розточувального різця, яка дозволяє прогнозувати частотну характеристику інструменту залежно від його конструктивних параметрів.

4. На підставі аналізу розроблених математичних і тривимірних моделей встановлено, що при створенні додаткової рухомої опори державки, амплітуди коливань вершини розточувального різця зменшуються в 1,2–3,5 разу в залежності від вильоту інструменту.

5. На підставі теоретичних досліджень і комп'ютерного моделювання уперше запропоновано структурну схему вібростійкої інструментальної системи, що забезпечує підвищення вібростійкості шляхом створення додаткової рухомої опори державки розточувального різця.

6. Аналіз розробленої тривимірної моделі показує обґрунтованість теоретичних положень про поліпшення динамічних характеристик процесу розточування за рахунок застосування вібростійкої інструментальної системи.

7. Експериментальні дослідження показали, що застосування розробленої інструментальної системи з додатковою рухомою опорою дозволяє підвищити жорсткість різця при великих вильотах у середньому в 3 рази, зменшити амплітуду коливань у середньому в 2,5 рази.

8. Виробничими дослідженнями розточування з використанням розробленої інструментальної системи встановлено зниження шорсткості обробленої поверхні в середньому в 1,3 рази і підвищення точності обробки в повздовжньому й поперечному перерізах отвору в порівнянні з розточуванням консольнозакріпленим різцем. Так, при розточуванні отвору Ø300 мм і довжині 250 мм різниця діаметрів початкового та кінцевого перерізів зменшується з 0,09 до 0,02 мм, радіальне биття зменшується з 0,15 до 0,03 мм.

9. Застосування розробленої конструкції інструментальної системи дозволяє збільшити середній період стійкості різального інструменту на 37 % за рахунок зниження амплітуди коливань, підвищити подачу на 24 % за рахунок збільшення жорсткості різального інструменту й підвищити продуктивність обробки на 8,4 % при дотриманні запропонованих рекомендацій з вибору режимів різання.

10. Результати роботи впроваджено на ПАТ «Новокраматорський машинобудівний завод» і ТОВ «НДІПТмаш – дослідний завод», а також у навчальний процес кафедри «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструменти та технології» Донбаської державної машинобудівної академії.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Стаття, яка включена до міжнародних наукометричних баз:

1. Хорошайло В. В. Повышение виброустойчивости растачивания на токарно-винторезных станках / В. В. Хорошайло // Технологический аудит и резервы производства. – 2016. – № 1/1 (27). – С. 17–22.

Стаття в зарубіжному виданні матеріалів міжнародної конференції:

2. Vadim Khoroshailo. Improving of Vibration Resistance of Boring Tools by Big Diameter Holes Tooling on Lathe / Vadim Khoroshailo, Viktor Kovalov, Predrag Dasic // 9th International Conference Interdisciplinarity in Engineering, INTER - ENG 2015, 8–9 October 2015, Tirgu – Mures, Romania. Procedia Technology. – 2016. – Volum 22. – P. 153–159. (Дисертантом розроблено математичну модель процесу коливань при розточуванні і конструкцію вібростійкої інструментальної системи.)

Статті у фахових виданнях України:

3. Моделирование колебаний сборных тяжело нагруженных резцов с учетом процесса резания / В. С. Гузенко, С. Л. Миранцов, В. В. Хорошайло, Д. В. Бондаренко // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2003. – Вип. № 14. – С. 159–164. (Дисертантом проведено аналіз результатів моделювання коливань різців із урахуванням процесу різання.)

4. Гузенко В. С. Компьютерное моделирование напряженно-деформированного состояния расточных резцов / В. С. Гузенко, В. В. Хорошайло, В. С. Соловьев // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – Вип. № 32. – С. 413–416. (Дисертантом створено і розраховано тривимірну модель розточувального різця.)

5. Хорошайло В. В. Повышение виброустойчивости расточных резцов при обработке отверстий большого диаметра на токарно-винторезных станках / В. В. Хорошайло, В. С. Гузенко, С. Л. Миранцов // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – Вип. № 35. – С. 131–135. (Дисертантом розроблено методику підвищення вібростійкості розточувальних різців із використанням інструментальної системи з рухомою опорою.)

