

УДК 621.822.572

Сапон С.П., к.т.н., доцент; Федориненко Д.Ю., д.т.н., професор; Бойко С.В., к.т.н., доцент
Чернігівський національний технологічний університет

ВРАХУВАННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ДЕФОРМАЦІЙ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ФУНКЦІЇ РАДІАЛЬНОГО ЗАЗОРУ В ГІДРОСТАТИЧНІЙ ОПОРІ ВИСОКОШВИДКІСНОГО ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА

Обґрунтовано необхідність та наведена методика врахування температурних деформацій одночасно з відхиленнями форми опорних поверхонь гідростатичних підшипників для аналізу функції радіального динамічного зазору. За результатами моделювання визначено питому частку температурних деформацій у величині статичного радіального зазору гідростатичної опори високошвидкісного шпindelного вузла при різних значеннях зазору та температури. Встановлено вплив температури на величину амплітуд гармонік профілю поперечного перетину опорних поверхонь шпindelа та гідростатичної втулки. Запропоновано залежність для описання функції радіального динамічного зазору в гідростатичній опорі, в якій спільно з похибками форми враховано зміщення опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпindelа, зумовлені їх температурними деформаціями. Наведено рекомендації щодо визначення складових функцій радіального динамічного зазору в гідростатичній опорі.

Температурні деформації, гідростатична опора, шпindelний вузол, радіальний зазор, похибки форми.

Вступ

Однією із сучасних тенденцій світового верстатобудування є створення високошвидкісних металорізальних верстатів. Можливості високошвидкісної обробки ґрунтуються на сучасних розробках в області створення різальних інструментів з використанням новітніх інструментальних матеріалів. Зростання швидкостей різання обумовлює інтенсифікацію теплових процесів, що відбуваються у формоутворюючих вузлах верстатів, зокрема в шпindelному вузлі (ШВ). Окрім вимог забезпечення заданої потужності у поєднанні з високою швидкохідністю, до ШВ ставляться вимоги підвищеної жорсткості, теплостійкості, мінімальних втрат на тертя, високої точності обертання, забезпечення заданого ресурсу роботи [1]. Ці показники в першу чергу забезпечують шпindelні опори. Тому необхідність забезпечення точності при високошвидкісній обробці обумовлює актуальність дослідження теплових процесів, що протікають в шпindelних підшипниках верстата.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В монографії [2] встановлено, що застосування в ШВ гідростатичних опор (ГСО) регульованого типу є ефективним напрямком підвищення точності верстатів, що забезпечує розширення їх технологічних можливостей, підвищення продуктивності обробки на основі високошвидкісних конструктивних виконань опор та зниження експлуатаційних витрат завдяки регулюванню геометричних, експлуатаційних параметрів ГСО залежно від характеру технологічного навантаження. Теплові процеси в шпindelних ГСО обумовлюють появу температурних деформацій, які призводять до спотворення геометрії спряжених поверхонь підшипника, що відповідним чином позначається на величині радіального зазору [3]. На сьогодні існує декілька підходів до описання функції радіального зазору в ГСО, проте в одних випадках [2, 4] не враховується вплив температурних деформацій опорних поверхонь, а в інших [5, 6] враховуються температурні, пружні деформації без врахування похибок форми опорних поверхонь. Тому існує необхідність в розробці методики врахування спільного впливу похибок форми і температурних деформацій опорних поверхонь на величину радіального зазору в ГСО.

Метою даної роботи є розробка методики, яка дозволяє одночасно врахувати зміщення, обумовлені температурними деформаціями та геометричні відхилення форми опорних поверхонь при визначенні функції радіального зазору в гідростатичній опорі високошвидкісного шпindelного вузла.

Основний зміст і результати роботи.

