

УДК 621.822.572: 621.941.08

Федориненко Д.Ю. д.т.н., доц., Сапон С.П., Бойко С.В., к.т.н., доц.
Чернігівський державний технологічний університет, м. Чернігів, Україна

ВПЛИВ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ГІДРОСТАТИЧНИХ ОПОР НА ВИХІДНІ ПОКАЗНИКИ ТОЧНОСТІ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА

Fedorinenko D., Sapon S., Boyko S.
Chernihiv State Technological University, Chernigiv, Ukraine (s.sapon@gmail.com)

INFLUENCE OF TEMPERATURE DEFORMATIONS HYDROSTATIC SUPPORTS ON THE OUTPUT ACCURACY RATES OF SPINDLE KNOT

Проаналізовано причини виникнення температурних деформацій та їх вплив на експлуатаційні параметри гідростатичних опор шпинделя. Наведено методику та результати експериментальних досліджень впливу температури мастила на точність обертання шпинделя та точність обробки зразків-виробів. Встановлено, що з підвищенням тиску в карманах опори зменшується відхилення осі шпинделя від початкового положення та вплив температури на точність форми оброблених поверхонь у всьому діапазоні температур робочої рідини. Запропоновано шляхи зниження температурних деформацій гідростатичних шпиндельних опор.

Ключові слова: шпиндельний вузол, точність, гідростатична опора, теплові деформації, траєкторія, круглість, тиск, температура.

Вступ

Під час роботи будь-якого металорізального верстата, частина корисної потужності витрачається на подолання сил тертя, які виникають в рухомих з'єднаннях деталей та вузлів. З появою міжнародного стандарту ISO 230-3 вимоги до металорізальних верстатів з точки зору теплових ефектів значно зросли. Похибки обробки, зумовлені тепловими деформаціями елементів верстата співставні з допусками на виготовлення деталей та вимогами до точності переміщення робочих органів верстата. Тому для підвищення точності і якості обробки необхідно мінімізувати явища температурних деформацій в вузлах металорізальних верстатів та ґрунтовно вивчати закономірності їх просторово-часових змін. Пошук способів зменшення температурних деформацій верстатів є актуальною проблемою машинобудування, а вміння прогнозувати величини та характер зміни теплових деформацій під час роботи верстата є ефективним шляхом підвищення точності механічної обробки.

Зміна під дією температури взаємного розташування деталей та вузлів верстата призводить до появи похибок форми і розмірів оброблюваних деталей. Температурні зміщення формоутворюючих вузлів сучасних прецизійних верстатів можуть обумовлювати до 70% загальної похибки механічної обробки [1,2]. Шпиндельний вузол (ШВ) є одним з найбільш відповідальних формоутворюючих вузлів верстата. Домінуючий вплив на формування результуючих лінійних і кутових зміщень шпинделя здійснюють його опори, які водночас є одним з основних джерел тепловиділення в ШВ верстатів [3]. Зменшити вплив теплових деформацій на точність обробки можна підвищенням теплостійкості відповідальних деталей ШВ або компенсацією температурних похибок робочих органів верстата. Перспективним напрямком є використання композитних матеріалів для виготовлення відповідальних частин ШВ. Зокрема в роботі [4] показано зв'язок між температурними деформаціями і мікроструктурою композитних матеріалів і доведено доцільність застосування композитів в умовах змінних навантажень і температур. Спосіб підвищення точності обробки деталей за рахунок компенсації виявлених теплових і силових похибок підналагодженням верстата в процесі в обробки запропоновано Юркевичем В.В. [5] Незважаючи на високу точність даний спосіб потребує оснащення верстата додатковим обладнанням та засобами вимірювання, що призводить до підвищення вартості верстата і не завжди можна повноцінно реалізувати в реальних цехових умовах. У виробничих умовах експлуатації без внесення змін в конструкцію верстата підвищити точність обробки можна компенсацією температурних похибок шляхом коригування положення формоутворюючих вузлів на основі результатів досліджень впливу теплових процесів на вихідні характеристики верстата.

Метою даної роботи є дослідження впливу температурних деформацій шпиндельних гідростатичних опор (ГСО) на вихідні показники точності шпиндельного вузла токарного верстата та розробка ефективних заходів їх зменшення.