6. Хорошайло В. В. Исследование напряженно деформированного состояния расточных резцов с корректирующей инструментальной оснасткой / В. В. Хорошайло // Надійність, інструменту та оптимізація технологічних систем : збірник наукових праць. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – Вип. № 37. – С. 78–83.

Тези та доповіді на наукових конференціях:

7. Хорошайло В. В. Моделирование деформаций сборного расточного резца при статическом нагружении / В. В. Хорошайло, В. С. Гузенко, Г. Г. Позняк // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали IV Міжнародної науково-технічної конференції, 5–8 червня 2006 року / під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2006. – С. 108.

8. Хорошайло В. В. Компьютерное моделирование и расчет напряженно-деформированного состояния расточных резцов / В. В. Хорошайло, В. С. Гузенко, В. С. Соловьев // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції, 4–6 червня 2013 року / під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2013. – С. 132.

9. Хорошайло В. В. Исследование напряженно-деформированного состояния расточных резцов с корректирующей инструментальной оснасткой / В. В. Хорошайло // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції, 23–24 вересня 2014 року / під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2014. – С. 84.

10. Хорошайло В. В. Повышение виброустойчивости расточных резцов при обработке отверстий большого диаметра на токарно-винторезных станках / В. В. Хорошайло // Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку : матеріали XIII Міжнародної науково-технічної конференції, 2–4 червня 2015 р. / під заг. ред. В. Д. Ковальова. – Краматорськ : ДДМА, 2015. – С. 92.

11. Хорошайло В. В. Зниження рівня вібрацій при обробці отворів на токарно-гвинторізних верстатах / В. В. Хорошайло // Актуальні задачі сучасних технологій : зб. тез доповідей Міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів, 25–26 листопада 2015 р. – Тернопіль : ТНТУ, 2015. – С. 276.

12. Хорошайло В. В. Зменшення амплітуди коливань при обробці отворів на токарних верстатах / Хорошайло В. В. // Intellectual potential of the XXI century '2015. – Режим доступу: <http://www.sworld.com.ua/index.php/ru/technical-sciences-m215/machines-and-mechanical-engineering-m215/26544-m215-094>

Патенти на винаходи:

13. Патент № 74324 Україна, МПК⁷ В23В 1/00. Спосіб розточування глибоких отворів великих діаметрів на токарних верстатах / Хорошайло В. В. – № u201204051 ; опубл. 25.10.2012, Бюл. № 20. – 4 с.

14. Патент № 85983 Україна, МПК⁷ В23В 1/00. Рухомий люнет для розточування отворів великих діаметрів та довжини на токарних верстатах / Хорошайло В. В. – № u201306935 ; опубл. 10.12.2013, Бюл. № 23. – 4 с.

АНОТАЦІЯ

Хорошайло В. В. Підвищення ефективності розточування отворів на токарних верстатах шляхом створення вібростійкої інструментальної системи. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.03.01 – процеси механічної обробки, верстати та інструменти. – Донбаська державна машинобудівна академія, Краматорськ, 2016.

Дисертація присвячена розв'язанню науково-технічної задачі підвищення ефективності обробки отворів на токарних верстатах за рахунок створення вібростійкої інструментальної системи. Автором проаналізовано умови експлуатації розточувальних різців на токарних верстатах і розроблено методику, за якою проведено теоретичні й експериментальні дослідження характеристик розточувальних інструментів і систем. На цій основі створено вібростійку інструментальну систему для розточування отворів на токарних верстатах, яка створює додаткову рухому опору державки різця. Встановлено, що за рахунок використання розробленої інструментальної системи значно знизилась амплітуда коливань вершини різця в процесі різання, що дало змогу створити умови для підвищення ефективності обробки. Так, при розточуванні отворів на токарних верстатах з використанням

розробленої інструментальної системи в заготовках із якісної конструкційної сталі досягнуто підвищення продуктивності обробки на 8,4 % при забезпеченні точності та якості обробки й зниженні зносу інструменту в 1,37 разу.