Для математичного опису відхилень профілю поперечного перетину опорних поверхонь гідростатичного підшипника в монографії [2] пропонується використання ряду Фур'є. Зручність застосування ряду Фур'є для опису макрогеометрії опорних поверхонь полягає в можливості одночасного врахування багатьох відхилень профілю, що є сумою декількох синусоїд з певними значеннями амплітуди. Кожна гармоніка ряду має чітко виражений геометричний сенс: перша гармоніка відповідає абсолютному ексцентриситету контуру, друга - характеризує еліпсність, наступні гармоніки визначають огранку та хвилястість контуру з числом хвиль, що дорівнює номеру гармоніки ряду. В результаті функція зазору $h(\varphi)$ з урахуванням відхилень форми спряжених поверхонь в монографії [2] представлена у вигляді:

$$h(\varphi) = \delta_0 + \left[A_1^B \sin \varphi + \psi_{01}^B + A_2^B \sin 2\varphi + \psi_{02}^B + A_3^B \sin 3\varphi + \psi_{03}^B + \dots + A_4^B \sin 4\varphi + \psi_{04}^B + A_5^B \sin 5\varphi + \psi_{05}^B + A_6^B \sin 6\varphi + \psi_{06}^B \right] - A_1^M \sin \varphi + \chi_{01}^M + A_2^M \sin 2\varphi + \chi_{02}^M + T_{кр}^B + T_{кр}^M \quad (1)$$

де δ_0 – радіальний статичний зазор в опорі;

$A_1^B \dots A_6^B, \psi_{01}^B \dots \psi_{06}^B$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду відповідно, які характеризують відхилення гідростатичної втулки;

$A_1^M \dots A_2^M, \chi_{01}^M \dots \chi_{02}^M$ – амплітуди та початкові фази гармонік ряду відповідно, які характеризують відхилення опорної поверхні шпинделя;

$T_{кр}^B, T_{кр}^M$ – допуски круглості опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя відповідно.

В формулі (1) враховано вплив відхилень форми отвору гідростатичної втулки та опорної шийки шпинделя на функцію зазору $h(\varphi)$, проте не враховано зміщення, обумовлені температурними деформаціями шпиндельних опор. Основним негативним чинником, що обумовлює необхідність і важливість врахування температурних деформацій опорних поверхонь ГСО є їх випадковий характер внаслідок навіть незначної анізотропії властивостей матеріалу деталей, що утворюють спряжені поверхні підшипника. В першому наближенні оцінку впливу температурних зміщень опорних шийок шпинделя та гідростатичної втулки на величину радіального зазору між спряженими поверхнями ГСО можна здійснити використовуючи будь-яку САЕ-систему, яка має можливість здійснення відповідних розрахунків. В даній роботі застосовано модуль інженерного аналізу SolidWorks Simulation, інтегрований в середовище твердотільного моделювання SolidWorks Premium 2012.

Розглянемо методику врахування впливу температурних деформацій на радіальний зазор в ГСО. При моделюванні прийнято 4-х карманну гідростатичну втулку із загартованої сталі 45 ГОСТ 1050-88 з дренажними канавками між карманами (рис. 1), шпиндель за рекомендаціями [2] прийнято зі сталі 18ХГТ ГОСТ 4543-71, із загартованою до твердості HRC 56-60 опорною шийкою.

