

ДОСЛІДЖЕННЯ ТОКАРНО-РЕВОЛЬВЕРНИХ
ВЕРСТАТІВ ЗА ПАРАМЕТРАМИ ЯКОСТІ

Шевченко О.В. (НТУУ „КПІ”, м. Київ, Україна)

E-mail: o.shevchenko@kpi.ua

Анотація: В статті наведено результати досліджень точності обробки, температурних і пружних деформацій та динамічних характеристик токарно-револьверних верстатів. Показано, що результати аналізу балансів точності, жорсткості та температурних деформацій дозволяють визначити шляхи підвищення точності обробки, а відомості про динамічні процеси – забезпечити необхідний рівень вібростійкості при точінні.

Ключові слова: токарно-револьверний верстат, баланс точності, баланс пружних деформацій, температурні деформації, динамічні характеристики.

1. Вступ

Токарно-револьверні верстати (ТРВ) є одними з найбільш продуктивних верстатів токарної групи, яка забезпечується за рахунок суміщення обробки поверхонь, скорочення часу зміни інструменту, швидкодії механізмів затиску та подачі прутка, автоматичного отримання розмірів при використанні настроєних упорів та ін.

Під час автоматичної токарної обробки точність деталей в основному визначається величиною та співвідношенням наступних похибок [1, 2]: - геометричних неточностей верстата; - установки та кріплення заготовок; - динамічних на холостому ході; - динамічних при різанні; - пружних деформацій елементів технологічної системи верстата; - внаслідок розмірного зносу інструменту; - внаслідок температурних деформацій елементів технологічної бази верстата; - встановлення інструменту на розмір під час налагодження, підналагодження та його зміни.

Аналіз джерел, що викликають похибки під час токарної обробки, дає можливість виділити основні характеристики, зміна яких може суттєво впливати на точність обробки на верстаті. До них відносяться: геометрична точність верстата, теплові та пружні деформації його технологічної системи.

2. Основний зміст та результати роботи

В якості показника похибки обробки доцільно вибрати відхилення фактичного радіуса-вектора $\vec{r}_{\Phi i}$ в кожній i -й точці обробленої поверхні від заданого номінального радіуса-вектора $\vec{r}_i$. Таким чином $\Delta \vec{r}_i = \vec{r}_{\Phi i} - \vec{r}_i$, де $\Delta \vec{r}_i$ - показник похибки обробки в i -й точці обробленої поверхні. Переміщення складових елементів верстата в процесі обробки можна умовно поділити на організовані, що обумовлені формоутворюючими рухами, та неорганізовані, що пов'язані з пружними і температурними деформаціями, зносом і геометричною неточністю ланок технологічної системи.

Оцінку технологічної системи ТРВ доцільно починати з аналізу розмірних ланцюгів, замикаючими ланками яких є відстань між вершиною різального інструменту та оброблюваною поверхнею виробу, тобто радіус-вектор $\vec{r}_i$. За допомогою аналізу розмірних ланцюгів можна визначити ті деталі і вузли верстата, зміна положення та розмірів яких безпосередньо впливає на точність обробки, а також дати якісну оцінку їх впливу. Визначивши переміщення елементів системи внаслідок геометричних неточностей

ланок через Δr_{zi} , отримаємо переміщення всієї системи, що складається з n ланок, у вигляді: $\Delta r_z = \sum_{i=1}^n \Delta r_{zi} \cdot K_{zi}$, де K_{zi} - коефіцієнт впливу геометричних неточностей, що визначається аналізом передавальних відношень від i - ї ланки до замикаючої.

Для дослідження температурних деформацій необхідно знати величини приросту ланок системи, що обумовлені зміною температурного стану верстата в процесі його роботи. Позначивши приріст i - ї ланки системи внаслідок нагріву через Δr_{mi} , можна визначити переміщення всієї системи, що складається з n ланок, за наступним виразом:

$$\Delta r_m = \sum_{i=1}^n \Delta r_{mi} \cdot K_{mi}, \text{ де } K_{mi} - \text{коефіцієнт впливу теплових деформацій складових ланок.}$$

Аналогічно може бути враховано вплив зносу ланок технологічної системи.