Результати досліджень

Проблема забезпечення точності та надійності металорізальних верстатів в цілому вирішується за рахунок забезпечення параметричної надійності його основних вузлів. Шпиндельний вузол є однією з основних підсистем металорізального верстата, що беруть участь у формоутворенні. Сприймаючи весь спектр експлуатаційних навантажень, ШВ повинен забезпечувати встановлені показники точності, зберігаючи їх в часі. В якості вихідних показників точності ШВ найбільш доцільно використовувати інтегральні показники, які б регламентували не тільки статичні, а й динамічні параметри його формоутворюючих рухів. Тому основними вихідними параметрами ШВ за показником точності є траєкторії просторового руху осі шпинделя [3] та точність оброблених зразків-виробів.

Точність обертання шпинделя і, як наслідок точність обробки на верстаті, багато в чому залежить від параметрів шпиндельних опор. В якості опор ШВ багатьох прецизійних і важких металорізальних верстатів застосовуються гідростатичні підшипники, які мають високі показники довговічності, несучої здатності, жорсткості, вібронейкості та забезпечують високу точність обертання шпинделя. Істотним фактором, що обмежує застосування гідростатичного мащення опорних вузлів шпинделя є значні втрати потужності на тертя, особливо на високих швидкостях обертання, та спричинене цим тепловиділення [6]. В результаті підвищення температури робочої рідини в ГСО в процесі тертя ковзання відбувається, як правило, не рівномірне нагрівання спряжених поверхонь підшипника. Це, в свою чергу, спричиняє розширення і появу температурних напружень елементів опори. Зазначені явища обумовлюють температурні деформації спряжених опорних поверхонь ГСО.

Відхилення форми, пружні та температурні деформації опорних поверхонь гідростатичних підшипників призводять до зміни товщини масляного шару, що спричиняє зменшення експлуатаційних характеристик ГСО (несучої здатності, радіальної жорсткості) [7]. В цій же роботі встановлено, що суттєвий вплив на експлуатаційні характеристики ГСО чинять деформації гідростатичної втулки в тангенціальному напрямку опори та овальність опорної поверхні гідростатичної втулки. Геометричні відхилення опорних поверхонь та деформації втулки в аксіальному напрямку підшипника неістотно впливають на несучу здатність та радіальну жорсткість ГСО. Проте вони впливають на формування моментної складової реакції і, як наслідок, на величину кутової жорсткості підшипника.

Оцінку впливу температурних деформацій опорних шийок шпинделя на величину мастильного шару між спряженими поверхнями ГСО здійснено за допомогою САЕ системи CosmosWorks. В результаті моделювання встановлено величини відхилень радіальної координати профілю опорної шийки ГСО в залежності від полярного кута (рис. 1), обумовлених температурними деформаціями.

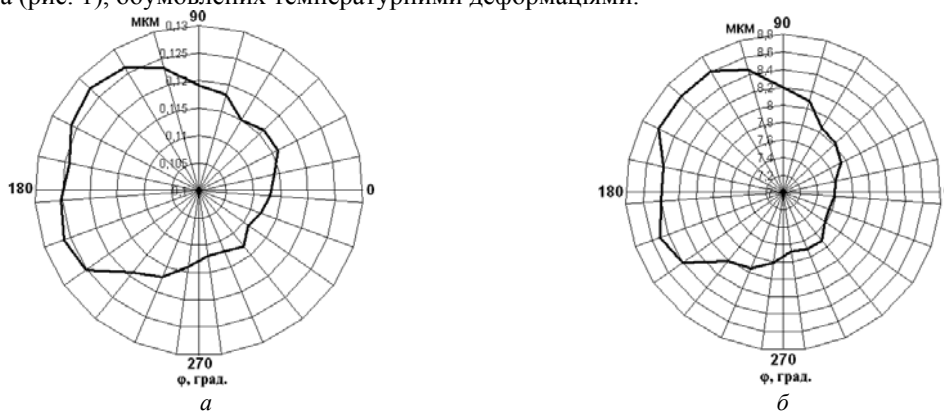


Рис. 1. Відхилення радіальної координати профілю опорної шийки шпинделя в залежності від температури T робочої рідини в ГСО: а) $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$; б) $T = 35\text{ }^{\circ}\text{C}$

Нагрівання робочої рідини на 10°C спричиняє зростання відхилень радіальної координати профілю опорної шийки шпинделя майже на 8 мкм і призводить до зменшення величини товщини масляного шару між спряженими поверхнями підшипника. Це викликає погіршення експлуатаційних характеристик ГСО.

