

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ТЕРНОПІЛЬСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ІВАНА ПУЛЮЯ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ МАШИН, СПОРУД І ТЕХНОЛОГІЙ  
КАФЕДРА КОНСТРУЮВАННЯ ВЕРСТАТІВ, ІНСТРУМЕНТІВ ТА МАШИН

**РУРА ВАДИМ СЕРГІЙОВИЧ**

УДК 621.9

**ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ШПИНДЕЛЯ  
ГОРИЗОНТАЛЬНО-ФРЕЗЕРНОГО ВЕРСТАТА**

8.05050301 «Металорізальні верстати та системи»

**Автореферат**  
дипломної роботи магістра

Тернопіль 2017

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

**Керівник роботи:** кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання верстатів, інструментів та машин  
**Шанайда Володимир Васильович,**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

**Рецензент:** кандидат технічних наук, доцент кафедри технології машинобудування  
**Паливода Юрій Євгенович,**  
Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя

Захист відбудеться 23 лютого 2017 р. з 9<sup>00</sup> години на засіданні екзаменаційної комісії №9 у Тернопільському національному технічному університеті імені Івана Пулюя за адресою: 46001, м. Тернопіль, вул. Руська, 56, навчальний корпус №4, ауд. В1

## 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

### а) Актуальність теми роботи.

Горизонтально-фрезерний верстат, відноситься до категорії обладнання, яке призначене для різних видів обробки заготовок з металу та інших матеріалів. Такі агрегати мають широкий спектр функціональних можливостей і дозволяють виконувати операції з металом самої різної складності.

Перспективним напрямком підвищення ефективності роботи горизонтально-фрезерних верстатів є зменшення відносних теплових деформацій несучої колони та виконавчих органів. Відома велика кількість способів зменшення теплових навантажень на окремі ділянки верстата і кількість запропонованих технічних рішень щороку збільшуються. Однак, існуючі підходи не задовольняють практику створення нової техніки, тому що не мають загальної концепції розрахунку та проектування. Тому, задача дослідження та розвитку теорії теплових деформацій складових елементів верстатного обладнання є актуальною та має важливе наукове і практичне значення.

Актуальність роботи визначається необхідністю розрахунку і проектування різноманітних модифікованих геометричних профілів елементів конструкції верстатного обладнання у зв'язку з підвищенням вимог до мінімізації їх теплових деформацій.

### б) Мета і завдання.

*Метою роботи* є дослідження проходження теплового потоку від місця закріплення різального інструменту до хвостової частини шпинделя шпindelного вала та температурних характеристик окремих вузлів шпindelної бабки горизонтально-фрезерного верстата; запровадити методики розрахунку теплового поля та деформацій конструктивних елементів верстата, розробити рекомендації з вибору раціональних параметрів модифікованих профілів конструктивних елементів верстата на стадії їх проектування.

Для досягнення цієї мети у роботі вирішено наступні задачі:

- провести аналіз теоретичної бази для проектування конструктивних елементів шпindelних вузлів (ШВ) верстатів з врахуванням умов тепловідведення;
- провести аналіз сучасних методик для аналізу теплового поля об'єкта досліджень;
- виконати технологічний аналіз об'єкта виробництва, виконати комплекс розрахунків для визначення навантажень у процесі механічної обробки;
- провести аналіз схем формоутворення та можливих компоновочних схем верстата для забезпечення процесу механічної обробки
- провести кінематичний розрахунок приводу головного руху верстата;
- провести конструювання окремих елементів верстатного обладнання;
- провести дослідження деформацій у характерних точках шпindelного вала горизонтально-фрезерного верстата.

### с) Об'єкт, методи та джерела дослідження.

*Об'єкт дослідження.* Конструктивні елементи шпindelної бабки горизонтально-фрезерного верстата мод. 6P82.

*Предмет дослідження.* Теплові деформації конструктивних елементів шпindelьної бабаки горизонтально-фрезерного верстата мод. 6P82.

*Методи дослідження.* В основу роботи покладено фундаментальні положення теорії теплового поля з використанням методу теплового балансу для механічних передач; методу кінцевих елементів, методів теорії пружності, теорії міцності, математичного аналізу.

**d) Наукова новизна отриманих результатів.**

доведено можливість використання тепловідвідних тунелів у конструкції шпindelьної бабки.

**e) Практичне значення отриманих результатів.**

Результати проведених досліджень та інженерного розрахунку можна використати при проектуванні нових конструкцій шпindelьних вузлів.

