

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНБАСЬКА ДЕРЖАВНА МАШИНОБУДІВНА АКАДЕМІЯ

АНТОНЕНКО ЯНА СЕРГІЇВНА



УДК 621.9.06-229.004

**ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВАЖКИХ ТОКАРНИХ ВЕРСТАТІВ
ШЛЯХОМ УПРАВЛІННЯ ПАРАМЕТРАМИ НЕСУЧОЇ СИСТЕМИ**

Спеціальність 05.03.01 – процеси механічної обробки,
верстати та інструменти

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Краматорськ – 2019

Дисертацією є рукопис.

Дисертацію виконано на кафедрі «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології» Донбаської державної машинобудівної академії (ДДМА) Міністерства освіти і науки України, м. Краматорськ.

Науковий консультант доктор технічних наук, професор,
Лауреат Державної премії України
у галузі науки і техніки
Ковальов Віктор Дмитрович, ректор
Донбаської державної машинобудівної академії,
м. Краматорськ.

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

кандидат технічних наук, доцент,
Юрчишин Оксана Ярославівна,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
ім. І. Сікорського»,
доцент кафедри конструювання верстатів
та машин, Механіко-машинобудівний
інститут.

Захист відбудеться 7 травня 2019 року о 10⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02 Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: м. Краматорськ, проспект Машинобудівників, 37, корпус № 3, ауд. №3308.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці Донбаської державної машинобудівної академії за адресою: м. Краматорськ, вулиця Академічна, 72, корпус №1 або web-адресою: <http://digma.donetsk.ua/spetsializovana-vchena-rada-d12.105.02.html>

Автореферат розісланий «05» квітня 2019р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 12.105.02
кандидат технічних наук, доцент



С. Л. Міранцов

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Одним із найголовніших завдань машинобудування у наш час є випереджувальне зростання таких перспективних галузей, як важке верстатобудування, приладобудування, енергетична, електротехнічна, електронна промисловість. Розвиток цих галузей можливий за умови забезпечення підприємств сучасними конкурентоспроможними машинами, підвищенням темпів оновлення обладнання, зростанням його якості та надійності, внаслідок чого підвищуються вимоги до машин, зростає точність їх виготовлення. Базовою галуззю машинобудування є верстатобудування, що зорієнтовано в сферах з розвинутим машинобудуванням, науково-дослідною і конструкторською базами. Важкі верстати виробляються в Україні та, враховуючи їх достатньо велику вартість, якість проектування і експлуатації важких верстатів, мають дуже велике значення.

Підвищення точності та продуктивності важких токарних верстатів являє собою комплексну і найбільш важливу проблему в досягненні якості нової продукції. Нарощування якості обладнання на стадіях проектування і виготовлення досягається за рахунок вдосконалення методів розрахунків конструкцій, використання прогресивних технологій оброблення та монтажу деталей і вузлів, у результаті чого забезпечується зростання показників жорсткості важкого верстата, вібростійкості та точності взаємного розташування виконавчих органів.

Найбільш перспективним напрямком підвищення характеристик точності важких токарних верстатів є впровадження систем адаптивного управління, для розвитку якого у сучасному виробництві відкрито широкі можливості завдяки розвитку систем ЧПК. При побудові програм ЧПК потрібно врахувати реальну динамічну структуру верстата і її вплив на траєкторії формотвірних рухів, оскільки при цьому виникає необхідність аналізу безлічі чинників, таких як зміна жорсткості заготовки, вплив параметрів несучої системи верстата, температура і явища, пов'язані з нею. Несуча система верстата утворюється сукупністю елементів верстата, через які замикаються сили, що виникають між інструментом і заготовкою у процесі різання. У балансі точності оброблення на важких токарних верстатах пружні деформації несучої системи відіграють важливу роль, при цьому питання зниження металоємності залишається актуальним, оскільки вага елементів несучої системи складає до 80% від ваги верстата. У зв'язку з їх специфічними складними формами, а також високими вимогами точності важких верстатів, несучі системи мають забезпечувати і зберігати протягом терміну служби верстата можливість оброблення із заданими режимами і необхідною точністю.

Таким чином, розроблення методів управління параметрами несучої системи важких токарних верстатів є актуальним науково-технічним завданням, вирішення якого дозволить підвищити точність оброблення великогабаритних деталей при одночасному забезпеченні умов зниження металоємності.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана у відповідності з науковою тематикою кафедри «Металорізальні верстати та інструменти» (зараз «Комп'ютеризовані мехатронні системи, інструмент і технології») Донбаської державної машинобудівної академії Дк-03-2001 «Підвищення якості та ефективності верстатного обладнання та різального

інструменту для важкого машинобудування» (№0102U001664); Д-04-2004 «Розробка системи управління якістю роботи важких верстатів та інструментів» (№0104U004038); Д-06-07 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (№0107U001306); Дк-08-04 «Удосконалювання технологічного середовища для автоматизованого виробництва продукції важкого машинобудування» (№0105U002445); Д-06-2007 «Розробка інтегрального комплексу оптимального управління адаптивною технологічною системою важких верстатів» (0107U001306); Дк-02-2009 «Підвищення якості верстато-інструментальних систем для автоматизованого виробництва в умовах важкого машинобудування» з 01.01.2009 по 31.12.2013р. Д-05-2009 «Розробка інформаційних технологій для систем адаптивного управління процесом механічної обробки деталей на важких верстатах» (0109U002669); Д-03-2011 «Оперативна оптимізація процесів різання для систем адаптивного управління важкими верстатами нового покоління» (0111U000884); Д-03-2013 «Розробка технологічних систем для екологічно ефективної обробки деталей енергетики на базі адаптивних багатоцільових важких верстатів» (0113U000607); Дк-01-2014 «Підвищення надійності та продуктивності комп'ютеризованих мехатронних верстатів інструментальних систем важкого машинобудування» (0114U002757); Д-03-2015 «Управління процесами механічної обробки деталей вітроенергетики з нових важкооброблюваних матеріалів на важких верстатах» (0115U003124); Д-03-2017 «Підвищення ефективності виготовлення виробів оборонного та енергетичного призначення шляхом створення високотехнологічних мехатронних верстато-інструментальних систем» (0117U001165).

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності важких токарних верстатів за рахунок забезпечення жорсткості й управління параметрами несучої системи при мінімально можливій масі.

Досягнення мети здійснюється за рахунок виконання таких завдань:

1 Проаналізувати методи підвищення точності технологічної системи, структуру виникнення похибок при обробленні великогабаритних деталей; методи моделювання несучих систем верстатів; види автоматичного і адаптивного керування, що існують;

2 Розробити структурні та функціональні моделі керування точністю важкого верстата, математичні моделі роботи адаптивної системи на базі важкого токарного верстата для оброблення великогабаритних деталей;

3 Розробити методи створення конструкцій станин важких токарних верстатів, провести параметричний синтез й аналіз їх експлуатаційних характеристик;

4 Створити методи компенсації похибок й адаптивного керування точністю формотвірних рухів верстата;

5. Провести експериментальні дослідження розроблених систем керування точністю;

6 Впровадити у виробництво і провести натурні виробничі дослідження систем керування точністю на важких токарних верстатах.

Об'єкт дослідження – забезпечення точності несучої системи важкого токарного верстата.

Предмет дослідження – закономірності забезпечення жорсткості та керування параметрами несучої системи важкого верстата для забезпечення високої працездатності.

Методи досліджень. Методологічною основою роботи є комплексний підхід до вивчення процесу оброблення деталей на важких верстатах, їх умов і особливостей, закономірностей процесів.

Теоретичні дослідження проводилися на базі основних положень і методів теорії різання металів, технології машинобудування, механіки твердого тіла, теорії пружності, теорії математичного і фізичного моделювання з використанням методів обчислювальної математики. Для розроблення математичних моделей використовувалися результати досліджень динамічних характеристик важких верстатів, проведених автором й іншими дослідниками.

Дослідження об'єктів і систем керування проводилось експериментальними методами на основі теорій визначення жорсткості та міцності базових деталей важких верстатів з використанням методик натурних випробувань у виробничих умовах.

Широко використовувалися можливості сучасних ПЕОМ.

Наукова новизна одержаних результатів

1 Вперше розроблено методи керування точністю важкого токарного верстата зі зворотнім зв'язком: методом вимірювання похибок деталі; за рахунок моделювання деформації деталі; за рахунок моделювання похибок технологічної системи; із застосуванням адаптивної комплексної системи.

2 Отримали подальше розвинення математичні моделі роботи великогабаритних несучих систем з урахуванням типу та граничних силових, температурних навантажень.

3 Вдосконалено засоби адаптивного керування точністю по відхиленням елементів несучої системи і похибок готової деталі.

4 Розроблено метод компонування станин важких токарних верстатів з системою сил, розподілених навантажень, що діють на верстат у процесі його роботи з забезпеченням мінімальних відхилень базових поверхонь і можливістю сприйняття підвищених навантажень від маси заготовки та сил різання.

Практичне значення роботи

1 Розроблено методи проектування несучих систем важких токарних верстатів з урахуванням характеру навантаження.

2 Отримані порівняльні результати працездатності станин важких токарних верстатів литої та зварної конструкції.

3 Запропоновано схеми і конструкцію адаптивних елементів керування геометричною точністю технологічних систем.

4 Розроблено рекомендації з проектування несучої системи важкого токарного верстатного обладнання з ЧПК підвищеної точності.

5 Розроблено рекомендації щодо підвищення конкурентоспроможності важких токарних верстатів. Отримано результати розрахунків елементів несучої системи роботи верстатів при підвищених робочих навантаженнях з забезпеченням необхідної жорсткості.