Ключові слова: розточування, отвори, розточувальний різець, інструментальна система, коливання, вібростійкість.

АННОТАЦИЯ

Хорошайло В. В. Повышение эффективности растачивания отверстий на токарных станках путем создания виброустойчивой инструментальной системы. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.03.01 – процессы механической обработки, станки и инструменты. – Донбасская государственная машиностроительная академия, Краматорск, 2016.

Диссертация посвящена решению научно-технической задачи повышения эффективности обработки отверстий на токарных станках за счет создания виброустойчивой инструментальной системы. Автором проанализированы условия эксплуатации расточных резцов на токарных станках. Изучены причины низкой виброустойчивости процесса растачивания отверстий и влияние этого явления на точность, качество обработки и на износостойкость инструмента.

В работе разработана методика, с помощью которой проведены теоретические и экспериментальные исследования расточных инструментов и систем. Методика работы основана на применении математического и компьютерного моделирования с целью создания виброустойчивой инструментальной системы для растачивания с последующими экспериментальными исследованиями. Компьютерное моделирование проведено с использованием стержневого и трехмерного проектирования с последующими расчетами инструментальных систем методом конечных элементов. В результате была создана трехмерная модель и на ее основе спроектирована виброустойчивая инструментальная система для растачивания отверстий на токарных станках, которая образует дополнительную подвижную опору державки резца.

Экспериментальные исследования показали, что использование разработанной инструментальной системы при растачивании отверстий позволяет повысить жесткость резца при больших вылетах в среднем в 3 раза и уменьшить амплитуду колебаний в среднем в 2,5 раза.

Применение разработанной инструментальной системы позволило создать условия для повышения производительности, точности, качества обработки и увеличения среднего периода стойкости расточных резцов. Так, при растачивании отверстий на токарных станках с использованием разработанной инструментальной системы в заготовках из качественной конструкционной стали достигнуто повышение производительности обработки на 8,4 % при обеспечении точности, качества обработки и снижении износа инструмента в 1,37 раза.

Ключевые слова: растачивание, отверстия, расточный резец, инструментальная система, колебания, виброустойчивость.

ABSTRACT

Khoroshailo V. V. Improving the efficiency of boring holes on the turning lathe by creating a vibrationproof tool system. – The manuscript.

The dissertation for obtaining a scientific degree of candidate of engineering sciences by specialty 05.03.01 – Machining processes, machines and instruments. – Donbass State Engineering Academy, Kramatorsk, 2016.

The thesis is devoted to solving scientific and technical problems of improving the efficiency of boring holes on the turning lathe by creating a vibrationproof tool system. The author analyzed the conditions of boring cutters on turning lathes. The project considers the technique on the base of which the theoretical and experimental research of characteristics of boring tools and systems was conducted. On the basis of this the vibrationproof tool system for boring holes on the turning lathe was created; it forms an additional movable support for the tool holder of the cutter. It is established that the amplitude of the top of the cutter in the cutting process significantly decreased due to the use of the developed tool system, which made it possible to create conditions to improve the efficiency of processing. Thus, when boring holes on the turning lathe was conducted using the developed tool system, the raise of productivity was reached by 8,4% in billets from high quality structural steel, while ensuring the accuracy and quality of processing and the reduction of the tool wear in 1,37 times.

Keywords: boring, holes, boring cutter, tooling system, oscillations, vibration resistance.

Наукове видання

ХОРОШАЙЛО Вадим Вікторович

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОЗТОЧУВАННЯ ОТВОРІВ
НА ТОКАРНИХ ВЕРСТАТАХ ШЛЯХОМ СТВОРЕННЯ
ВІБРОСТІЙКОЇ ІНСТРУМЕНТАЛЬНОЇ СИСТЕМИ**

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Підп. до друку 27.05.2016. Формат 60×84/16.
Ум. друк. арк. 0,9. Обл.-вид. арк. 0,9.
Наклад 100 пр. Зам. № 21.

Видавець і виготівник
Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м Краматорськ, вул. Шкадінова, 72.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 1633 від 24.12.2003