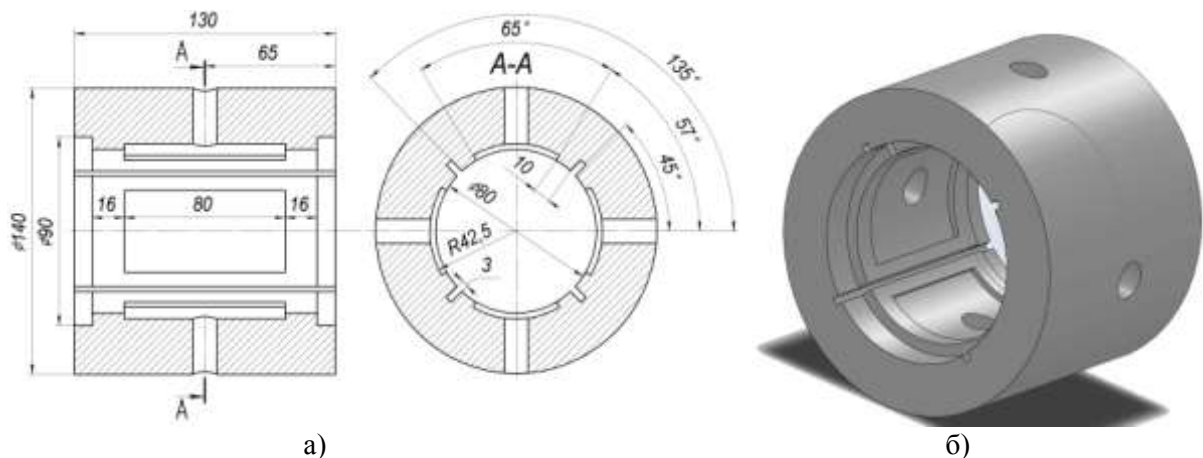


Рис. 1. Ескіз а) та тривимірна модель б) гідростатичної втулки

Попередньо в настройках системи встановлюється температура $T_0=20^{\circ}\text{C}$ при якій температурні деформації відсутні (рис. 2).

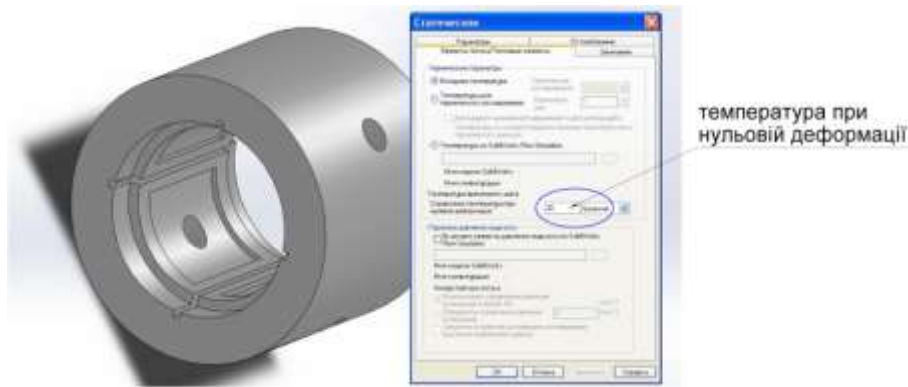


Рис. 2. Настроювання в САЕ-системі SolidWorks Simulation температури при якій деформації відсутні

При тривимірному моделюванні для побудови профілю опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя за відсутності теплових деформацій використовуються результати вимірювання похибок форми опорних поверхонь. За умови відсутності таких даних в першому наближенні можна скористатись значеннями відхилень форми для поширених конструкцій ГСП, які наведено в [2, 3, 7].

Після побудови тривимірної моделі активізується модуль інженерного аналізу SolidWorks Simulation, в якому вибирається меню «Статичне дослідження». Спочатку встановлюються граничні умови у вигляді фіксації від переміщення поверхонь, які є основними базами деталей, потім прикладаються навантаження на опорні поверхні деталей ГСО: тиск та температура (рис. 3, а), після чого запускається процедура побудови скінчено-елементної сітки (рис. 3, б).