**f) Апробація.**

Результати досліджень за тематикою магістерської роботи доповідались IX Всеукраїнській студентській науково - технічній конференції (Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя (м. Тернопіль, 20-21 квітня 2016 р.) і опубліковані в збірнику:

Матеріали IX Всеукраїнської студентської науково - технічної конференції / В 2 т. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя (м. Тернопіль, 20-21 квітня 2016 р.), 2016.- Т. 1. - 245 с. – с. 164.

**2. Структура роботи.** Робота складається зі ступу, 9 розділів, висновків, списку літератури (43 найменування), 3 додатків.

Загальний обсяг тестової частини – 211 сторінок, 23 таблиць, 63 рисунків.

**3. ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ**

a) У **Вступі** відзначено актуальність теми магістерської роботи, сформульована мета виконання роботи, а також перелічено завдання, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети та комплексного наповнення дипломної роботи магістра.

b) **Перший "АНАЛІТИЧНИЙ РОЗДІЛ"** розкриває зміст попередньо виконаних наукових досліджень за тематикою магістерської роботи, а також теоретичні засади, які покладені в основу як аналітичного дослідження, так і експериментального базису. Огляд та аналіз попередніх наукових та практичних досліджень дозволив зробити наступні висновки: на сьогоднішній день істотне зростання швидкостей різання неухильно підвищує теплову навантаженість ШВ верстата. Провідні фірми-виробники високоточних верстатів застосовують комплектуючі, що забезпечують таку точність: підшипники - биття не більше 1 мкм; виготовлення та складання шпindelьних вузлів - силові зміщення в межах 2-3 мкм. Забезпечення зазначеної точності неможливо без урахування теплових деформацій навіть при невеликих частотах обертання. Без врахування теплового впливу на верстат, при частотах обертання 6000 об/хв, неможливо домогтися вихідної точності менше 10 мкм.

Температурні деформації елементів несучої системи верстата викликають температурні зміщення в зоні різання, які призводять до похибок обробки. В верстатах, для мащення опор яких використовується рідке мастило, температурні зміщення сягають значних величин: в вертикальній площині – 34

мкм, в горизонтальній – 18 мкм, що не дозволяє використовувати ці верстати для одержання точних деталей. В автоматах з пластичним мащенням опор шпинделя температурні зміщення знижуються в 2 – 3 рази і в обох площинах складають 8 – 9 мкм, що за визначених умов може забезпечити одержання на автоматі деталей 8 квалітету точності.

с) У другому розділі **"ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМ ФОРМОУТВОРЕННЯ НА ПРОЕКТОВАНОМУ ВЕРСТАТІ І ОПТИМІЗАЦІЯ ЙОГО КОМПОНУВАЛЬНОЇ СХЕМИ"** проведено аналіз конструкторсько-технологічних особливостей однієї із деталей, яку обробляють на досліджуваному верстаті, проведено комплекс технологічних розрахунків, здійснено аналіз формуютьсхем, які можна реалізувати на цьому верстаті при виконанні технологічного процесу механічної обробки цієї деталі. Сформовано структурно-кінематичну схему досліджуваного верстата. Значна увага приділено аналізу компоновальних схем верстатного обладнання подібного типу. Здійснено глибокий аналіз верстатного забезпечення для обраної групи верстатів, що мають подібні набори модульних комплектів, технологічних та конструктивних модулів. Обґрунтовано обрання найбільш раціонального варіанту компоновки верстата для обраного типу верстатного обладнання.

д) У третьому розділі **"ВИБІР ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ВИХІДНИХ ДАНИХ НА РОЗРОБКУ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ. ТЕХНОЛОГІЧНИЙ РОЗРАХУНОК"** здійснено комплекс технологічних розрахунків щодо аналізу точності механічної обробки при раціональному підборі системи базування деталі та оптимального проектування раціонального варіанту технологічного процесу механічної обробки деталі-представника. Розраховано режими різання на різні операції механічної обробки, які слугують вихідними даними для розробки наступного розділу дипломної роботи.

е) Четвертий розділ **"ПРОЕКТУВАННЯ КОНСТРУКЦІЇ ВЕРСТАТНОГО ОБЛАДНАННЯ"** включає необхідний комплекс проектних розрахунків, які пов'язані із розробкою кінематичного ланцюга приводу головного руху верстата, детальним проектним розрахунком елементів конструкції ШВ верстата. Значна увага приділена розрахунку радіальної та осьової жорсткості вала шпинделя верстата. За результатами проектного розрахунку встановлено, що радіально жорсткість вала шпинделя на опорах кочення становить 526 Н/мкм, а осьова жорсткість – 820 Н/мкм. Отримані результати задовольняють граничні умови щодо проектування універсального верстатного обладнання фрезерної групи.