Реалізація результатів роботи. На підставі результатів досліджень цієї роботи розроблені та впроваджені у виробництво методика керування точністю важкого токарного верстата складових несучої системи, прогнозованими відхиленнями, вимірюваними параметрами процесу оброблення. Результати роботи впроваджені при створенні важких токарних верстатів нового покоління, що випускаються ПрАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування», розроблені та впроваджені методи проектування несучих систем важких токарних верстатів з урахуванням характеру навантаження. Економічний ефект від впровадження їх у розрахунку на 1 верстат становить 84 тис. грн. Результати роботи впроваджені також при реконструкції важких токарних верстатів на ТОВ «Важстанкосервіс» з економічним ефектом 31 тис. грн на 1 важкий токарний верстат. Результати використовуються у навчальному процесі у ДДМА.

Апробація результатів роботи. Основні положення і результати роботи доповідалися та обговорювалися на понад 15 наукових конференціях і семінарах, у тому числі на міжнародних: у Чорногорії, м. Будва (2nd International Conference ICQME) –2007; Сербії, м. Врнячка Баня (9th International Conference «RADMI») – 2015, м. Запоріжжя (Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво: дев'ята Всеукраїнська молодіжна науково-технічна конференція – 2009); м. Суми, («Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво» – 2014), м. Львів («Прогресивні технології в машинобудуванні» – 2015); м. Тернопіль («Всеукраїнська науково-практична конференція, присвячена пам'яті заслуженого винахідника України академіка АН вищої школи України, д. т. н., професора Нагорняка С. Г.» – 2017, м. Чернігів (XVII Всеукраїнська науково-практична конференції «Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука-виробництво» – 2017), м. Краматорськ («Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку» – 2006–2017).

Публікації. Основні результати дисертаційної роботи опубліковано у 24 друкованих роботах, з них – 12 статей у виданнях, рекомендованих ВАК України (2 особисто), 2 статті у виданнях іноземних держав, 1 монографія, 9 тез доповідей у збірниках матеріалів конференцій.

Структура та обсяг роботи. Робота складається зі вступу, п'яти розділів, загальних висновків, додатка і переліку використаних літературних джерел. Основний текст роботи містить 151 сторінку, 136 рисунків і 6 таблиць. Перелік літературних посилань складається зі 115 найменувань. Загальний обсяг роботи становить 210 с.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі розкрито суть і стан наукової задачі, обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету і задачі досліджень, викладено наукові положення, які виносяться на захист, наведено дані щодо наукової новизни, обґрунтовано достовірність і показано практичну цінність отриманих наукових результатів, наведено дані про публікації й апробацію роботи.

У першому розділі проведено аналіз робіт, прямо чи опосередковано пов'язаних з питаннями підвищення точності металообробного обладнання на основі моделювання та керування точністю технологічних систем, що дозволило визначити мету та завдання дослідження.

Загальні питання точності вивчали Д. Н. Решетов, В. П. Портман, В. С. Корсаков, М. Г. Косов, О. О. Клочко, В. Д. Ковальов, В. О. Кудінов, Ю. М. Кузнєцов, І. В. Луців, В. Б. Струтинський та багато інших вчених.

Питання точносної надійності розглянули у своїх працях А. С. Проніков, А. В. Пуш, А. М. Дальський, В. К. Кирилов, Н. М. Султан-заде й ін.

Значний внесок у вирішення актуальних проблем процесів токарного оброблення зробили вітчизняні вчені Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко, В. О. Залога, В. О. Остаф'єв, І. Є. Грицай, Ю. В. Петраков, Н. С. Равська, П. Р. Родін, Г. П. Клименко, С. А. Клименко, Є. В. Мироненко, Я. В. Васильченко й інші.

Оброблення деталей на металорізальному обладнанні на сьогоднішній день у більшості робіт розглядається як процес, що складається з трьох етапів, які виконуються послідовно у часі: встановлення деталі, статичне налаштування технологічної системи, динамічне налаштування верстата. При виконанні кожного етапу виникають систематичні та випадкові похибки розмірів і обертань, які у результаті підсумовування і часткового компенсування один одного дають результативну похибку, що проявляється у вигляді відхилень різних характеристик якості деталей.

Проблема динамічних похибок набуває важливе значення зі зростанням габаритів, маси і зі зниженням жорсткості елементів несучих конструкцій та рухомих вузлів верстата. Ця проблема особливо актуальна для сучасних важких токарних верстатів з ЧПК підвищеної точності (рис. 1), оскільки у зазначеному випадку динамічна похибка робить істотний внесок у похибку контуру обробленого виробу.

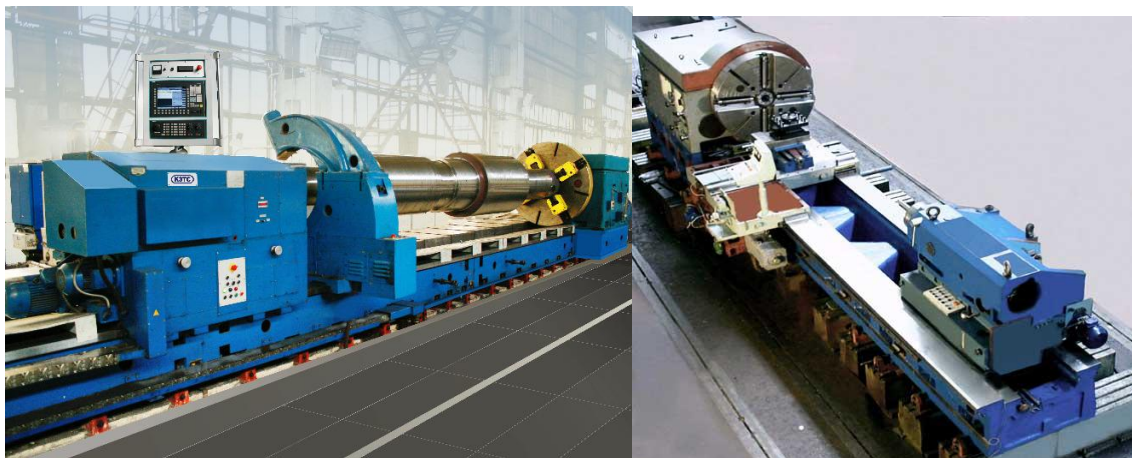


Рис. 1. Особливості конструкції важких токарних верстатів

Для отримання правильної геометричної форми деталі потрібно компенсувати не тільки коливання зусилля різання, викликані змінністю припуску і твердості заготовки, але і пружні віджимання по довжині оброблюваної заготовки, пов'язані зі зміною податливості технологічної системи.

З точки зору впровадження систем адаптивного керування існує два напрямки підвищення характеристик точності:

- автоматичне керування елементами пружних систем металорізальних верстатів, тобто адаптації несучих систем до змінюваних умов функціонування;
- автоматичне керування процесом механічного оброблення з урахуванням похибки оброблюваного виробу.

У цій роботі пропонується методика підвищення точності важких токарних верстатів з урахуванням обох напрямків.

Розглянуто походження варіантів похибок при обробленні деталей на металорізальному обладнанні. У результаті досліджень виникнення похибок при обробленні на важких токарних верстатах за методом експертного оцінювання із залученням висококваліфікованих операторів ЧПК у якості експертів виявлено, що точність форми у поздовжньому перетині є визначальною в оцінюванні балансу точності. Визначено сумарну похибку як векторну суму від переміщень, зумовлених перерахованими факторами у заданій точці:

$$\bar{\Delta}_{\Sigma m} = \sum_{i=1}^n \bar{\Delta}_{i m} \quad (1)$$

m — точка, у якій відбувається переміщення;

n — кількість факторів, що викликають виникнення похибок;

i — номер фактора.

Визначено ступінь впливу основних складових похибки форми у поздовжньому перетині. Розглянуто шляхи зменшення похибок при обробленні на важких токарних верстатах.

Наведено короткий огляд шляхів підвищення точності верстатного обладнання, що існують у наш час. Серед них можна виділити три основні напрями. Перший — класичний, полягає в тому, що для отримання необхідної точності оброблення на верстаті доводиться підвищувати до необхідного рівня точність виготовлення вузлів самого верстата, причому вона, як правило, має бути на порядок вище необхідної точності оброблення. Другий напрямок являє собою сукупність різноманітних оригінальних конструктивних рішень і технологічних прийомів, що дозволяють у певних умовах домогтися високої точності оброблення при невисокій точності обладнання.

Найбільш перспективним і економічно доцільним у наш час є третій напрям — створення адаптивних систем автоматичного керування. Принцип адаптивності полягає в отриманні інформації про параметри технологічного процесу і зовнішні збурювальні фактори за допомогою сукупності датчиків і подальшому застосуванні цієї інформації для адекватного втручання у хід технологічного процесу.

Другий розділ. У відповідності з поставленими завданнями досліджень вся робота була розбита на етапи, які представлені на рис. 2 у вигляді структурно-логічної схеми роботи.

Одним з найбільш прийнятних методів урахування деформацій елементів несучої системи є метод кінцевих елементів (МКЕ), який і було прийнято як

основний для математичного моделювання й обчислення їх у балансі точності при компенсуванні похибок оброблюваної поверхні.

Для визначення точності важкого токарного верстата було використано цілий спектр приладів вимірювання точності переміщень, температур, деформацій, відхилень: лазерні інтерферометри, пірометри, автоколіматори й ін.



Рис. 2. Загальна методика досліджень

Третій розділ. У третьому розділі було проведено аналіз факторів впливу різних видів похибок при обробленні на важких токарних верстатах. Елементи несучої системи, насамперед станини, мають найбільший вплив на точність і якість оброблення деталей. Вони є найбільш матеріаломісткими, тому потрібно раціоналізувати й оптимізувати конструкцію станин та методи їх виготовлення. Розроблено структуру проектування несучої системи важкого верстата.

У роботі досліджено та класифіковано найбільш несприятливі фактори впливу на вихідну точність при обробленні на важкому токарному верстаті, проведено ранжування та надано рекомендації щодо можливості вирішення проблеми у виробничих умовах (табл. 1).