Під час обробки деталей на верстаті переміщення однієї координатної системи, наприклад, системи заготовки, відносно іншої, наприклад, системи інструменту, під дією сил і моментів є результат пружних переміщень всіх ланок розмірного ланцюга, що знаходиться між цими координатними системами. Якщо позначити пружні переміщення елементів системи через Δr_{pi} , то переміщення всієї системи з n ланок можна отримати у вигляді:

$$\Delta r_z = \sum_{i=1}^n \Delta r_{pi} \cdot K_{pi}, \text{ де } K_{pi} - \text{коефіцієнт впливу пружних переміщень складових ланок.}$$

Таким чином, виконавши вказані дослідження верстата, отримаємо приріст радіуса довільної точки поверхні деталі внаслідок геометричних, пружних та теплових деформацій у вигляді: $\Delta r_i = \Delta r_z + \Delta r_{pi} + \Delta r_m$.

При дослідженнях геометричної точності верстатів в якості ланок розмірних ланцюгів верстата вибираються ті елементи, зміна положення та розмірів яких безпосередньо впливає на точність обробки. Аналіз конструктивних особливостей верстата

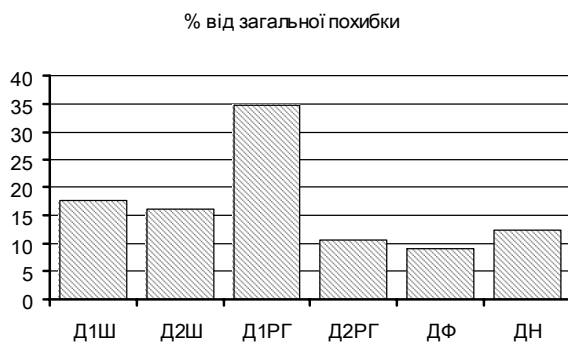


Рис. 1. Баланс геометричної точності верстата мод. 1Г340П в горизонтальній площині, де геометричні похибки: $\Delta 1Ш$ та $\Delta 2Ш$ – в передній і задній опорах шпинделя; $\Delta 1РГ$ та $\Delta 2РГ$ – в передній і задній опорах revolverної головки; $\Delta Ф$ та $\Delta Н$ – в механізмі фіксації та напрямних

традиційної компоновки мод. 1Г340П показав, що найбільший вплив на відносне відхилення вершини різального інструменту та оброблюваної поверхні деталі мають зазори у сполученнях рухомих вузлів верстата. Ці зазори під впливом діючих сил можуть перерозподілятися у довільному напрямку. Величини зазорів у сполученнях визначались шляхом вимірювання дійсних розмірів партій не менше як 25 деталей, що є складовими сполучень, з подальшою статистичною обробкою результатів вимірювання. При неможливості або трудомісткості таких вимірювань, номінальні розміри деталей сполучень, їх допуски та граничні відхилення можуть визначатися за

робочими кресленнями.

В загальному вигляді розмірні ланцюги верстата є просторовими, але, з метою спрощення розрахунків, розмірні ланцюги проектують на площини, наприклад горизонтальну та вертикальну для верстатів традиційної компоновки, що дозволяє звести рішення просторової задачі до двох плоских. Наприклад, рівняння розмірного ланцюга

може бути представлено у вигляді: $\Delta B = \sum_{i=1}^{n+m} B_i \cdot K_{\varepsilon_i}$, де ΔB – відхилення замикаючої ланки

ланцюга; B_i – відхилення складових ланок ланцюга; $n+m$ – сума збільшуючих та зменшуючих ланок; K_{ε_i} – коефіцієнт впливу, що є фактично коефіцієнтом приведення складових ланок розмірного ланцюга до замикаючої ланки ΔB із врахуванням лінійних розмірів. Коефіцієнти K_{ε_i} дають можливість оцінити ступінь впливу зміни розмірів складових ланок на приріст замикаючої ланки розмірного ланцюга (рис. 1).

Статистичні методи досліджень доцільно використовувати під час перевірки ТРВ на відповідність нормам точності у відповідності до вимог ГОСТ 8-82 та ОСТ 2 Н 72-9-87. Перевірка верстатів на відповідність нормам точності проводиться в наступному порядку: - збирається інформації стосовно кожної окремої перевірки не менш ніж на 25 верстатах; - виконуються статистичний аналіз даних для кожної перевірки за нормами точності, визначаються закони та параметри розподілення випадкових величин; - розробляються висновки про ступінь відповідності верстатів за кожною з перевірок вимогам класу точності.