У випадку використання гідростатичних підшипників, які мають великі витрати мастильної рідини, в якості опор шпиндельних вузлів спостерігається явище конвективного теплообміну в проточних частинах ГСО. Нагрівання мастила відбувається згідно експоненціального закону і істотно впливає як на експлуатаційні характеристики опор [8], так і точність положення шпинделя.

З метою оцінювання впливу температури мастильної рідини на точність обертання шпинделя, точність обробки проведено серію експериментальних досліджень на прецизійному токарно-гвинторізному верстаті УТ16А (рис. 2) з гідростатичними опорами шпинделя. Для отримання траєкторій обертання вимірювали радіальні зміщення Δx , Δy шпинделя за допомогою безконтактних триангуляційних лазерних датчиків, що встановлювалися у двох взаємноперпендикулярних напрямках (рис. 3). Лазерні датчики взаємодіють з контрольним пояском прецизійної оправки, встановленої в кінці шпинделя (рис. 4).

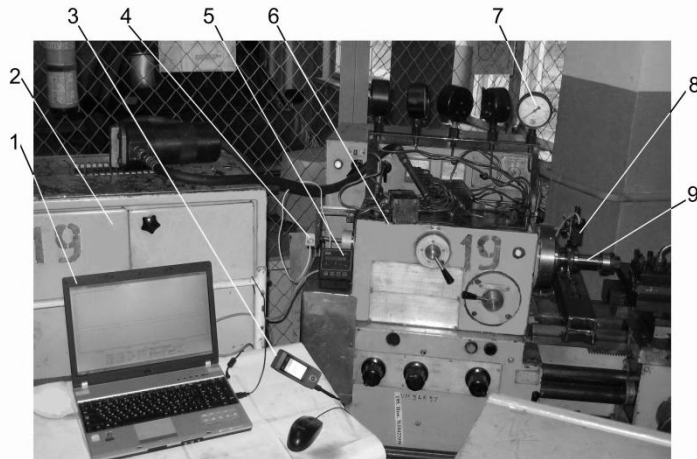


Рис. 2. Експериментальний стенд
1 – ноутбук, 2 – гідростанція, 3 – вимірювач температури,
4 – енкодер, 5 – електронний тахометр, 6 – токарно-
гвинторізний верстат УТ16А; 7 – манометр,
8 – лазерний датчик; 9 – прецизійна оправка

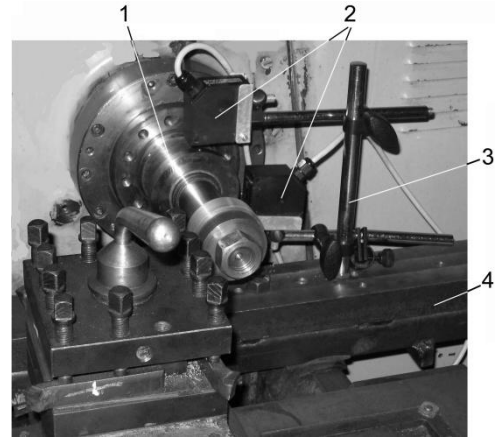


Рис. 3. Схема закріплення лазерних датчиків
1 – прецизійна оправка, 2 – датчики,
3 – стійка, 4 – плита