Таблиця 1 – Найбільш несприятливі фактори впливу на вихідну точність при обробленні на важкому токарному верстаті

<i>N</i> <i>з/п</i>	<i>Найбільш несприятливі фактори впливу на точність важкого токарного верстата</i>	<i>Розрахунок</i>	<i>Оцінка впливу за 10-бальною шкалою</i>	<i>Вирішення проблеми у виробничих умовах</i>
1	Зсув супорту за наявності сил тертя в напрямних	$F = F_1 + F_2 = A\Delta/k_\tau + \Delta/k$ $\Delta = \frac{kF}{1 + kA/k_\tau}$	6	Враховується у програмі ЧПК
2	Зсув станини по відношенню до фундаменту під впливом нерівномірного температурного поля	$\Delta = l[\alpha_{ст}(t_{ст} - t_{0 ст}) - \alpha_\phi(t_\phi - t_{0 \phi})]$	8	Розроблення станини раціональної конструкції
3	Перекося станини у результаті вильоту супорту: - по напрямних в поперчній площині	-	10	Розроблення станини раціональної конструкції, використання гідростатичних напрямних
	- по напрямних у поздовжній площині	$\alpha = \delta_0/l$		
4	Прогинання станини при вижиманні башмаками	$\delta = k_\tau \tau_1 + k_\tau \tau_2,$ $\Delta = Ml^2/(8EI)$	9	Розроблення станини раціональної конструкції
5	Зсув пінолі задньої бабки при затисканні	$\delta = kp = 16kN/(\pi dl)$ $\delta = kp \left(1 + \frac{l_1}{L}\right) = \frac{8 kN}{\pi db} \left(1 + \frac{l_1}{L}\right)$ $\delta = kp[1 + (l + c)/L]$	8	Враховується у програмі ЧПК
6	Кут пружного обертання стиків станини під впливом моменту	$\varphi = \frac{2k\sigma}{D} = kM/l$ $l_\varphi = \frac{M}{\varphi}$	7	Розроблення станини раціональної конструкції
7	Зсув передньої бабки внаслідок нагріву від приводу	-	6	Попереднє налаштування та пуск верстата заздалегідь до процесу оброблення для рівномірного нагрівання

Розроблено методи підвищення точності важких токарних верстатів і методи їх моделювання:

1 Вимір відхилень готової деталі, далі ітераційна корекція траєкторій переміщення. При виконанні умови перевірки точності ($\Delta \leq |\Delta|$) робимо висновок про придатність деталі і працюємо на тому ж налаштуванні, у разі невиконання перевірки повертаємося до початку блок-схеми (рис. 3, а).

2 Попереднє математичне моделювання деформації деталі під силами різання, ваговими навантаженнями з визначенням проєкцій відхилень по координатних

керуваних осях і корекція траєкторій переміщення (рис. 3, б). При виконанні умови перевірки точності ($\Delta \leq |\Delta|$) робимо висновок про придатність деталі та працюємо на тому ж налаштуванні, у разі невиконання перевірки повертаємося до початку блок-схеми і проводимо математичне моделювання та визначення відхилень доти, поки умову не буде виконано.

3 Моделювання відхилень елементів технологічної системи: виконавчих органів верстата, інструменту, оснащення, деталі ($1_1 \dots 1_N$), підсумовування їх проекцій на осі координат з урахуванням знака ($\sum \pm$), корекція траєкторій і, за умови виконання перевірки ($\Delta \leq |\Delta|$), вимір відхилень обробленої деталі й остаточна ітераційна корекція. У разі невиконання – повторення циклу (рис. 3, в).

4 Адаптивна комплексна система, що містить:

- попереднє математичне моделювання типових деталей і технологічної системи у процесі оброблення;
- попередній вимір геометричних відхилень елементів технологічної системи від похибок, зношування й ін.;
- корекція траєкторії формотвірних рухів;
- вимір сил, моментів, температур, зношування інструменту, пружних деформацій елементів технологічної системи, розмірів обробленої деталі й у разі виконання умови ($\Delta \leq |\Delta|$) підсумкова корекція траєкторій формотвірних рухів і режимів оброблення з метою забезпечення максимальної точності, якості, продуктивності згідно з алгоритмами граничного й оптимального керування. При невиконанні – назад до початку циклу (рис. 3, г).

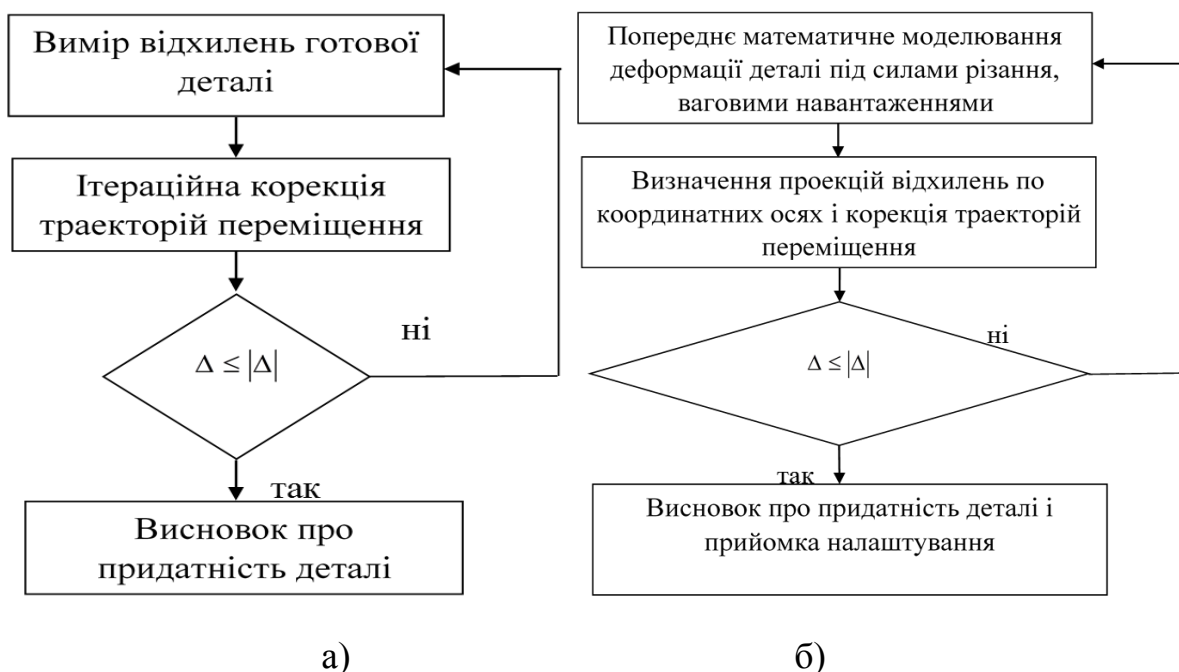


Рис. 3. Методи моделювання важких токарних верстатів

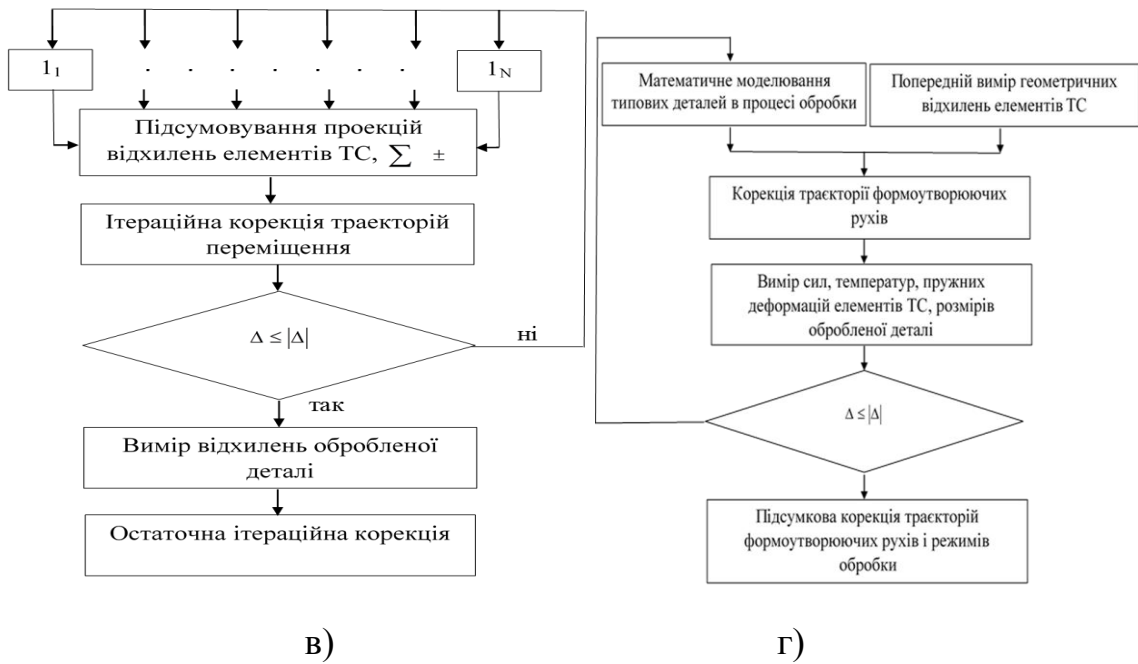


Рис. 3. Лист 2

Для розроблення системи керування точністю важкого верстата при обробленні нежорстких деталей запропоновано методики моделювання пружної технологічної системи під впливом силових і температурних факторів на основі структурного і геометричного аналізу компоновальних схем важких токарних верстатів з використанням методу кінцевих елементів програмними засобами пакетів SolidWorks Simulation 2012, CosmosWorks 2012, Creo Parametric3.0.