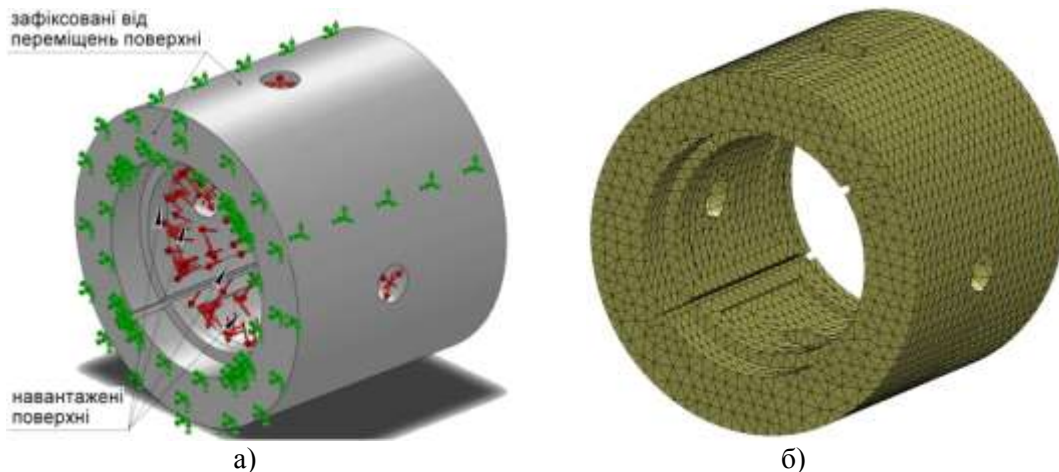


Рис. 3. Відображення граничних умов, навантажень а) та скінчено-елементної сітки б) тривимірної моделі гідростатичної втулки

У випадку вдалого розрахунку скінчено-елементної сітки у Менеджері SolidWorks Simulation з'являться папки з результатами розрахунків, де нас цікавлять значення зміщень опорних поверхонь ГСО внаслідок одночасної дії тиску та температури. Виділивши за допомогою команди «Зондування» поверхні, для яких визначаються температурні зміщення отримаємо відображення числового значення результату на вказаній поверхні моделі (рис. 4). Результати моделювання температурних деформацій у вигляді дискретних значень зміщень радіальної координати профілю опорних поверхонь виводяться у файл формату *.txt, який достатньо легко імпортується в пакети Microsoft Excel або MathCAD де здійснювалась їх статистична обробка.

Враховуючи випадковий характер теплових деформацій спряжених поверхонь ГСО визначали їх статистичні характеристики: математичне сподівання та дисперсію величини зміщення радіальної координати профілю опорних поверхонь підшипника. Аналіз величини та діапазон відхилення температурних зміщень оцінювали за математичним сподіванням $m \bar{\Delta}_r$ та дисперсією $\sigma^2 \bar{\Delta}_r$ питомої величини зміщення радіальної координати профілю опорних повер-

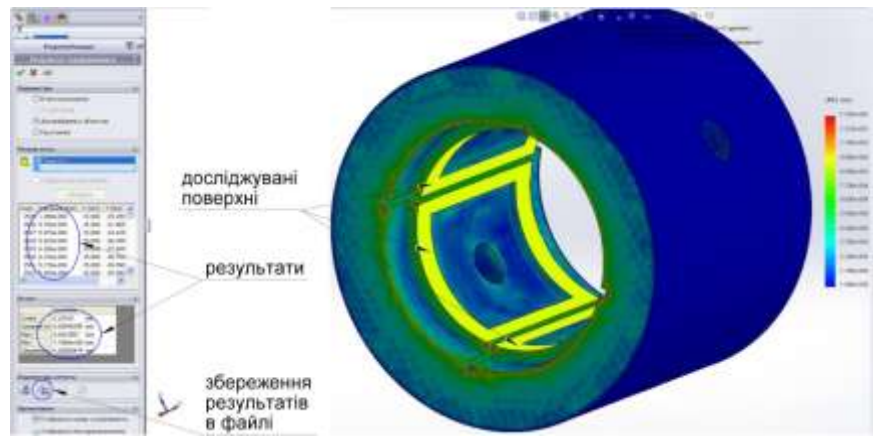


Рис. 4. Відображення результатів моделювання температурних деформацій

хонь підшипника (рис. 5), які є безрозмірними величинами, що характеризують частку температурних зміщень опорних поверхонь у величині радіального зазору ГСО:

$$m \overline{\Delta r} = \frac{m \Delta r_T^{BT} + m \Delta r_T^{III}}{\delta_0}, \quad \sigma^2 \overline{\Delta r} = \frac{\sigma^2 \Delta r_T^{BT} + \sigma^2 \Delta r_T^{III} + 2 \text{cov} \Delta r_T^{BT}, \Delta r_T^{III}}{\delta_0^2} \quad (2)$$

де $m \Delta r_T^{BT}$, $\sigma^2 \Delta r_T^{BT}$, $m \Delta r_T^{III}$, $\sigma^2 \Delta r_T^{III}$ – математичні сподівання та дисперсії величини зміщення радіальної координати профілю опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя відповідно при певній усталеній температурі;

$\text{cov} \Delta r_T^{BT}, \Delta r_T^{III}$ – коваріація величин зміщення радіальної координати профілю опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя при певній усталеній температурі.