Похибки розмірів деталей, що сходять з верстата, можуть бути поділені на систематичні та випадкові за методикою роботи [4], що дозволяє зробити висновки стосовно ефективності впровадження на верстаті системи автоматичного управління точністю обробки шляхом компенсації систематичної складової похибки.

Необхідність експериментальних досліджень температурних деформацій ТРВ визначена тем, що в деяких випадках під час приймальних випробувань верстатів та перевірки їх на відповідність нормам точності температурні деформації окремих вузлів викликають порушення геометричної точності верстата та призводять до зміни відносного положення деталі та інструменту, а саме, систематично змінюють рівень розмірного настроювання верстата. Температурні деформації ТРВ залежать від розміщення джерел тепла, інтенсивності його виділення, розмірів та матеріалу деталей технологічної системи верстата. Основними джерелами тепла є процес різання та робота, що витрачається на подолання сил тертя в рухомих механізмах верстата. Перенос тепла в різні точки верстата здійснюються зміною положення процесу різання в робочій зоні верстата, переміщенням робочої рідини в гідросистемі і системі охолодження.

Як показали раніше виконані дослідження [5], ТРВ традиційної компоновки моделей 1Г340П, 1В340Ф30 мають значні температурні деформації, що складаються з деформацій шпиндельної бабки, шпинделя, станини по довжині та по висоті, супортної групи. Основними джерелами тепловиділення в цих верстатах є шпиндельні опори та робоча рідина гідросистеми верстата. Представляють цікавість дослідження впливу температурних деформацій вузлів ТРВ моделі 1П420ПФ40, що має нахилену станину трубчастої форми [6].

Дослідження верстата мод. 1П420ПФ40 проводилось в період від пуску верстата до часу стабілізації теплових деформацій на холостому ході у три етапи с частотами обертання шпинделя на першому, другому та третьому етапах відповідно - 3000 об/хв., 3500 об/хв. та 4000 об/хв. Схему розміщення термопар та індикаторів наведено на рис. 2.

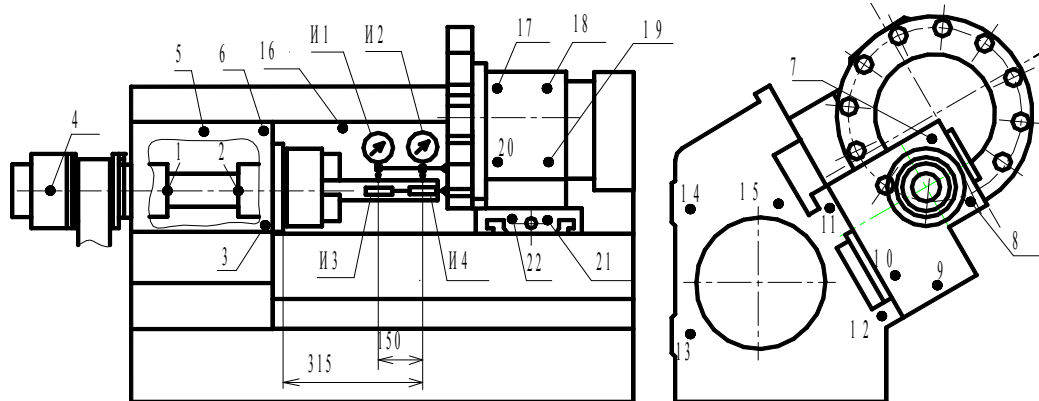


Рис. 2. Схема розміщення термопар при визначенні температур в точках та індикаторів И1, И2 та И3, И4 для реєстрації температурних деформацій TRB мод. 1П420ПФ40: точки 1 і 2 - опори шпинделя; т. 4 - корпус гідравлічного приводу затиску заготовок; т. 3, 5÷10 – корпус шпиндельної бабки; т. 11÷15 торець станини; т. 17÷20 – корпус револьверної головки; т. 21, 22 –поперечні полозки супорта