ф) У п'ятому розділі **"НАУКОВО-ДОСЛІДНИЙ РОЗДІЛ"** проведено огляд попередніх результатів досліджень теплового поля у ШВ різних груп верстатів. Значна увага приділена дослідженню тепло-фізичних характеристик елементів конструкції ШВ верстата. Охарактеризовано види теплових станів температурних систем верстата. Встановлено, що найбільш типовою схемою є несиметрична система теплового навантаження. Проведено аналітичні дослідження характеру деформації несучих колон верстатів та заготовки під впливом температурного навантаження. Отримано лістинг

програмного аналітичного розрахунку теплового поля шпindelного вала горизонтально-фрезерного верстата.

г) **Шостий розділ "СПЕЦІАЛЬНИЙ РОЗДІЛ (комп'ютерні розрахунки та автоматизоване проектування)"** включає розгляд питань, які пов'язані з автоматизованим проектуванням зубчатих передач та автоматизації розрахунку режимів різання на фрезерних верстатах з використанням спеціалізованого програмного забезпечення.

h) **Сьомий розділ "ОБҐРУНТУВАННЯ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРИЙНЯТИХ РІШЕНЬ"** містить комплекс необхідних економічних розрахунків, які доводять економічну ефективність прийнятих технічних рішень. Розрахунковий економічний ефект становить 640786 грн. на рік.

i) **Восьмий розділ "ОХОРОНА ПРАЦІ ТА БЕЗПЕКА В НАДЗВИЧАЙНИХ СИТУАЦІЯХ"** присвячений висвітленню питань, щодо забезпечення безпечних умов праці на виробництві та аналізу дій адміністративного та виробничого персоналу у разі виникнення надзвичайних ситуацій.

ј) **Дев'ятий розділ "ЕКОЛОГІЯ"** містить опис негативних факторів, які можуть впливати на екологічний стан навколишнього середовища та шляхи зменшення цього впливу у процесі виробничої діяльності.

#### **4. ВИСНОВКИ**

4.1.Проведений аналіз базового ТП обробки деталі “ ПСК 5.ОА.02.314” показав можливість скорочення кількості верстатного обладнання шляхом розширення його технологічних можливостей.

4.2.Кінематичні та точнісні параметри верстата моделі 6P82 після модифікації конструкції найбільш повно відповідають виробничим потребам.

4.3.Сумарні деформації виконавчих органів механізмів подач у процесі обробки можна зменшити на 45% за рахунок вирівнювання теплових деформацій несучих елементів у конструкції верстата.

4.4.Розроблена аналітична модель опори ШВ на кулькових радіально-упорних підшипниках враховує пружні та пружнопластичні контактні силові зміщення, а також сили тертя, кути контакту тіл кочення і кілець, що підвищує точність розрахунку жорсткості даного класу опор.

4.5. Практичною реалізацією служать розроблені моделі: ТЕРМОПРУЖНОСТІ, яка дозволяє кількісно визначити зміщення переднього кінця ШВ; аналітична модель дозволяє розрахувати жорсткість опори ШВ під дією теплових і силових навантажень.

4.6.Використання методики та моделей показала, що похибка оцінки силових зсувів переднього кінця шпindelа не перевищує 12% для надлишкової температури ШВ до 8 ° С, і досягає 30% для надмірного нагріву до 40 ° С.

4.7.При раціональному розміщенні ТТ в електро-шпindelних вузлах (ЕШВ) досягнуто зменшення теплових деформацій пінолі ЕШВ з 24,3 до 4 мкм (в 6 разів) і досягається одночасне підвищення жорсткості вузла до 40%, в порівнянні з роботою ЕШВ без ТТ, з урахуванням обмеження теплотривкості і не допускаючи втрати ним працездатності.

- 4.8. Термостабілізація пінолі ЕШВ з ТТ відбувається за 1000 с, а без використання ТТ протягом 7200 с при тепловому навантаженні в 15,2 Вт (частота обертання шпинделя 4500 хв<sup>-1</sup>).
- 4.9. Очікуваний економічний ефект від проведених організаційних та технологічних змін передбачається в розмірі 640786 грн. на рік.