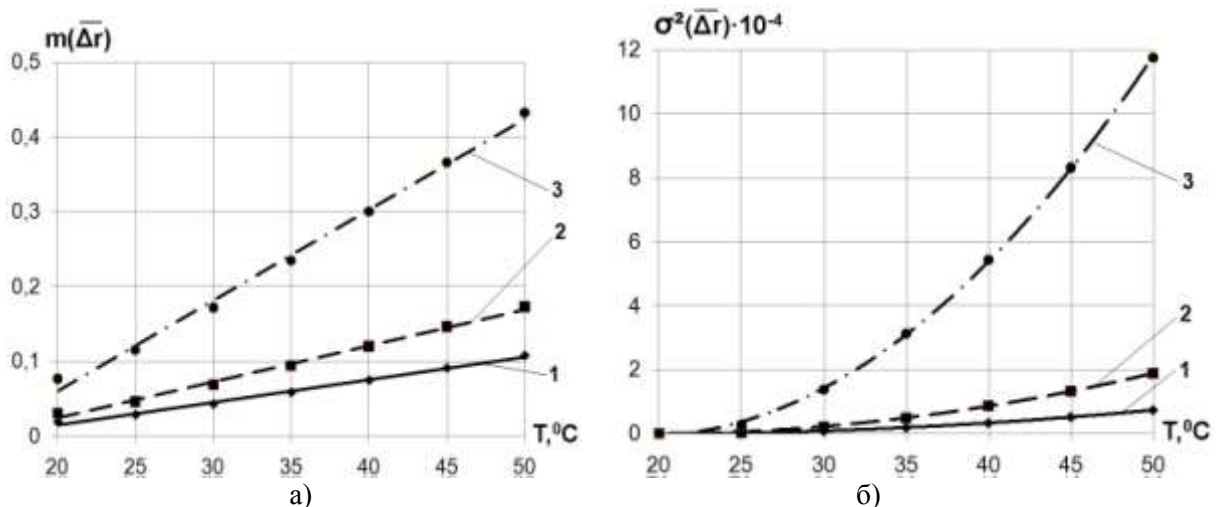


Рис. 5. Математичне сподівання $m(\overline{\Delta r})$ а) та дисперсія $\sigma^2 \overline{\Delta r}$ б) питомої величини зміщення радіальної координати профілю опорних поверхонь ГСО залежно від температури при різних величинах радіального статичного зазору δ_0 : 1 – $\delta_0=40$ мкм, 2 – $\delta_0=25$ мкм, 3 – $\delta_0=10$ мкм

З наведених на рисунку 5 залежностей видно, що зі зменшенням величини статичного радіального зазору δ_0 вплив теплових деформацій опорних поверхонь ГСО при підвищенні температури проявляється значніше. Так, при величині радіального зазору $\delta_0=10$ мкм частина зміщень, обумовлених температурними деформаціями без урахування похибок форми опорних поверхонь складає понад 40%. Враховуючи, що відхилення форми циліндричних поверхонь, що відповідають високій (С) відносній геометричній точності, можуть складати до 12% від допуску розміру [8], сумарно частина температурних зміщень з відхиленнями форми опорних поверхонь може перевищувати 50% величини радіального статичного зазору, що безумовно впливатиме на робочі процеси в ГСО, знижуючи їх експлуатаційні характеристики.

Здійснений засобами пакету MathCAD за методикою, наведеною в [2 ,9] спектральний

аналіз профілю поперечного перерізу опорних поверхонь шпинделя та втулки при різних значеннях температури (рис. 6) дозволяє зробити висновок про збільшення амплітуд всіх гармонік зі зростанням температури опорних поверхонь ГСО. Найбільш суттєво проявляється вплив температури на 4-у гармоніку та кратні гармоніки з номерами 8, 12, 16. Це обумовлено 4-х карманним типом гідростатичної втулки з дренажними канавками, які створюють розривний профіль опорної поверхні найбільш схильний до прояву температурних деформацій.