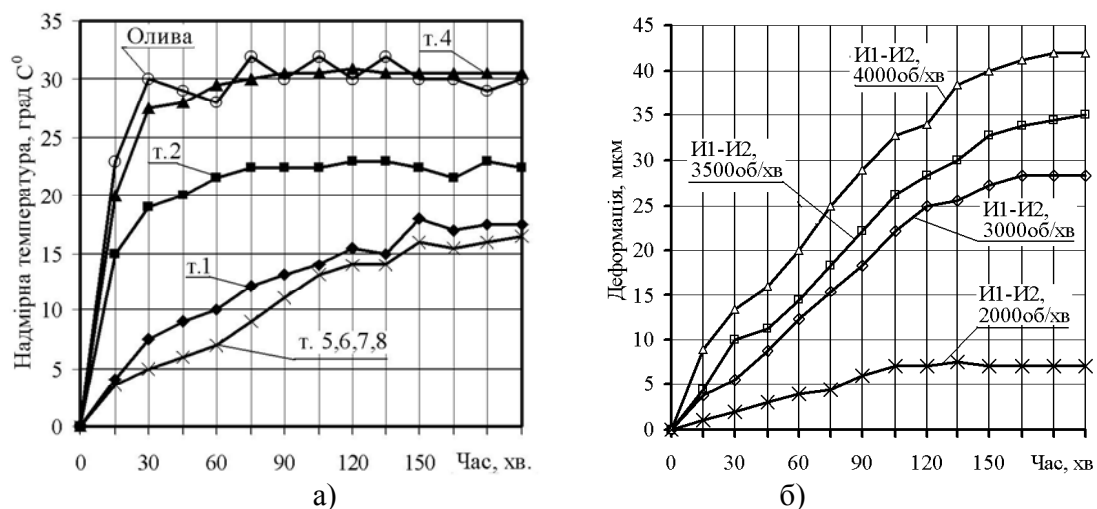


Рис. 3. Графіки залежності надмірної температури (а) в контрольованих точках від часу роботи верстата мод. 1П420ПФ40 без різання з частотою обертання шпинделя $n = 4000$ об/хв. та графіки залежності показів індикаторів И1 та И2 (б) від часу роботи верстата без різання з частотами обертання шпинделя $n = 2000, 3000, 3500$ та 4000 об/хв.

Для вимірювання температур и температурних деформацій використовувались термопари хромель - алюмель діаметром 0,2 мм, багатопозиційний перемикач, цифровий вольтметр типу В7-23, термометри, індикатори з ціною поділки шкали 0,001 и 0,002 мм.

На рис. 3, а представлені графіки зміни надмірних температур в контрольованих точках за час роботи верстата до набуття ним теплової рівноваги, а на рис. 3, б – графіки зміни показів індикаторів И1 та И2 при різних частотах обертання шпиндельного вузла.

За результатами експериментальних досліджень температурних деформацій верстата мод. 1П420ПФ40 можна зробити наступні висновки: - основними джерелами теплоутворення у верстаті є нагрів оливи в гідросистемі та приводі затиску, а також нагрів

шпиндельних опор; - найбільші надмірні температури зареєстровані при частоті обертання шпинделя 4000 об/хв. в баку гідросистеми 32⁰С, на корпусі приводу затиску (точка 4) 30,5⁰С, в передній (точка 2) 23⁰С і в задній (точка 4) 18⁰С опорах шпинделя; - стабілізація температурних деформацій в напрямку, перпендикулярному площині напрямних станини, відбувається після 120 хв. роботи верстата на 3000 об/хв. шпинделя (максимальна деформація 56 мкм), після 130 хв. роботи верстата на 3500 об/хв. шпинделя (максимальна деформація 72 мкм) і після 150 хв. роботи верстата на 4000 об/хв. шпинделя (максимальна деформація 85 мкм); - найбільший перекис осі шпинделя по відношенню до осі інструментального отвору револьверної головки в напрямку, перпендикулярному площині напрямних станини, досягає 8 мкм на довжині 150 мм; - температурні деформації осі шпинделя в напрямку, паралельному площині напрямних станини, незначні, тому показання індикаторів ИЗ-И4 на рис. 3, б не наведено; - несуттєві зміни температур відмічено на правому торці станини (точки 23-25), на напрямних станини в робочій зоні (точка 16), на корпусі револьверної головки (точки 17÷20) та верхніх полозках супорта (точки 21, 22), що свідчить про відсутність впливу основних джерел теплоутворення верстата на температуру вузлів в цих зонах; - різниця надмірних температур потоку повітря в трубчастій порожнині станини між її торцями складає близько 6⁰С, причому більше значення 11⁰С відмічено зі сторони шпиндельної бабки; - найбільші температури нагріву станини зареєстровані в точках, що розташовані біля шпиндельної бабки, та складають при частоті обертання шпинделя 4000 об/хв. 11⁰С в точці 12, 8⁰С в точці 15 та визначаються теплопередачею від базуючих поверхонь шпиндельної бабки і температури потоку повітря, циркулюючого в трубчастій порожнині станини; - додатковими дослідженнями температурних деформацій верстата в продовж 180 хв. при частоті обертання шпинделя 2000 об/хв. без різання зареєстровано незначні відносні зміщення осей шпинделя та інструментального отвору револьверної головки. Враховуючи те, що режим роботи верстата до 2000 об/хв. як правило займає найбільшу частину часу обробки деталей, вплив температурних деформацій (систематичних похибок обробки) на точність обробки партій деталей можна вважати несуттєвим.