## **5. ПЕРЕЛІК НАУКОВИХ ПРАЦЬ**

1. Рура В.С. Дослідження температурного поля шпиндельного вузла горизонтально-фрезерного верстата /Шанайда В., Рура В. Матеріали ІХ Всеукраїнської студентської науково - технічної конференції / В 2 т. – Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет ім. І.Пулюя (м. Тернопіль, 20-21 квітня 2016 р.), 2016.- Т. 1. С. 164.
2. СКЛЯРОВ, Р., ШАНАЙДА, В. Використання багатofункціонального пакету MathCad при прогнозуванні параметрів металорізальних верстатів. Збірник тез доповідей ХVІ наукової конференції Тернопільського національного технічного університету імені Івана Пулюя, 2012, С. 69.
3. Шанайда В. Дослідження перехідних процесів електропривода металорізального верстата з використанням інформаційних технологій / Скляр Р., Шанайда В., Савчук М. // Вісник ТНТУ. — 2011. — Том 16. — № 1. — С.117-125.
4. Луців І.В. Теорія технічних систем /Ю.М.Кузнецов, Ю.К.Новосьолов, І.В.Луців – Севастополь: СевНТУ, 2011. – 246 с.
5. В. В. Солоха, В. С. Ліліченко, М. В. Фролов. Зниження впливу теплових деформацій на точність обробки на токарних верстатах / В. В. Солоха, В. С. Ліліченко, М. В. Фролов // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні №2, 2011. – С. 69-72.
6. Алферов В.И. Исследование и расчет температурных полей и температурных деформаций прецизионных металлорежущих станков от колебаний воздуха и от внутренних источников тепла: Дис. канд. техн. наук. М.: ЭНИМС, 1968.- 168 с.
7. Шанайда В.В. Пакет MathCAD в інженерних розрахунках/ Шанайда В.В. – Тернопіль: Видавництво ТДТУ, 2001. – 163 с.
8. Кривий П.Д. Трудомісткість конструювання та виготовлення металорізальних і деревообробних верстатів: Навчальний посібник/ Кривий П.Д., Шарик М.В., Сотник І.П. – Тернопіль: ТДТУ, 2005. – 128 с.
9. Врагов Ю.Д. Анализ компоновок металлорежущих станков: (Основы компонетики)/ Врагов Ю.Д. –М: Машиностроение, 1978. – 208 с.
10. Пуш В.Э. Металлорежущие станки./ Пуш В.Э.- М.: Машиностроение, 1986. - 526с.
11. Расчет деталей и узлов металлорежущих станков с использованием ЭВМ/ С.А.Дубиняк, С.Г.Нагорняк, И.В.Луцив, И.Д.Дубецкий :Киев УМК ВО, 1989. – 152 с.

## 6. АНОТАЦІЇ

Рура В.С.; "Дослідження теплового поля шпинделя горизонтально-фрезерного верстата". 8.05050301 – Металорізальні верстати та системи; Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя; м. Тернопіль, 2017 р.

У дипломній роботі розглянуті питання, які пов'язані з аналізом технологічного процесу механічної обробки деталі, дослідженням комплексу формотворних рухів та розробкою компоновальних схем верстата для їх повного або часткового забезпечення. Реалізовано проектний розрахунок та розробку окремих вузлів верстата. Здійснено розрахунковий аналіз теплових полів у корпусі та елементах конструкції шпиндельного вузла консольного горизонтально-фрезерного верстата мод. 6P82. Реалізовано дослідження теплових деформацій шпиндельного вала верстата з використанням засобів автоматизованого розрахунку. Встановлено, що сумарні деформації виконавчих органів механізмів у процесі обробки можна зменшити на 45% за рахунок вирівнювання теплових деформацій несучих елементів у конструкції верстата. Розроблена аналітична модель опори ШВ на кулькових радіально-упорних підшипниках враховує пружні та пружно-пластичні контактні силові зміщення, а також сили тертя, кути контакту тіл кочення і кілець, що підвищує точність розрахунку жорсткості опор з врахуванням теплових навантажень.

Ключові слова: температурне поле, деформації, шпиндель, теплові потоки.

Rura V.S.; " Investigation of thermal field of horizontal milling machine spindle" 8.05050301 - metal-cutting machine tools and systems; Ternopil Ivan Pul'uj National Technical University; Ternopil, 2017.

Thesis includes issues related to the analysis of the process of machining parts, research complex movements shaping and developing the machine layout schemes for their full or partial support. Implemented project calculation and design of individual units of the machine. Done calculation analysis of thermal fields in the building and construction elements spindle hub console horizontal milling machine mod. 6P82. Implemented study the thermal deformation of spindle shaft of the machine with the use of automated calculation. Established that the total deformation in the executive bodies at mechanisms during processing can be reduced by 45% due to the alignment of thermal deformation of bearing elements in the design of the machine. We have formed analytical model a support of spindel with angular ball bearing. This model is possible to consider for calculation an elastic deformations and elasto-plastics deformations, frictional force, angle of contact a rolling element of bearing at the internal and external rings of bearing and to increases the accuracy of calculation a rigidity for a rolling-contact bearing with adding thermal load.

Key words: thermal field, deformation, spindel, thermal flows.