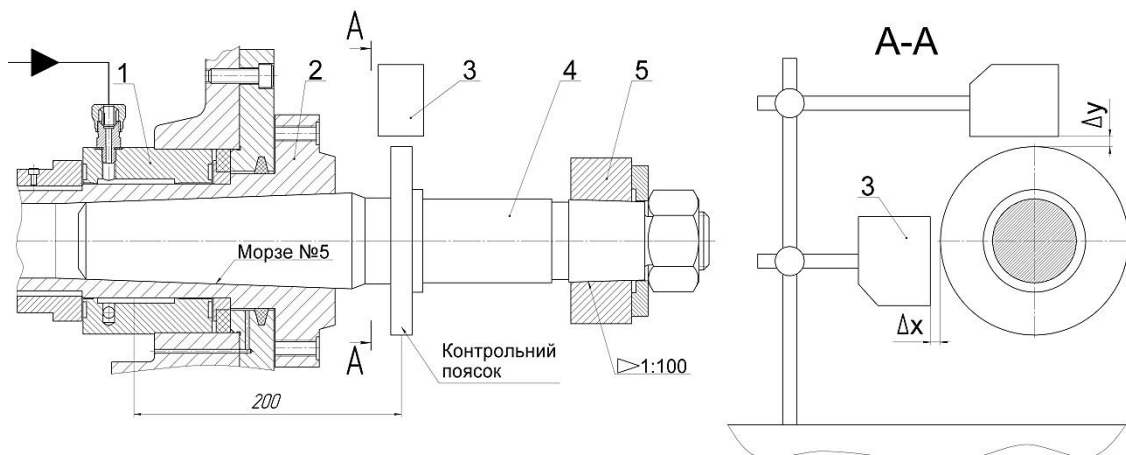


Рис. 4. До опису конструкції та схеми закріплення прецизійної оправки: 1 – ГСО, 2 – шпindel, 3 – лазерний датчик,
4 – прецизійна оправка, 5 – зразок-виріб

Точність взаємного розташування датчиків під забезпечувалась суміщенням лазерних променів з рисками на торці контрольного пояса прецизійної оправки. Риски наносились з використанням універсальної ділильної головки з точністю $\pm 0,033^0$. Прецизійна оправка має контрольний пояс, з яким взаємодіють лазерні датчики. З метою мінімізації похибки відносного розташування основної бази оправки відносно виконавчих поверхонь оправки (контрольний пояс, посадочна поверхня для встановлення заготовки), чистову обробку останніх проводили за один установ на даному верстаті, а після обробки оправка залишалась незмінно закріпленою в шпинделі протягом виконання всієї серії експериментальних досліджень. Це дало змогу забезпечити радіальне биття контрольного пояса в межах 0,5мкм.

Для вимірювання зміщень шпинделя використовували безконтактні лазерні триангуляційні датчики типу РФ603.2-10/2-485-U-IN-AL-CG, які не потребують підсилювальних пристроїв та мають можливість виводу вихідного сигналу як в аналоговій, так і цифровій формі. Робочий діапазон датчиків моделі становить 2мм, лінійність $\pm 0,002$ мм, роздільна здатність 0,2мкм, максимальна частота дискретизації 9,4кГц [9].

Вимірювання температури мастила в кармані передньої ГСО шпинделя здійснювалось за допомогою цифрового вимірювача температури моделі ИТП-5-2УН-ТФТ1 (рис.5) що може експлуатуватись в діапазоні від -50°C до $+1300^{\circ}\text{C}$ і забезпечує в діапазоні $0^{\circ}\dots+45^{\circ}\text{C}$ визначення температури з точністю до $0,5^{\circ}\text{C}$.

Оцінку впливу температурних деформацій ШВ на точність механічної обробки здійснювали за показником відхилення від круглості зовнішньої циліндричної поверхні зразків-виробів зі сталі 45 ГОСТ 1050-88 (рис.6). Зразки-вироби закріплювались на поверхні прецизійної оправки з конусністю 1:100 (див. рис.4). Обробку здійснювали токарним прохідним прямим різцем з пластиною з твердого сплаву Т15К6, з кутами $\varphi = \varphi_1 = 45^{\circ}$. $\alpha = 8^{\circ}$; $\gamma = 10^{\circ}$. Вимірювання відхилення від круглості оброблених зразків-виробів здійснювалось в п'яти поперечних перерізах на вимірювальному комплексі на базі кругломіра моделі 289 з одночасним записом круглограм і відхилень радіальної координати контуру вимірюваної поверхні в кодах АЦП.