Таким чином, конструкція верстата мод. 1П420ПФ30 з нахиленою станиною трубчастої форми, сучасними конструкціями шпиндельного вузла, головного приводу та приводу затиску, по відношенню до верстатів традиційної компоновки є конструкцію з ефективним тепловідводом від джерел теплоутворення та може бути використана як базова для створення верстатів високого класу точності.

Визначення балансу пружних переміщень проведено на ТРВ традиційної компоновки (мод. 1Г340П) та з нахиленою станиною (мод. 1П420ПФ40). Навантаження прикладалось перпендикулярно осі шпинделя в напрямках паралельному та перпендикулярному площині напрямних станини. В якості сумарного пружного переміщення системи верстата, що складається з *n* ланок, прийнято відносне зміщення оправки, що закріплена в шпинделі, та інструментального отвору револьверної головки. Навантажувальний пристрій закріплювався в інструментальному отворі револьверної головки, навантаження контролювалось динамометром стиску. Відлік величин пружних переміщень вузлів верстата виконувалось індикаторами з ціною поділки шкали 0,001 та 0,002 мм після навантаження та розвантаження через кожний 1 кН. Баланс податливості розраховувався

за формулою: $\Delta i = \frac{\Delta r_{np_i} \cdot K_{np_i}}{\Delta r_{np}} \cdot 100\%$, де Δi – складова балансу пружних переміщень i -го

вузла верстата; Δr_{np} - загальна податливість пружної системи верстата.

Аналіз балансу податливості пружної системи верстата мод. 1Г340П показав, що найбільшу податливість має зафіксована пальцевим фіксатором револьверна головка в опорах – близько 70 % всієї податливості системи. Сумарна жорсткість верстата в напрямку на різець складає 15,9 Н/мкм. За результатами досліджень балансу податливості верстата мод. 1П420ПФ40 можна зробити такі висновки: сумарна жорсткість верстата в напрямку на різець складає 41,0 Н/мкм, що в 2,5 рази більше, ніж у верстата традиційної компоновки. Це можна пояснити високою жорсткістю супортної групи внаслідок використання фіксаторних зубчастих дисків для фіксації планшайби револьверної головки. Найбільш податливою ланкою пружної системи верстата мод. 1П420ПФ40 є шпиндельний вузол (від 30% до 50% сумарних переміщень в залежності від напрямку навантаження). Знання балансу податливості (жорсткості) верстата дозволяє виявляти слабкі ланки в його пружній системі та визначати шляхи подальшого вдосконалення його конструкції.

При обробці на верстатах за деяких умов роботи можуть виникати автоколивання, які обмежують режими різання, знижують якість виробів та призводять до викришування різальних кромek інструменту. Наявність знань про реальні динамічні характеристики окремих вузлів верстата дає можливість визначити шляхи підвищення його динамічної якості. Експериментальне визначення частот власних коливань вузлів та елементів верстата, їх спектральний аналіз дозволяє визначити резонансні явища під час роботи верстата та рекомендувати заходи зниження їх шкідливого впливу.

Для визначення значень власних частот коливань вузлів із спектру (амплітудно-частотної характеристики) виділялися частоти, що мають найбільші рівні віброприскорення. Далі ці дані порівнювались із графіками зміни амплітуди коливань у часі після імпульсного впливу та робився висновок щодо значень частот власних коливань вузлів, що досліджуються. Для дослідження відносних коливань інструменту та заготовки без різання та при різанні використовувався вібровимірювач мод. ВВВ-302 із безконтактним вихротоковим перетворювачем (рис. 4).