Проведено дискретизацію об'єкта на тривимірні кінцеві елементи. У межах кожного кінцевого елемента поле переміщень, записане як

$$u(x, y, z) = \begin{bmatrix} u_x(x, y, z) \\ u_y(x, y, z) \\ u_z(x, y, z) \end{bmatrix} \quad (2)$$

апроксимується за своїми значеннями \bar{v}_r , ($r = 1, 2, \dots, n$) у вузлах елемента за допомогою функцій форми елемента $\bar{\Psi}_r(x, y, z)$:

$$\bar{u}_r(x, y, z) = \sum_{r=1}^n \bar{\Psi}_r(x, y, z) \cdot \bar{v}_r \quad (3)$$

Тоді вектор деформацій буде мати таку апроксимацію:

$$\bar{\varepsilon}(x, y, z) = \sum_{r=1}^n [\beta_r] \cdot \bar{v}_r = [\beta] \cdot \bar{U}^{(e)} \quad (4)$$

$$[\beta_r] = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Psi}{\partial x} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\partial \Psi}{\partial y} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{\partial \Psi}{\partial z} \\ \frac{\partial \Psi}{\partial y} & \frac{\partial \Psi}{\partial x} & 0 \\ \frac{\partial \Psi}{\partial z} & 0 & \frac{\partial \Psi}{\partial x} \\ 0 & \frac{\partial \Psi}{\partial z} & \frac{\partial \Psi}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (5)$$

де $\bar{U}^{(\epsilon)}$ – вектор ступенів свободи елемента;
 $[\beta]$ – матриця деформація елемента.

Отже, вектор деформації апроксимується у межах кінцевого елемента за допомогою матриці деформації й вектора ступенів свободи елемента. Тоді у силу адитивності інтеграла енергія деформації тіла дорівнює сумі енергій деформації елементів, на яке розбито тіло:

$$U = \sum_{\epsilon} U^{(\epsilon)} = \sum_{\epsilon} \frac{1}{2} \cdot \int_{V_{\epsilon}} \bar{\epsilon}^r \cdot [E] \cdot \bar{\epsilon} \cdot dV \quad (6)$$

а перетворюючи цей вираз за допомогою (3), одержуємо для енергії кінцевого елемента:

$$U^{(\epsilon)} = \frac{1}{2} \cdot \bar{U}^{(v)} \cdot [K^{(\epsilon)}] \cdot \bar{U}^{(\epsilon)} \quad (7)$$

де $[K^{(\epsilon)}] = \int_{V_{\epsilon}} [\beta]^r \cdot [E] \cdot [\beta] \cdot dV$ – матриця твердості кінцевого елемента.

Оцінювання результатів комп'ютерного моделювання та результатів натурних випробувань зварної станини показало (рис. 4), що деформації зварної станини мають однаковий характер, розбіг максимальних деформацій складає 6,25 %.

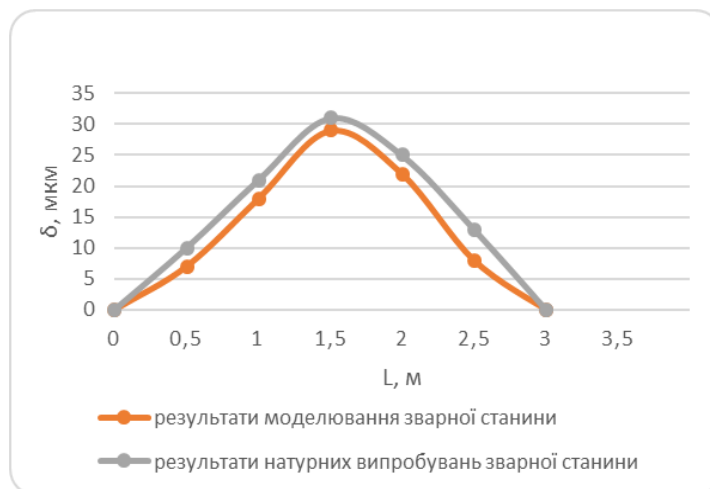
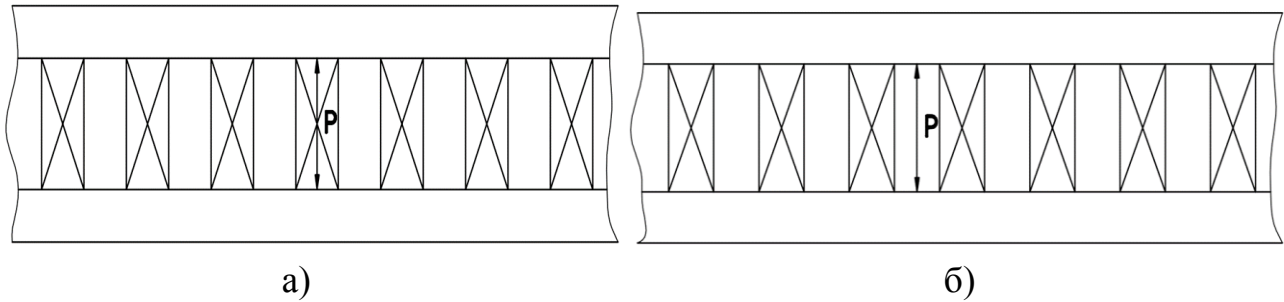


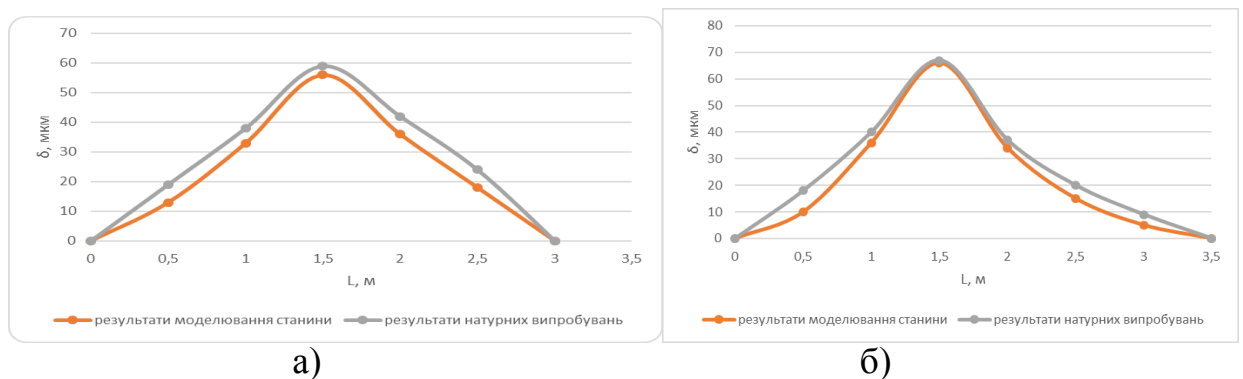
Рис. 4. Порівняння результатів натурних випробувань і комп'ютерного моделювання зварної станини

На рисунку 5 показано схему розтиску полиць зварної станини важкого верстата.



а) по поперечним зв'язкам; б) між поперечними зв'язками
Рис. 5. Схема розтиску полиць зварної станини

Криві результатів моделювання і результатів натурних випробувань показали (рис. 6), що деформації зварної станини мають однаковий характер, розбіжність максимальних деформацій становить 4,5–5 %.



а) по поперечним зв'язкам б) між поперечними зв'язками
Рис. 6. Порівняння результатів натурних випробувань і комп'ютерного моделювання зварної станини

Четвертий розділ. У четвертому розділі наведено методики розрахунків станини на жорсткість і температурні деформації з точки зору точності. Жорсткість несучих систем багато у чому визначає похибки виробництва і характеризується величиною зміщення інструменту щодо заготовки через вплив деформацій базових деталей.

Дуже важливим елементом досліджень є властивості рівноваги заданої динамічної системи різання на основі законів класичної механіки і шляхи вирішення двох практично важливих задач: аналізу і синтезу формотвірних рухів інструменту щодо деталі з урахуванням пружних деформацій оброблюваної заготовки та технологічної системи верстата. З огляду на те, що при обробленні на готову деталь копіюються геометричні похибки напрямних станини, що робить вагомий внесок у похибку форми, станина для нас представляє особливий інтерес.

Для визначення найбільш раціональної конструкції станини було проведено порівняльні розрахунково-експериментальні дослідження пружних деформацій зварної і литої станини важкого токарного верстата (рис. 7).

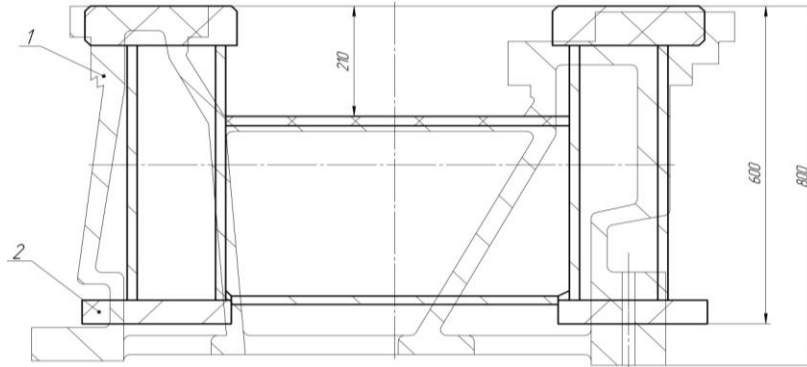


Рис. 7. Порівняння накладанням перетинів станин верстата 1А665:
1 – литої; 2 – зварної

Твердотільна модель проектованої станини була виконана у програмному пакеті SolidWorks 2012 (рис. 8).



Рис. 8. 3D-моделі секції станин (а) під супорт; (б) під виріб

Проводилось дослідження деформації полиці задньої бабки литої станини і полиці під задню бабку зварної станини. Проведено натурні виробничі випробування станин в лабораторії на ПрАТ «КЗВВ», на секції станини натурних розмірів. Випробування проводилося в декількох напрямках: деформація станини при розтиску «в розпір», визначення прогину станини при її навантаженні, випробування крутної жорсткості, при вигині станини одним та двома башмаками.

Виявлено, що зварна станина піддається меншим деформаціям при розтиску полиць «в розпір» в 3,25 рази. Жорсткість зварної станини під задню бабку вище.