Рис. 5. Загальний вид цифрового вимірювача температури моделі ІТП-5-2УН-ТФТ1

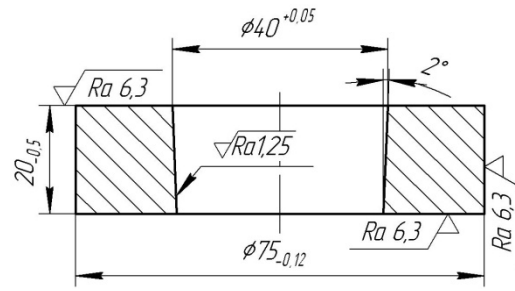


Рис. 6. Ескіз дослідного зразка-виробу

Експериментальні дослідження температурних деформацій ГСО здійснювали в неперервному та змінному режимах роботи ШВ. Неперервний режим експлуатації реалізовувався на холостому ходу ($n=1200\text{хв}^{-1}$). Експерименти проводились для двох значень тиску в карманах ГСО $p_1=2\text{МПа}$ та $p_2=3\text{МПа}$. В процесі обробки зразків-виробів реалізовувався змінний режим експлуатації, тобто періодичне чергування роботи шпинделя під навантаженням з боку процесу різання ($n=1200\text{хв}^{-1}$, $t=0,5\text{мм}$, $S=0,058\text{ мм/об}$) та зупинка обертання шпинделя для зняття обробленого і встановлення наступного зразка-виробу. Запис траєкторій обертання шпинделя та обробку зразків виробів здійснювали в діапазоні температури мастила $+20^\circ\text{...}+40^\circ\text{C}$ з інтервалом 5°C . Тренди траєкторій обертання шпинделя в режимі холостого ходу та в процесі обробки при зміні температури робочої рідини в ГСО для різної величини тиску в карманах опори наведено на рисунку 7. Траєкторії, наведені на рис. 7 відповідають одному оберту шпинделя. Тренди траєкторій побудовано за результатами статистичної обробки ансамблю траєкторій 50 обертів шпинделя, що відповідає мінімальному об'єму вибірки для оцінки середньоквадратичного відхилення (СКВ) для рівня значимості $\alpha=0,05$, похибки визначення СКВ $\Delta_\sigma = 0,2$ [10].

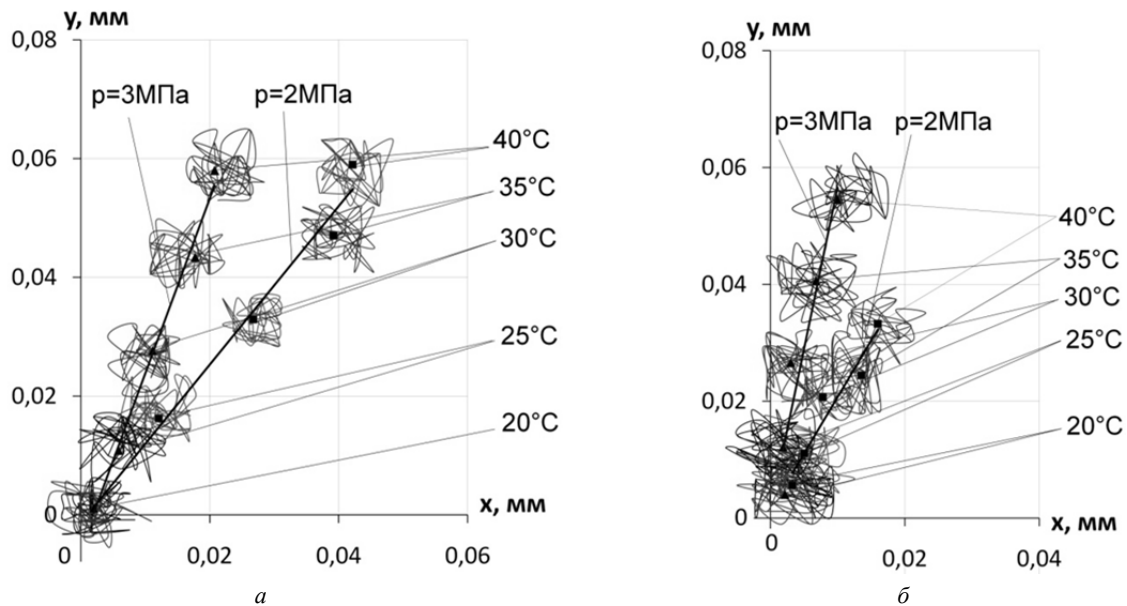


Рис. 7. Тренди траєкторій обертання шпинделя при зміні температури T робочої рідини в ГСО:
а – режим холостого ходу, б – обробка різанням

Як видно з графіків на (рис.7) траєкторії обертання шпинделя на ГСО мають яскраво виражений стохастичний характер. Збільшення температури робочої рідини в ГСО призводить до зміщення математичного очікування центру траєкторії шпинделя, причому більшого значення це зміщення набуває при тиску мастила в карманах ГСО 2МПа, що пояснюється меншою жорсткістю опори. Зазначене явище впливає на ексцентриситет шпинделя та обумовлює зниження точності обробки за показником радіального биття. В порівнянні з режимом холостого ходу, при обробці зразків-виробів зміщення осі шпинделя є меншим. Це пояснюється протидією температурним зміщенням складових зусилля різання. Причому з великою долею ймовірності можна стверджувати, що теплові деформації шпиндельного вузла даного верстата призводять до зміщення осі шпинделя в напрямку протилежному радіальній складовій сили різання. Найменші зміщення осі шпинделя при обробці, зафіксовані при тиску в карманах ГСО 2МПа, пояснюються більшою податливістю передньої опори під дією зусиль різання.