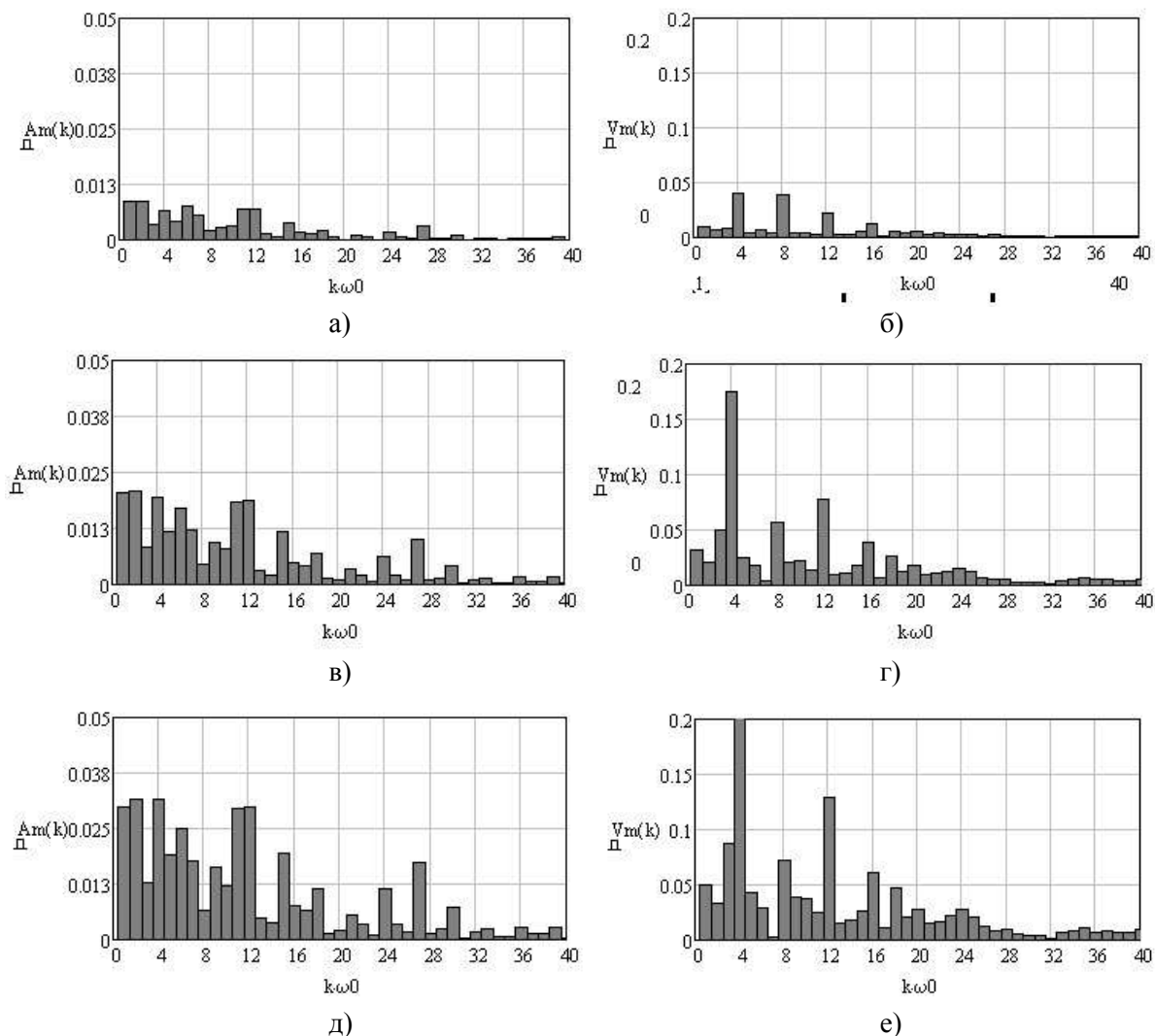


Рис. 6. Спектри амплітуд гармонік профілю опорних поверхонь ГСО: а, в, д – опорна шийка шпинделя при температурах відповідно 25⁰С, 35⁰С, 45⁰С; б, г, е – опорна поверхня гідростатичної втулки при температурах відповідно 25⁰С, 35⁰С, 45⁰С