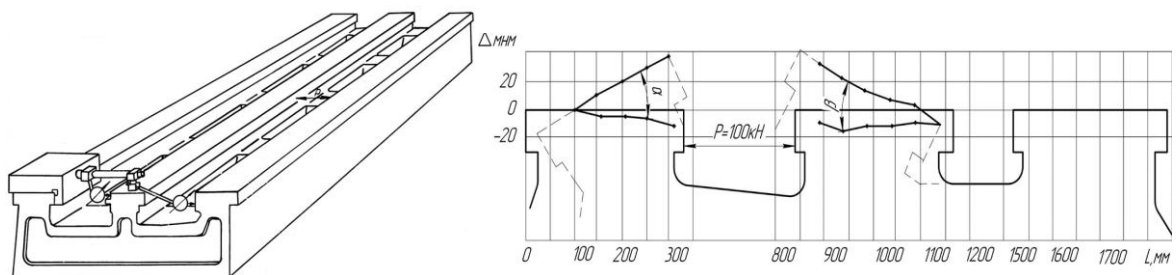


Рис. 9. Схема вимірювання деформації при розтиску полиць литої станини верстата 1А665 за допомогою індикатора

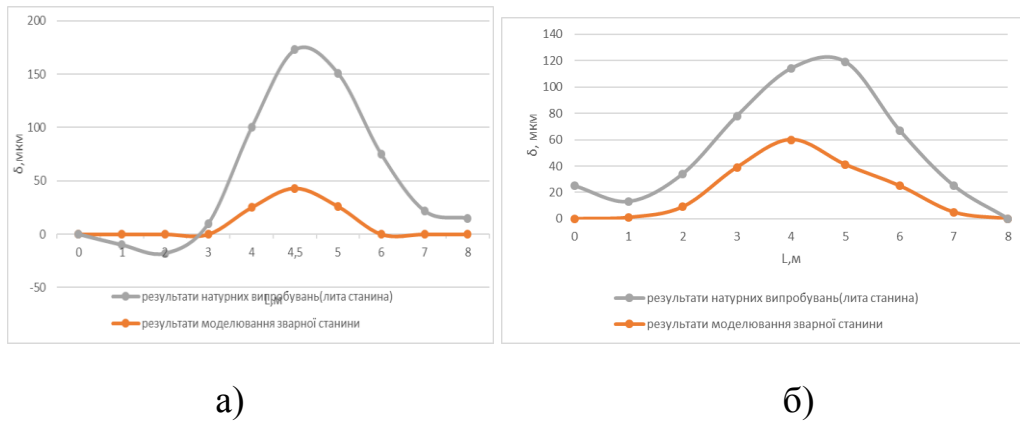


Рис. 10. Порівняння результатів деформацій литої та зварної станини: а) полиць під задню бабку б) супортних полиць

Дослідження деформації супортної полки литої станини і супортної полки зварної станини показало, що зварна станина піддається меншим деформаціям при розтиску полиць «в розпір». Деформації литої станини мають негативний напрямок. Жорсткість зварної станини під супорт вище.

Оскільки станина супорту піддається навантаженню у вигляді ваги супорта, було проведено оцінювання деформації станини під навантаженням.

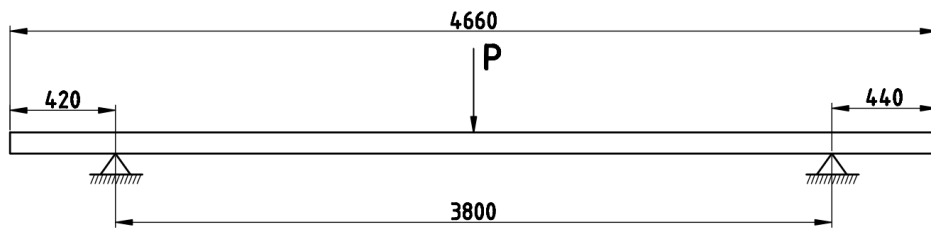


Рис. 11. Схема навантаження станини супорту у виробничих умовах

На підставі результатів досліджень деформацій литої станини і зварної станини при навантаженні можна зробити висновки про те, що зварна станина має більш високу жорсткість, тому зазнає деформації у 1,4 разу менші, ніж лита станина за умови однієї сили навантаження.

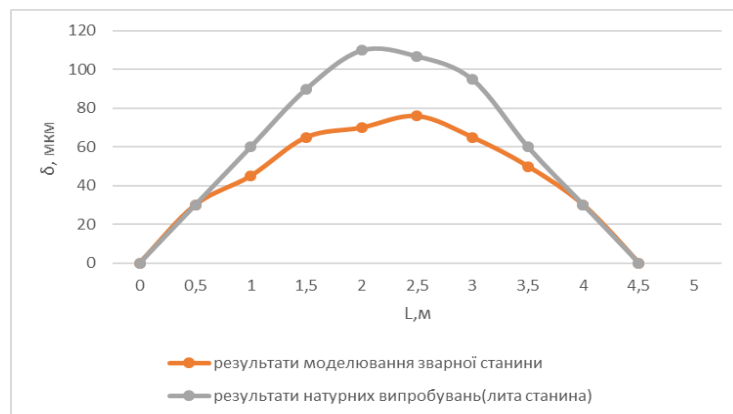


Рис. 12. Деформація литої станини и зварної станини під супорт при її навантаженні

Випробування крутної жорсткості литих і зварних станин показано на рис. 13–14.

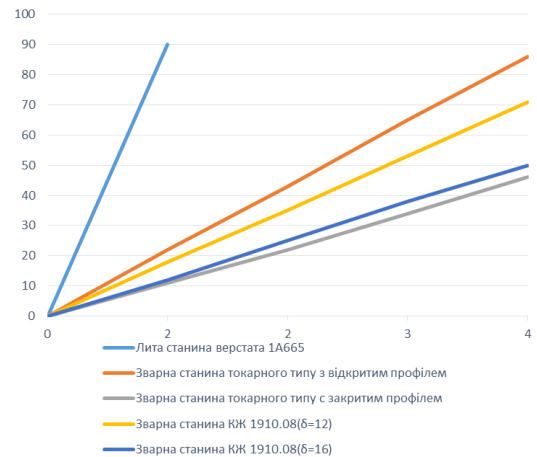
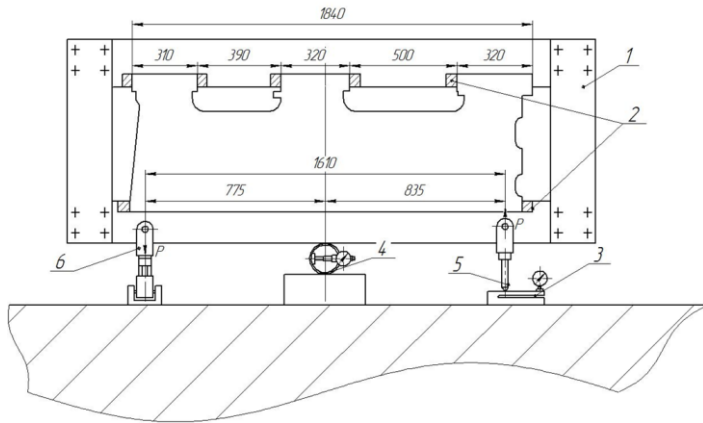


Рис. 13. Схема навантаження зварної станини крутним моментом

Рис. 14. Питома крутна податливість

Досягнуто задовільне узгодження теоретичних і експериментальних даних. Керування пружними переміщеннями станин дозволяє практично виключити складову сумарної похибки, обумовлену деформаціями згинання станин (близько 60 % втрати точності) результатів, що дозволяє використовувати розроблену методику для дослідження і реального проектування верстатів нового покоління.

У п'ятому розділі проведено розробка конструкції та натурні випробування несучої системи важкого токарного верстата мод. 1К675Ф3.



Рис. 15. Важкий токарний верстат мод. 1К675Ф3 вантажопідйомністю 100 т, діаметром оброблення над станиною 2550 мм, довжиною 12500 мм

Верстат виконано з роздільними зварними станинами: станина виробу та станина супорта. Станина виробу складається з секцій, що стикуються по довжині. На головній секції станини виробу встановлено шпindelну бабку і коробку швидкостей. Решта секції станини мають дві прямокутні напрямні, які загартовані та прошліфовані. Станина супорта також складається із секцій, що стикуються по довжині. Дві прямокутні напрямні станини супорта загартовані та закриті телескопічним захистом. Приводна рейка супорта прикріплена до станини між полицями напрямних. Станини виробу і супорта встановлюються

на регульованих опорах (башмаках) і кріпляться фундаментними болтами. У бічному напрямку станини фіксуються регульованими упорами, залитими у фундамент.

Проведено твердотільне моделювання станини важкого токарного верстата вантажопідйомністю до 100 т з раціоналізацією конструкції за параметрами жорсткості в напрямках, які найбільше впливають на точність оброблення.

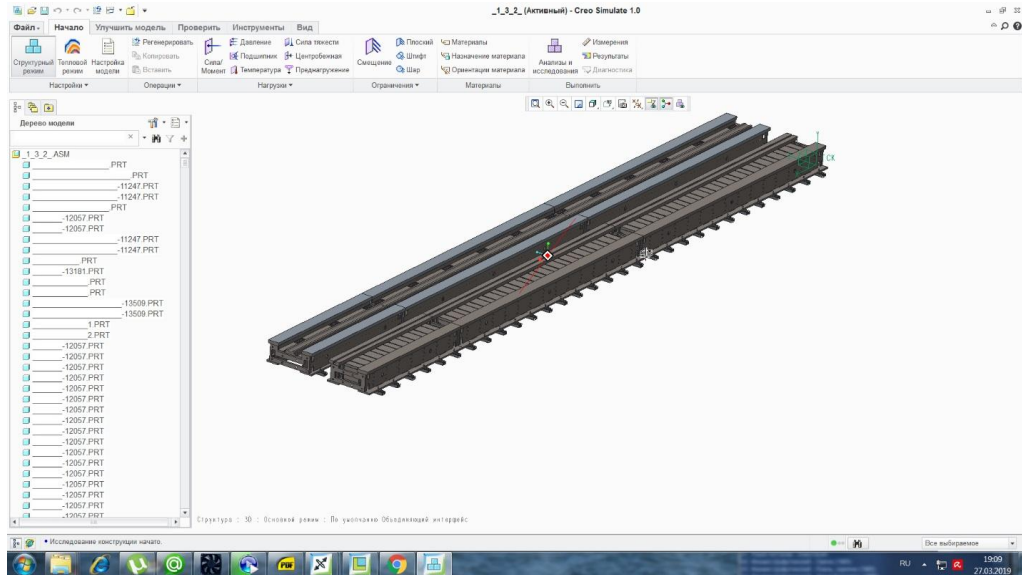


Рис. 16. 3D-модель станини важкого токарного верстата

Наведено розрахунок граничних значень розподілених навантажень, що діють на несучу систему важкого токарного верстата. Після чого виконано моделювання силових деформацій методом кінцевих елементів. На станину було накладено силові навантаження відповідно до проведених розрахунків.