Графіки залежності СКВ ансамблів траєкторій осі шпинделя від температури мастила при різних значеннях тиску в карманах ГСО наведено на рис.8.

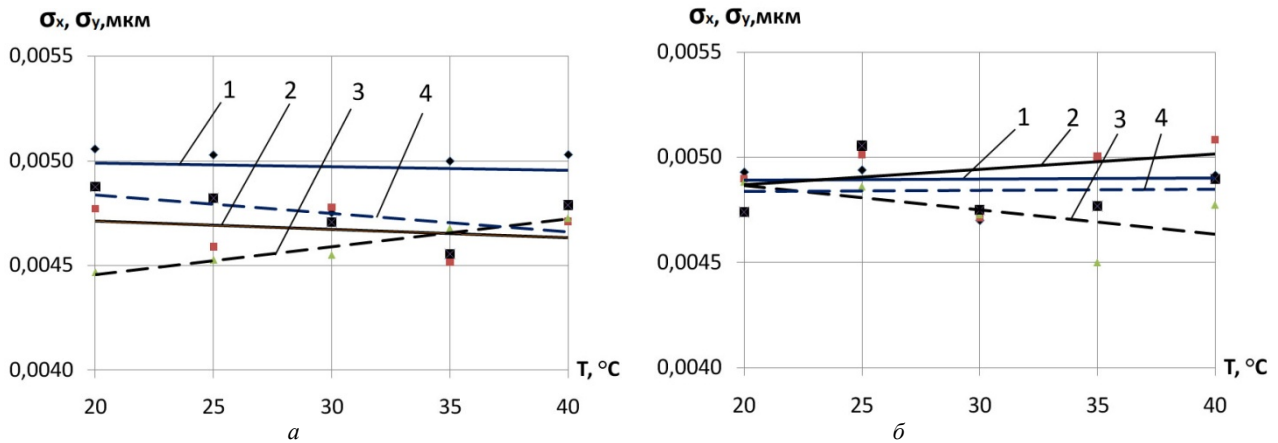


Рис. 8. Середньоквадратичні відхилення ансамблів траєкторій осі шпинделя при зміні температури робочої рідини в ГСО: *a* – режим холостого ходу, *б* – обробка різанням
1 – СКВ ансамблів траєкторій по осі OX при $p=2\text{МПа}$, 2 – СКВ ансамблів траєкторій по осі OY при $p=2\text{МПа}$,
3 – СКВ ансамблів траєкторій по осі OX при $p=3\text{МПа}$, 4 – СКВ ансамблів траєкторій по осі OY при $p=3\text{МПа}$

Середньоквадратичні відхилення ансамблів траєкторій обертання шпинделя мало змінюються під впливом температури мастила. Найбільша зміна СКВ траєкторій (див. рис. 8) спостерігається в напрямку осі OX при тиску 3МПа і становить 8,5%, що свідчить про несуттєвий вплив температури рідини на поле розсіювання зміщень шпинделя за координатними осями, а отже і на точність діаметрального розміру. Незначний вплив температури мастила на СКВ траєкторій шпинделя пояснюється забезпеченням постійної величини тиску в карманах ГСО впродовж виконання кожної серії експериментів.

З метою оцінки безпосереднього впливу температури мастила в карманах ГСО та точності обробки на вимірювальному комплексі на базі кругломіра моделі 289 визначали відхилення від круглості оброблених зразків-виробів. В результаті встановлено (рис.9), що при збільшенні температури робочої рідини в карманах опори спостерігається зростання відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів при тиску мастила в карманах опори 2МПа. При підвищенні тиску до 3МПа відхилення від круглості зменшується у всьому діапазоні температур, при цьому збільшення температури в карманах опори на відхилення від круглості практично не впливає.