В процесі досліджень визначались частоти вільних коливань наступних вузлів та елементів верстата мод 1П420ПФ40: - короткої оправки довжиною 150мм та діаметром 40мм, при вимірюванні на вильоті 100мм від торця патрона; - планшайби револьверної головки; - корпусу револьверної головки; - корпусу шпиндельної бабки; - полозок супорту; - циліндру приводу затиску деталей та ін. (табл. 1).

Дослідження відносних коливань інструменту и заготовки без різання на працюючому верстаті проводились в діапазоні частот обертання шпиндельного вузла 200÷4000 об/хв. (3,33÷66,6 Гц) з дискретністю 200 об/хв. Найбільший рівень відносних коливань спостерігається на частоті 48,5 Гц – 51 dB. В приводі головного руху, що складається з двигуна, пасової передачі та шпиндельного вузла, одним із джерел радіальних та крутильних коливань є пасова передача. Враховуючи це можна припустити, що підвищення амплітуди відносних коливань на частоті 48,5 Гц викликано резонансними коливаннями пасу пасової передачі приводу.

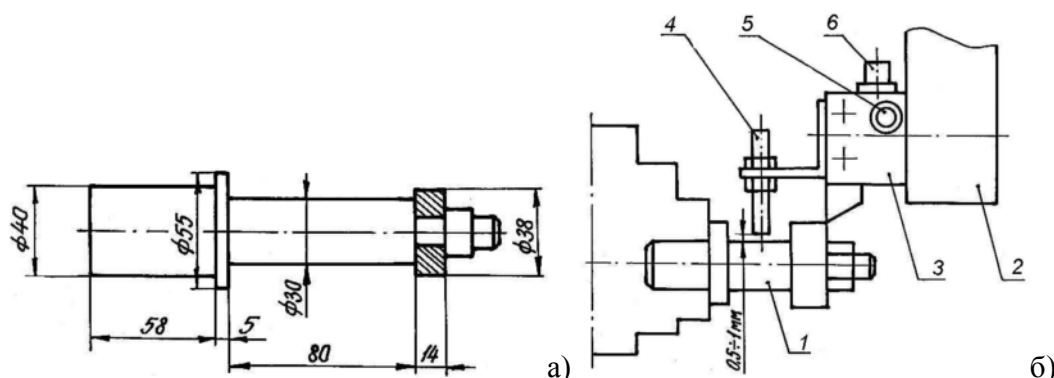


Рис. 4. Розміри оправки із комплектом змінних деталей-зразків (а) та схема розміщення датчиків під час визначення відносних коливань інструменту та заготовки при різанні (б), де 1 – оправка із змінною деталлю-зразком, 2 – планшайба револьверної головки, 3 – різцетримач, 4 – вихротоковий перетворювач, 5 та 6 – акселерометри

Таблиця 1. Частоти вільних коливань окремих вузлів верстата в діапазоні 0-1000Гц

№ п/п	Об'єкт вимірювання	Основна частота, Гц		Логарифмічний декремент коливань, λ	
		коорд. X	коорд. Y	коорд. X	коорд. Y
1.	Оправка в патроні: виліт 100мм, $d=40$ мм, довжина $l=150$ мм	432	450	0,25	0,34
2.	Планшайба револьверного супорту	120	110	0,52	0,57
3.	Корпус револьверної головки	265	265	0,3	0,27
4.	Поздовжні полозки супорту	75	75	0,24	0,27
5	Корпус шпиндельної бабки	97	97	0,77	0,77

Оцінка впливу динамічних характеристик основних вузлів верстата мод. 1П420ПФ40 на точність форми поперечного перерізу поверхонь оброблених на ньому деталей проводилась шляхом обробки партії деталей із сталі 45 різцем з твердосплавною пластинкою Т15К6 при режимах різання, що змінювались в наступному діапазоні: швидкість різання $V = 80 \div 400$ м/хв.; подача $S = 0,06 \div 0,3$ мм/об.; глибина різання $t = 0,5 \div 2,5$ мм. Дослідження при різанні проводилися за планом трифакторного п'ятирівневого експерименту $3^5/36$. Похибки форми поперечного перерізу деталей, що оцінювались за відхиленнями від круглості, при $S = 0,06$ мм/об., $t = 0,5 \div 1,5$ мм, $V = 100 \div 300$ м/хв. не перевищували 3 мкм.