Моделювання проводилось для випадків, які найбільш істотно впливають на величину деформації несучої системи: при розміщенні навантаження під вагою супорту на стиках секцій (рис. 17) і на краю станини супорту (рис. 18).

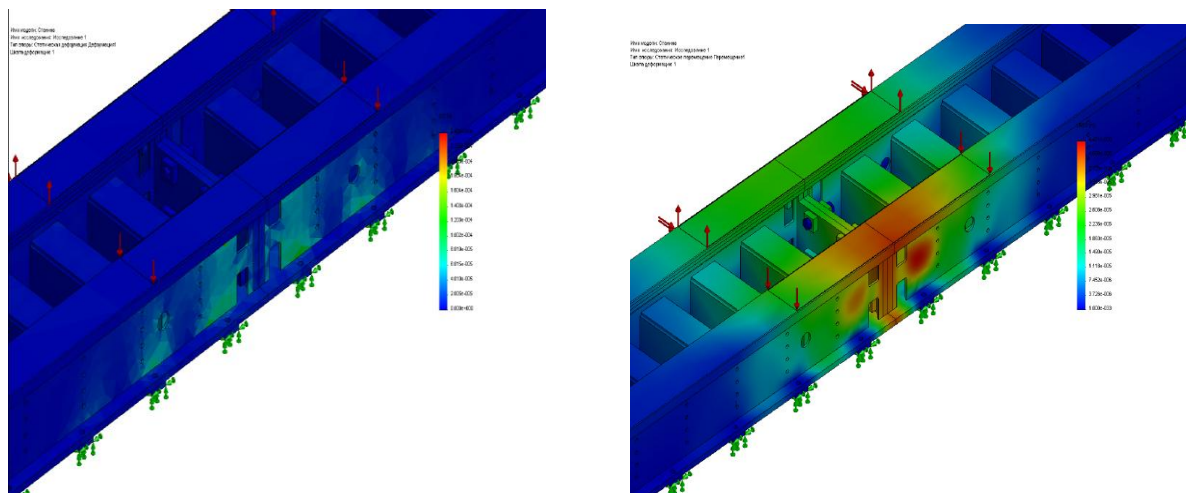


Рис. 17. Епюра переміщень на стику секцій

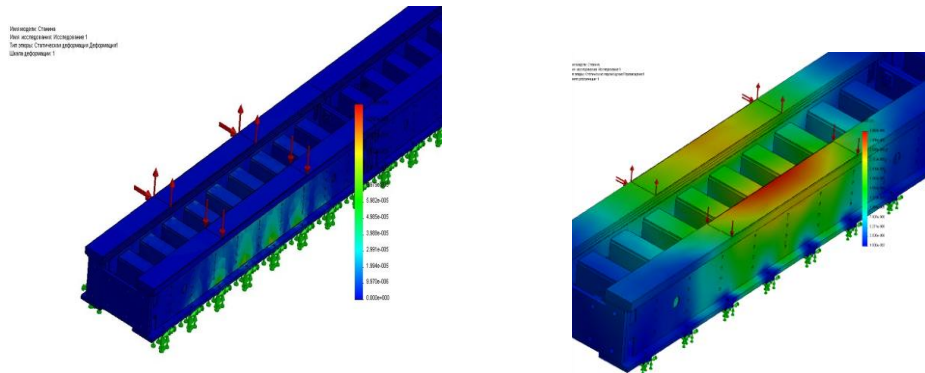


Рис. 18. Напружено-деформований стан (а)
і еюра переміщень (б) на краю секції

Навантаження станини виробу проводилось у двох місцях: на головній секції станини та на місці розміщення задньої бабки. На рисунку 19 представлено варіант навантаження головної секції станини.

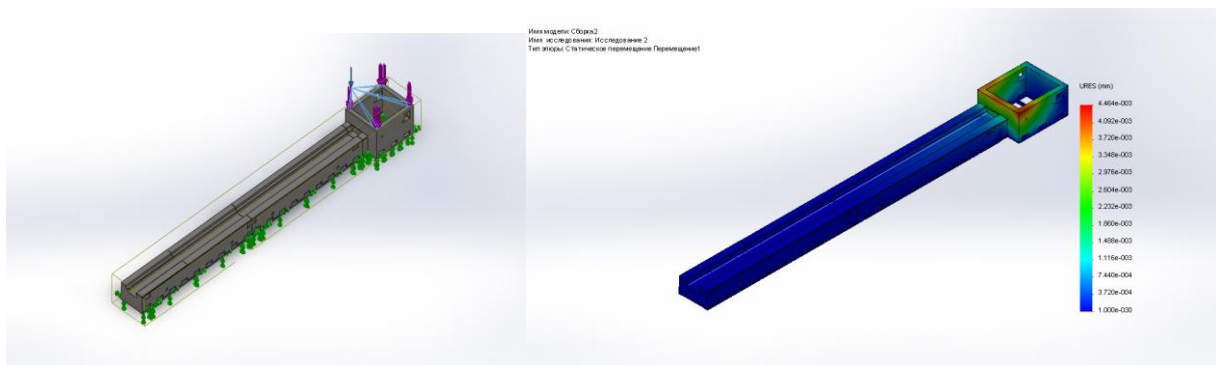


Рис. 19. Схема навантажень (а)
і еюра напружень (б) головної секції станини виробу

У результаті виробничих випробувань виявлено, що збіг результатів математичного моделювання із натурними випробуваннями складає 6–25 %.

Для реалізації алгоритмів підвищення точності було використано корекцію відхилень елементів несучої системи й адаптивне керування відхиленнями виробу з урахуванням геометричних відхилень несучої системи й температурних деформацій.

Застосовано PLC-корекцію, яка заснована на вимірюванні первинних відхилень елементів несучої системи верстата в координатах (X, Y, Z) у робочому просторі, запам'ятовуванні масиву даних і компенсації при відпрацюванні траєкторії руху безпосередньо при обробленні. Системи ЧПК Sinumeric 840D, Heidenhain MANUALplus 620 мають можливість компенсувати такі види механічно обумовлених похибок: зазор, лінійні, нелінійні похибки, похибки гвинта, похибки прогинання, теплове розширення, тертя ковзання. Помилки компенсуються зміною командних змінних для позиціонування інструменту.

Для контролю швидкості та положення осей і шпинделя, у системі застосовано спеціальні інкрементні й абсолютні лінійні, кутові або поворотні датчики. Значення температури вимірюються термісторами Pt100, підключеними до аналогових входів систем з використанням спеціальних модулів, які компенсують теплові деформації.

Сучасні системи ЧПК дозволяють компенсувати температурні відхилення із врахуванням довжини ходових гвинтів, рейок у процесі оброблення, але для врахування геометрії та температурних компенсацій несучої системи це поки що не реалізовано. Наприклад, при температурній деформації станини відхилення не відстежується і компенсації не відбувається, що відображається на геометрії виробу, і як наслідок на точності оброблення.

У роботі запропоновано адаптивну систему керування, що дозволяє компенсувати пружні деформації всіх елементів несучої системи, що виникають у разі дії сил різання, а також теплові деформації, викликані зміною температури після початку процесу оброблення.

Принцип дії полягає у такому: вимірювання відхилень деталі від еталону у процесі оброблення і врахування у системі ЧПК для коригування програми оброблення. Запропоновано використовувати для вимірювання відхилень при обробленні на важких токарних верстатах як реалізацію методу активного контролю – скобу із безконтактними пластинами (рис. 20), одна з яких нерухома, а інша із можливістю переміщення в залежності від змін відхилень діаметра.

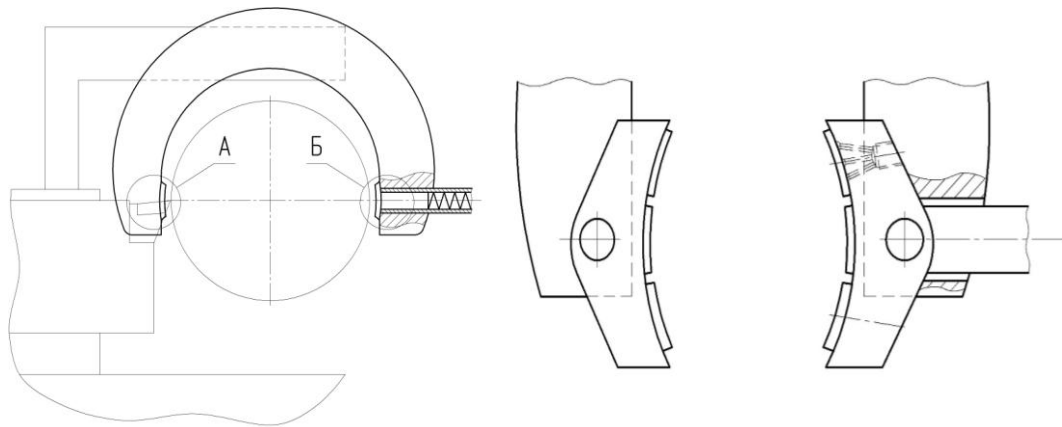


Рис. 20. Пропонована схема активного контролю

Відсутність тертя між виробом і пластинами забезпечується за рахунок повітряного шару, який забезпечується компресором з обох боків по діаметру і двох емнісних датчиків, відхилення яких підсумовується з відхиленням вимірювальної лінійки і враховується у програмі ЧПК (рис. 21).

$$V_{\text{прив.под.}} = (X_{\text{зад}} - X_{\text{факт}} - \Delta)K_{\text{проп}} + V_{\text{зад}}K_{\text{пред}} \quad (8)$$

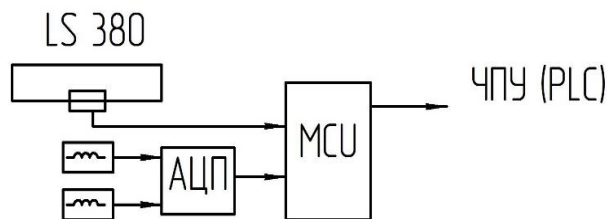


Рис. 21. Схема подачі сигналу із зчитувальних засобів для коригування програми ЧПК

У цьому методі вирішується проблема вимірювань безконтактними датчиками – видалення стружки та змащувально-охолоджувальної рідини, за рахунок повітряного шару вони видаляються із зони вимірювання. Використання ємнісного датчика обгрунтовано відсутністю чутливості до характеристик матеріалу, для великогабаритних деталей це має особливе значення.