Ефективними способами зменшення температурних деформацій ГСО є розробка нових конструкцій опор, використання систем автоматичної корекції теплових деформацій, застосування матеріалів з малим коефіцієнтом лінійного розширення. В результаті моделювання засобами САЕ системи CosmosWorks встановлено, що застосування в якості матеріалу гідростатичної втулки стеклотекстоліту дозволило зменшити температурні деформації втулки на 25% порівняно зі сталлю 65Г.

Висновки

Встановлено закономірності формування точності обертання шпинделя на ГСО та точності обробки різанням в залежності від тиску та температури робочої рідини. Виявлено, що збільшення температури мастила призводить до погіршення експлуатаційних параметрів ГСО внаслідок зміни розмірів та форми спряжених поверхонь гідростатичного підшипника. В режимі холостого ходу з підвищенням температури та зниженням тиску мастила в ГСО зміщення математичного очікування центру траєкторії шпинделя в горизонтальній площині зростає в 2-2,4 рази відносно його початкового положення. В процесі обробки різанням зміщення осі шпинделя знижується, причому зменшення тиску в карманах ГСО до 2МПа призводить до зменшення відхилення осі шпинделя і у вертикальному і в горизонтальному напрямку. Вплив температури мастила на СКВ траєкторій шпинделя незначний. Зниження тиску та підвищення температури мастила в карманах ГСО призводить до зростання в 1,5-2 рази відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів. Проте, з підвищенням тиску в ГСО до 3МПа вплив температури на точність форми оброблених поверхонь мінімізується.

Перспективним напрямком подальших досліджень є розробка конструкцій ГСО з композитних матеріалів та експериментальне визначення впливу температурних деформацій таких опор на вихідні показники точності шпиндельних вузлів.

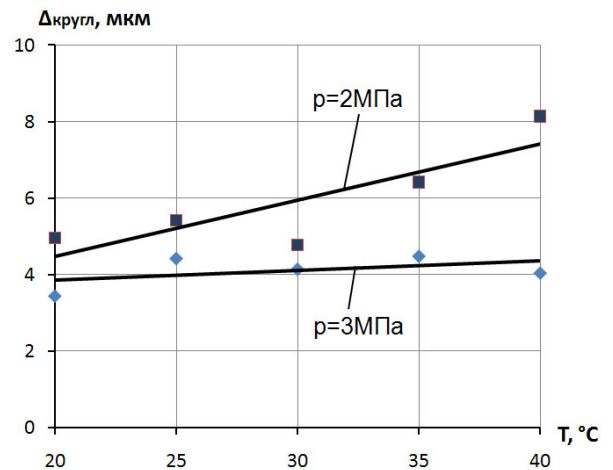


Рис. 9. Вплив тиску та температури робочої рідини в ГСО на відхилення від круглості поверхонь зразків-виробів

Аннотация. Проанализированы причины возникновения температурных деформаций и их влияние на эксплуатационные параметры гидростатических опор шпинделя. Приведена методика и результаты экспериментальных исследований влияния температуры масла на точность вращения шпинделя и точность обработки образцов-изделий. Установлено, что с повышением давления в карманах опоры уменьшается отклонение оси шпинделя от начального положения и снижается влияние температуры на точность формы обработанных поверхностей во всем диапазоне температур рабочей жидкости. Для снижения температурных деформаций также предложено выполнять детали гидростатических шпиндельных опор из композитных материалов.

Ключевые слова: шпиндельный узел, точность, гидростатическая опора, тепловые деформации, траектория, круглость, давление, температура.

Abstract. Purpose of work is study the influence of temperature deformations of hydrostatic spindle supports on output accuracy rates of turning machine spindle knot.

Design/methodology/approach. To assess the accuracy rates spindle knot uses integrated indexes: the trajectory of spatial movement axis spindle and accuracy of samples processed. Assessment of the impact of temperature deformations spindle support surfaces on the value of lubricating layer between the conjugate bearing surfaces by using CAE system CosmosWorks. Order to receive a trajectories of rotation displacement Δx , Δy spindle measured non-contact method using laser triangulation sensors. Measuring the roundness of the processed surfaces of samples was performed on roundness meter model 289.

Findings. With increasing temperature and decrease in oil pressure in the hydrostatic spindle supports increasing displacement of the center spindle trajectory relative to its starting position and increasing deviation from roundness of machined surfaces of the samples. When machining a decrease spindle axis deviation, due to opposition from the temperature displacement power cut. Influence of temperature on oil mean square deviation of trajectories spindle negligible. With increasing pressure to 3MPa increase the oil temperature of hydrostatic support on precision mold machined surfaces are not affected.