3. Висновки

Проведення комплексних порівняльних досліджень ТРВ традиційної компоновки та з нахиленою станиною дозволяє зробити наступні висновки: - статистичний аналіз результатів дослідження норм точності верстатів дозволяє визначити шляхи подальшого вдосконалення верстатів в напрямку підвищення їх геометричної точності; - основними джерелами теплоутворення у верстатах як традиційної компоновки, так і з нахиленою станиною, є опори шпинделя та нагрів оливи в гідросистемі; - верстати мод. 1П420ПФ30 з нахиленою станиною трубчастої форми, сучасними конструкціями шпиндельного вузла, головного приводу та приводу затиску, по відношенню до верстатів традиційної компоновки, мають термосиметричну конструкцію з ефективним тепловідводом від

джерел теплоутворення та можуть бути використані як базові для створення верстатів високого класу точності; - сумарна жорсткість верстата мод. 1П420ПФ30 в напрямку на різець у 2,5 рази більше, ніж у верстата традиційної компоновки, що можна пояснити високою жорсткістю супортної групи; - визначені частоти власних коливань та демпфіруючі властивості базових вузлів можуть бути використані у якості коефіцієнтів при побудові математичних моделей динамічної системи верстата; - висока точність та якість обробки деталей на верстаті мод. 1П420ПФ40 дозволяє у деяких випадках відмовитись від фінішних операцій шліфування.

Виконані експериментальні дослідження ТРВ дозволили сформувати базу даних для подальших теоретичних досліджень в напрямку створення математичних моделей процесу токарної обробки із врахуванням реальних статичних та динамічних характеристик вузлів ТРВ, процесів у приводах та процесу різання.

Список літератури: 1. Орликов М.Л. Динамика станков: Учеб. пособие для вузов.-2-е изд. перераб. и доп. - Киев: Выща школа, 1989. - 272 с. 2. Решетов Д.Н., Портман В.Т. Точность металлорежущих станков - М.: Машиностроение, 1986.-336с. 3. Адаптивное управление станками / Под.ред. Б.С. Балакшина - М.: Машиностроение, 1973.-668с. 4. Методика разделения погрешностей получения размеров на металлорежущих станках/ Алехнович В.Е., Волосов С.С., Прошин А.А. и др. - в книге "Исследование в области инструментального производства и обработки металлов резанием"/ Тула, 1984. -с.112-116. 5. Повышение производительности и надежности токарно-револьверных станков / В.Н.Шишкин, В.Е. Лоев, Л.И.Новицкий, А.В. Шевченко.- К.: Техніка, 1986.-95с. 6. Шишкин В.Н., Шевченко А.В., Супрун С.И. Исследование балансов точности и жесткости многоцелевых токарных станков // Технологія та автоматизація машинобудування. – К.: Техніка, 1992. Вип.49. – с.103-110.

RESEARCHES OF TURRET LATHES ON PARAMETRES OF QUALITY

Shevchenko O.V. (NTUU "KPI", Kyiv, Ukraine)

Abstract: In article results of researches of accuracy of processing, temperature, elastic deformations and dynamic characteristics of turret lathes are resulted.

Keywords: turret lathe, balance of accuracy, balance of elastic deformations, temperature deformations, dynamic characteristics. It is shown, that results of the analysis of balances of accuracy, rigidity and temperature deformations allow to define ways of increase of accuracy of processing. Data on dynamic processes give the possibility to provide necessary level of chatter stability at turning processing.

ИССЛЕДОВАНИЯ ТОКАРНО-РЕВОЛЬВЕРНЫХ СТАНКОВ ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА

Шевченко А.В. (НТУУ „КПИ”, г. Киев, Украина)

Аннотация: В статье приведены результаты исследований точности обработки, температурных, упругих деформаций и динамических характеристик токарно-револьверных станков. Показано, что результаты анализа балансов точности, жесткости и температурных деформаций позволяют определить пути повышения точности обработки, а сведения о динамических процессах - обеспечить необходимый уровень виброустойчивости при токарной обработке.

Ключевые слова: токарно-револьверный станок, баланс точности, баланс упругих деформаций, температурные деформации, динамические характеристики.

Надійшла до редколегії 20.06.2011 р.