Отримано результати натурних досліджень, що у сукупності із попередніми результатами розрахунково-експериментальних даних дають можливість отримати економічний ефект при впровадженні методики у виробництво та надати рекомендації щодо модернізації або проектування важкого верстатного обладнання підвищеної точності.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

У роботі вирішено актуальне науково-технічне завдання підвищення точності і продуктивності важких токарних верстатів за рахунок забезпечення жорсткості та керування параметрами несучої системи при мінімально можливій масі.

1 Основний вплив на точність оброблення на важких токарних верстатах надають похибки внаслідок силових і температурних деформацій станин і значних мас рухомих вузлів, які призводять до значного зниження жорсткості несучих систем, що у свою чергу багато у чому визначає точність оброблення великогабаритних деталей.

2 Для підвищення точності важких токарних верстатів моделювання несучої системи необхідно проводити при комплексному обліку характеру навантаження у заданому діапазоні сил і температур. Подальше підвищення точності можливо із застосуванням адаптивних елементів з корекцією початкової геометричної інформації програми керування на основі вимірювання поточних факторів оброблення.

3 Створені методи керування точністю важкого верстата зі зворотними зв'язками: методом вимірювання похибок деталі; за рахунок моделювання деформації деталі; за рахунок моделювання похибок технологічної системи; із застосуванням адаптивної комплексної системи. Розроблено математичні моделі великогабаритних несучих систем з урахуванням граничних силових, температурних навантажень. Проведено натурні випробування поведінки великогабаритних станин. Відхилення даних теорій і експерименту не перевищують 15–20 %.

4 Трудомісткість механічного оброблення зварних станин на 50–60 % менше у порівнянні з литими, як і металоємність, відсоткова частка якої у зварних на 30–40 % менше, ніж у литих. Поряд із цим демпфувальна здатність чавунних литих станин у 2–4 рази вище, також економічно доцільніше їх виготовлення в умовах серійного виробництва, тоді як доцільність виготовлення зварної сталеві станини виправдовує себе в умовах одиничного виробництва. Основною умовою як для виготовлення чавунних, так і для виготовлення зварних станин важких верстатів є виготовлення двох різних станин окремо для супорта і для виробу, оскільки станина супорта зазнає більших деформацій у процесі оброблення, виготовлена окремо станина виробу практично не змінює первинних розмірів. При виготовленні станини цільної конструкції з 4 полиць неминуча деформація обох станин.

5 Проведені випробування станин литої і зварної конструкцій показали, що зварна станина піддається меншим деформаціям при розтискуванні полиць «у розпір» у 3,25 разу, ніж лита. Зварна станина має більш високу жорсткість, тому

зазнає деформації у 1,4 разу менші, ніж лита станина при одній силі навантаження. При вигинанні двома середніми башмаками виявлено, що під полицею задньої бабки прогинання станини відбувається у незначних межах, а прогинання секції зварної станини під супорт на 40 % менше у порівнянні із прогинанням секції станини литої конструкції. Станина зварної конструкції при вигинанні її одним і двома башмаками зазнає деформації у 1,7 і 2,7 разу менші, відповідно, ніж станина литої конструкції. Проаналізовано питому крутну податливість тотожних за формою литої та зварної станин. Виявлено, що жорсткість на кручення зварної станини у 3–3,5 разу вище, що позитивно впливає на продуктивність різання і точність оброблення.

6 Удосконалено методи проектування несучих систем важких токарних верстатів з урахуванням характеристик навантаження, прогнозованих пружних і теплових деформацій, які забезпечують мінімальні відхилення формотвірних поверхонь. Розроблено рекомендації з проектування несучих систем важкого верстатного обладнання з ЧПК підвищеної точності.

7 Запропоновано схеми і конструкції адаптивних елементів керування геометричною точністю технологічних систем. Удосконалено способи адаптивного керування точністю за відхиленнями елементів несучої системи і похибок готової деталі.

8 Розроблено конструкцію станини важкого токарного верстата підвищеної точності вантажопідйомністю 100 т з можливістю оброблення деталей довжиною до 12,5 м і діаметром оброблення 2,5 м при максимальних силах різання, що дорівнюють 200 кН. Проведено статичний аналіз компонентів, що зазнають критичні навантаження з метою отримання даних про переміщення компонентів і їх напружених і деформованих станах. Деформації станини супортів і виробів при граничних робочих навантаженнях представлені у діапазоні від 29 мкм до 83 мкм. У результаті виробничих випробувань виявлено збіг результатів математичного моделювання з натурними випробуваннями, що складає 6–25 %. Верстат забезпечує радіальне і торцеве биття 0,02 мм, некруглість і нециліндричність у межах 0,002–0,02 мм.

9 Результати роботи впроваджені на ПрАТ «Краматорський завод важкого верстатобудування» при виготовленні гами важких токарних верстатів підвищеної точності з економічним ефектом у розрахунку на 1 верстат – 84 тис. грн.

Результати роботи впроваджені при реконструкції важких токарних верстатів на ТОВ «Важстанкосервіс» з економічним ефектом 31 тис. грн. на 1 важкий токарний верстат.

Результати використовуються у навчальному процесі у ДДМА.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Монографії

1 Viktor D. Kovalov, Yana S. Antonenko, Vladislav M. Nesterenko. Increase the accuracy of heavy lathes by controlling the parameters of the carrier system: collective monograph/ Edited by Predrag Dašić. Vrnjačka Banja, 2018. Pp. 120–143. ISBN 978-86-6075-065-7. *(Надано рекомендації щодо проектування та модернізації станин важких токарних верстатів)*

Публікації у фахових виданнях, що входять до міжнародних наукометричних баз даних

2 Kovalev V., Vasilchenko Y., Gakov S., Kurilenko Y. Trends of adaptive control of accuracy of the technological system on the basis of heavy machine-tools. *International Conference «ICQME 2007»*. Budva, Montenegro, 2007. Pp. 263–275. (Запропоновано засоби адаптивного керування точністю по відхиленням елементів несучої системи і похибок готової деталі)

3 Kovalov V., Antonenko Y., Dašić P. Method of Structural Design of Heavy Machine Tools. *Interdisciplinarity in Engineering, INTER-ENG 2015: 9th International Conference*, 8–9 October, 2015. Tirgu-Mures, Romania. Pp. 146-152. (Розроблено методику компонування станин важких верстатів з системою сил, розподілених навантажень)

Публікації у фахових виданнях

4 Ковалев В. Д., Куриленко Я. С. Исследование направляющих жидкостного трения для тяжелых расточных станков. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. праць. Краматорськ, 2004. Вип. 15. С. 90–99. (Надано рекомендації до розрахунку і проектування гідростатичних напрямних)

5 Ковалёв В. Д., Пономаренко А. В., Куриленко Я. С. Исследование эксплуатационных характеристик гидростатических опорных узлов для тяжелых станков. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. праць. Краматорськ–Київ, 2006. Вып. № 19. С. 130–137. (Наведено розрахунок модернізації важкого верстата з використанням гідростатичних напрямних)

6 Ковалёв В. Д., Куриленко Я. С. Пути повышения точности тяжелых станков с ЧПУ. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. праць. Краматорськ, 2006. Вип. 20. С. 98–102. (Розроблено методи керування точністю важкого токарного верстата зі зворотнім зв'язком)

7 Ковалев В. Д., Гаков С. О., Антоненко Я. С. Розробка та дослідження алгоритмів визначення видів зношення колісних пар на основі від'ємності геометрії поверхні колеса від вихідного. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. праць. Краматорськ, 2009. Вип. № 25. С. 65–72. (Складено алгоритм визначення геометричної моделі припуску та траєкторії робочого руху)

8 Антоненко Я. С. Методы уменьшения погрешностей, возникающих в процессе обработки на тяжеломтокарном станке. *Теория и практика в машиностроении-2014г.*: сб. науч. трудов. Ирбит, 2014. (Запропоновано методи статичної та динамічної корекції похибок)

9 Антоненко Я. С., Ковалев В. Д., Линкевич С. А. Исследование влияния многокоординатной упругой системы станка на жесткость технологической системы. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. праць. Краматорськ, 2013. Вип. № 32. С. 145–149. (Розроблено метод дослідження точності станин важких токарних верстатів за допомогою математичного моделювання)

10 Ковалев В. Д., Антоненко Я. С. Исследование жесткости станин тяжелых токарных станин. *Вісник СевНТУ. Машиноприладобудування та транспорт*. 2013. Вип. 139. С. 105–110. (Проаналізовано результати натурних випробувань литої станини та результати моделювання станини зварної конструкції)

11 Антоненко Я. С., Ковалев В. Д., Мельник М. С. Структура погрешностей тяжелого токарного станка. *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем*: зб. наук. праць. Краматорськ, 2013. Вип. № 33. С. 16–19. (Проаналізовано домінуючі фактори впливу різних видів похибок на точність при обробці на важких токарних верстатах)