Originality/value. Identified patterns are essential to reducing of the influence thermal deformation on the accuracy of processing. Prediction of the value and character changes thermal deformation of the machine tool is an effective way to improve the accuracy machining.

Keywords: spindle knot, precision, hydrostatic support, thermal deformation, the trajectory, roundness, pressure, temperature.

Бібліографічний список використаної літератури

1. Бушуев В.В. Направления развития мирового станкостроения/ В.В.Бушуев, Ф.С.Сабиров // Вестник МГТУ Станкин, 2010. № 1. с. 24–30.
2. Zhu Rui. Thermal error analysis and error prediction modeling on a machine tool./Zhu Rui, Dai Shijie, Zhu Yonglu, Wu Xinye, Guo Yinbiao// Proceedings of the 2008 IEEE IEEM. p. 2056-2060.
3. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность./ А.В.Пуш – М.: Машиностроение, 1992. – 228 с.
4. Igor Sevostianov. On the thermal expansion of composite materials and cross-property connection between thermal expansion and thermal conductivity. Mechanics of Materials 45 (2011) 20–33.
5. Пат. 2438830 Российская федерация, МПК В23В25/06. Устройство компенсации тепловых и силовых погрешностей токарного станка/ Юркевич В.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО МГТУ "СТАНКИН". – № 2010132735/02, заяв. 05.08.2010; опубл. 10.01.2012, Бюл. №1. – 8 с.
6. Федориненко Д.Ю. Вплив експлуатаційних параметрів на характеристики гідростатичних опор шпинделя/ Д.Ю. Федориненко, С.П. Сапон // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – 2011. – Вип. 31. – С. 396–402.
7. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах / В.Б.Струтинський, Д.Ю.Федориненко. – Ніжин: "Аспект-Поліграф", 2011. – 464 с.
8. Бушуев В.В. Гидростатическая смазка в станках / В.В. Бушуев — М.: Машиностроение, 1989. — 176 с.
9. Триангуляционные лазерные датчики. Серия РФ603. Руководство по эксплуатации. – Мн.: ООО «РИФТЭК», 2011. – 46 с.
10. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: Справочник./ М.Н.Степнов. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.

References

1. Bushuev V.V. Sabirov F.S. Vestnik MGTU Stankin, 2010. № 1. pp. 24–30.
2. Zhu Rui., Dai Shijie, Zhu Yonglu, Wu Xinye, Guo Yinbiao. Thermal error analysis and error prediction modeling on a machine tool. Proceedings of the 2008 IEEE IEEM. p. 2056-2060.
3. Push A.V. Shpindel'nye uzly: Kachestvo i nadezhnost'. [Spindle knots: quality and reliability]. Moscow: Mashinostroenie, 1992, 228p.
4. Igor Sevostianov. On the thermal expansion of composite materials and cross-property connection between thermal expansion and thermal conductivity. Mechanics of Materials 45 (2011) pp.20–33.
5. Jurkevich V.V. Ustrojstvo kompensacii teplovyh i silovyh pogreshnostej tokarnogo stanoka [The device offset heat and power errors of turning machine] Patent Rossijskoj federacii no 2438830 A. 10.01.2012.
6. Fedorinenko D.Y., Sapon S.P. Naukovi notatki. Mizhvuzivsk'ij zbirnik. [Scientific notes. Interuniversity collection]. 2011. Ed. 31 pp. 396–402.
7. Strutins'kij V.B., Fedorinenko D.Y. Statistichna dinamika shpindel'nih vuzliv na gidrostatichnih oporah [Statistical dynamics of spindle units for hydrostatic supports]. Nizhin: "Aspekt-Poligraf", 2011, 464p.
8. Bushuev V.V. Gidrostaticheskaja smazka v stankah [Hydrostatic lubrication in machine tools]. Moscow: Mashinostroenie, 1989, 176p.
9. Trianguljacionnye lazernye datchiki. Serija RF603. Rukovodstvo po jekspluatácii. Minsk: «RIFTEK», 2011, 46p.
10. Stepnov M.N. Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mehanicheskijh ispytanij: Spravochnik. [Statistical methods for processing the results of mechanical testing]. Moscow: Mashinostroenie, 1985, 232p.