12 Ковальов В. Д., Антоненко Я. С. Підвищення працездатності важких токарних верстатів з урахуванням збереження точності. III Всеукраїнська науково-технічна конференція «Прогресивні технології в машинобудуванні»: зб. наук. праць 2–6 лютого 2015р. Львів, 2015. С. 53–55. (Розроблено конструкцію станини важкого токарного верстата підвищеної точності)

13 Ковальов В. Д., Антоненко Я. С., Виганяйло Б. Ю. Натурні випробування крутної жорсткості станин важких токарних верстатів. *Вісник НТУ «ХП»*. Технологія в машинобудуванні. Харків, 2017. 26 (1248). С. 94–98. (Проведено дослідження крутної жорсткості станин важких токарних верстатів на натурних зразках)

14 Антоненко Я. С. Натурні випробування жорсткості станин важких токарних верстатів. *Міжвузівський збірник «НАУКОВІ НОТАТКИ»*. Луцьк, 2017. Вип. № 60. С. 36–42. (Проведено експериментальні дослідження станин важких токарних верстатів при прогині їх під власною вагою та вижиму двома башмаками)

15 Мельник М. С., Антоненко Я. С. Дослідницький комплекс для контролю якості зварних станин важких верстатів. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Технології в машинобудуванні. № 34 (1310). 2018. С. 21–28. (Запропоновано технологічні заходи з усунення у станини важкого верстата станів втрати статичної стійкості)

Опубліковані праці апробаційного характеру

16 Ковалев В. Д., Куриленко Я. С. Система управління точністю тяжелих станков с ЧПУ на основе динамической коррекции траекторий формообразующих движений. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: тези доповідей 5-ї Міжнародної науково-технічної конференції. Краматорськ, 2007. С. 61–62.

17 Пономаренко О. В., Антоненко Я. С., Ковальов В. Д. Шляхи підвищення працездатності верстатного обладнання з опорами рідинного тертя. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*: матеріали дев'ятої Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції. Запоріжжя, 2009. С. 102–104.

18 Антоненко Я. С., Ковалев В. Д., Линкевич С. А. Жесткость несущей системы при прогнозировании точности обработки. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали 11-ї Міжнародної науково-технічної конференції / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2013. С. 20.

19 Антоненко Я. С. Повышение точности обработки крупногабаритных нежестких деталей за счет адаптивного управления формообразующими движениями станков. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали 12-ї Міжнародної науково-технічної конференції 23–24 вересня 2014 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2014.

20 Антоненко Я. С., Ковалев В. Д. Повышение точности обработки крупногабаритных нежестких деталей за счет управления точностью технологической системы тяжелых станков. *Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї - наука - виробництво* : тези доповідей XIV Всеукраїнської молодіжної науково-технічної конференції, 27–31 жовтня 2014 р. / відп. за вип. В. О. Залога. Суми, 2014. С. 5–6.

21 Антоненко Я. С., Ковалев В. Д., Любич І. В., Попов А. Анализ факторов влияния различных видов погрешностей на точность при обработке на тяжелых токарных станках. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали 12-ї Міжнародної науково-технічної конференції 2–4 червня 2014 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2014. С. 20. 100 с.

22 Антоненко Я. С. Моделирование формообразующих движений токарного станка. *Важке машинобудування. Проблеми та перспективи розвитку*: матеріали 13-ї Міжнародної науково-технічної конференції 2–4 червня 2015 р. / за заг. ред. В. Д. Ковальова. Краматорськ, 2015. 100 с.

23 Ковальов В. Д., Антоненко Я. С. Перехід від простору технологічних параметрів до траєкторій формоутворюючих рухів з метою забезпечення заданої геометричної точності важкого токарного верстата. *Матеріали Всеукраїнської науково-практичної конференції, присвяченої пам'яті заслуженого винахідника України академіка АН вищої школи України, доктора технічних наук, професора Нагорняка С. Г.* (Україна, м. Тернопіль, 11–12 травня 2017 р.). Тернопіль, 2017. С. 12–13.

24 Ковальов В. Д., Антоненко Я. С. Проектування важких верстатів з урахуванням результатів експериментальних натурних досліджень. *Машинобудування очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво*: тези доповіді на XVII Всеукраїнській науково-практичній конференції, 1–3 листопада 2017 р. Чернівці, – Краматорськ, 2017.

АНОТАЦІЯ

Антоненко Я. С. Підвищення точності важких токарних верстатів шляхом управління параметрами несучої 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 Міністерства освіти і науки України, Краматорськ, 2019.

У дисертаційній роботі визначена, науково обґрунтована і вирішена проблема підвищення точності оброблення великогабаритних деталей шляхом удосконалення конструкції несучої системи важких токарних верстатів з ЧПК підвищеної точності. Проаналізовано методи підвищення точності технологічної системи, структуру виникнення похибок при обробленні нежорстких деталей. Розроблено структурні та функціональні моделі керування точністю важкого верстата. Розроблена модель роботи несучої системи важкого токарного верстата з урахуванням пружних і теплових деформацій. Вперше розроблено методи керування точністю важкого токарного верстата зі зворотнім зв'язком за складовими несучої системи, прогнозованими відхиленнями, вимірними параметрами процесу оброблення. Розроблено метод компонування станин важких токарних верстатів з системою сил, розподілених навантажень, що діють на верстат у процесі його роботи

з забезпеченням мінімальних відхилень базових поверхонь і можливістю сприйняття підвищених навантажень від маси заготовки та сил різання. Запропоновано адаптивну систему управління, що дозволяє компенсувати пружні деформації всіх елементів технологічної системи, що виникають під дією сил різання, а також теплові деформації, викликані зміною температури після початку процесу оброблення.

Результати роботи впроваджені при створенні важких токарних верстатів нового покоління, а також при модернізації важких токарних верстатів. Розроблені та впроваджені рекомендації з проектування несучих систем важких токарних верстатів з ЧПК підвищеної точності. Розроблено рекомендації щодо підвищення конкурентоспроможності важких токарних верстатів.

Ключові слова: важкий токарний верстат, точність оброблення, несуча система, адаптивна система, похибки геометрії виробу.

АННОТАЦІЯ

Антоненко Я. С. Повышение точности тяжелых токарных станков путем управления параметрами несущей 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 Министерства образования и науки Украины, Краматорск, 2019.

В диссертационной работе определена, научно обоснована и решена проблема повышения точности обработки крупногабаритных деталей путем усовершенствования конструкции несущей системы тяжелых токарных станков с ЧПУ повышенной точности. Проанализированы методы повышения точности технологической системы, структура возникновения погрешностей при обработке нежестких деталей. Разработаны структурные и функциональные модели управления точностью тяжелого станка. Разработана модель работы несущей системы тяжелого токарного станка с учетом упругих и тепловых деформаций. Впервые разработаны методы управления точностью тяжелого токарного станка с обратной связью по составляющим несущей системы, прогнозируемыми отклонениями, измеренным параметрам процесса обработки. Разработан метод компоновки станин тяжелых токарных станков с системой сил, распределенных нагрузок, действующих на станок в процессе его работы с обеспечением минимальных отклонений базовых поверхностей и возможностью восприятия повышенных нагрузок от массы заготовки и сил резания. Предложена адаптивная система управления, позволяющая компенсировать упругие деформации всех элементов технологической системы, возникающие под действием сил резания, а также тепловые деформации, вызванные изменением температуры после начала процесса обработки.

Результаты работы внедрены при создании тяжелых токарных станков нового поколения, а также при модернизации тяжелых токарных станков. Разработаны и внедрены рекомендации по проектированию несущих систем тяжелых токарных станков с ЧПУ повышенной точности. Разработаны рекомендации по повышению конкурентоспособности тяжелых токарных станков.

Ключевые слова: тяжелый токарный станок, точность обработки, несущая система, адаптивная система, погрешности геометрии изделия.

SUMMARY

Antonenko Y.S. Increasing the accuracy of heavy lathes by controlling the parameters of the carrier system. – Exercising the rights of the manuscript.

The thesis for a Candidate of Technical Sciences degree in Engineering Science on specialty 05.03.01 – processes of Machining, machines and tools. – Donbass State Machine-Building Academy of the Ministry of Education and Science of Ukraine, Kramatorsk, 2019.

In the thesis, the problem of increasing the accuracy of machining large-sized parts was determined and scientifically justified and solved by improving the design of the carrier system of heavy CNC lathe of increased accuracy. There were analyzed the methods for increasing the accuracy of the technological system, the structure of the appearance of errors in the processing of nonrigid details. Structural and functional models for controlling the accuracy of a heavy machine tool were developed. There was developed a model for the operation of a carrier system of heavy lathe, taking into account elastic and thermal deformations. The methods of controlling the accuracy of a heavy lathe with feedback on the components of the carrier system, the predicted deviations, the measured parameters of the machining process were developed for the first time. There was developed a method for assembling the frames of heavy lathes with a system of forces, distributed loads acting on the machine in the process of its operation, ensuring minimum deviations of the base surfaces and the possibility of perceiving increased loads from the mass of the workpiece and cutting forces. An adaptive control system that allows to compensate the elastic deformations of all elements of the technological system that arise under the influence of cutting forces, as well as thermal deformations caused by temperature changes after the start of the machining process was proposed.

The results of the work were implemented in the development of heavy lathes of the new generation, as well as in the modernization of heavy lathes. Recommendations for the design of carrier systems of heavy lathes with CNC of increased accuracy have been developed and implemented. The recommendations for increasing the competitiveness of heavy lathes have been developed.

Keywords: heavy lathe, accuracy of machining, carrier system, mechatronic adaptive system, geometric errors of parts.

Підп. до друку 03.04.2019. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 1,9. Обл.-вид. арк. 1,9.

Тираж 100 пр. Зам. № 29.

Видавець і виготівник

Донбаська державна машинобудівна академія
84313, м. Краматорськ, вул. Академічна, 72.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК №1633 від 24.12.2003