Таким чином, в математичному описанні функції зазору $h(\varphi)$ (1) слід враховувати зміщення опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя, зумовлені їх температурними деформаціями, а з огляду впливу температури на величину амплітуд гармонік профілю опорних поверхонь ГСО, при математичному описанні відхилень профілю їх поперечного перетину слід збільшувати число значимих гармонік зі зростанням температури опорних поверхонь. В результаті формула, що описує функцію радіального зазору $h(\varphi)$ з врахуванням зміщень опорних поверхонь ГСО, обумовлених температурними деформаціями матиме вигляд:

$$h(\varphi) = \delta_0 - m \Delta r_T^{BT} - m \Delta r_T^{III} + \frac{T_{kp}^{BT}}{2} + \frac{T_{kp}^{III}}{2} + \sum_{k=1}^N A_k^{BT} \sin k\varphi + \psi_{0k}^{BT} - \sum_{k=1}^Q A_k^{III} \sin k\varphi + \chi_{0k}^{III} \quad (3)$$

де N та Q – відповідно кількість значимих гармонік профілю опорних поверхонь гідростатичної втулки і шпинделя при певній температурі.

Математичні сподівання величини зміщення радіальної координати $m \Delta r_T^{BT}$, $m \Delta r_T^{III}$, профілю опорних поверхонь визначаються за результатами чисельного моделювання або

натурного експерименту. Кількість N , Q та амплітуди $A_k^{вт}$, $A_k^{шт}$ значимих гармонік профілю опорних поверхонь підшипника визначаються за результатами спектрального аналізу їх контуру. З огляду на варіативність конструктивного виконання опорних поверхонь ГСО, в першому наближенні складові функції зазору обумовлені пружними та температурними деформаціями при певній усталеній температурі визначаються за результатами чисельного моделювання засобами САЕ-систем, наприклад SolidWorks Simulation, ANSYS тощо.

Висновки

Розроблена методика врахування спільного впливу похибок форми і температурних деформацій опорних поверхонь на величину радіального зазору в ГСО, яка може бути використана для аналізу підшипників ковзання широкою номенклатури.

За результатами моделювання в САЕ-системі SolidWorks Simulation встановлено, що з підвищенням температури величина зміщення опорних поверхонь ГСО, обумовлених температурними деформаціями зростає. Зі зменшенням величини статичного радіального зазору вплив теплових деформацій при підвищенні температури проявляється значніше і при величині радіального зазору $\delta_0=10$ мкм питома частка зміщень, обумовлених температурними деформаціями без урахування похибок форми опорних поверхонь складає понад 40%.

На основі спектрального аналізу профілю опорних поверхонь шпинделя та гідростатичної втулки при різних значеннях температури встановлено збільшення амплітуд всіх гармонік зі зростанням температури опорних поверхонь ГСО.

Для описання функції радіального зазору в ГСО запропоновано залежність, в якій одночасно з похибками форми враховано зміщення опорних поверхонь гідростатичної втулки та шпинделя, зумовлені їх температурними деформаціями.

Перспективним напрямком подальших досліджень є встановлення закономірностей формування показників точності шпиндельного вузла від величини температурних зміщень та амплітуд гармонік профілю опорних поверхонь ГСО.

1. Гордєєв О.Ф. Напрямки та перспективи розвитку конструкцій шпиндельних опор верстатів для високошвидкісної та високопродуктивної обробки / О.Ф. Гордєєв, П.О. Захаров // Наукові нотатки. Міжвузівський збірник. – 2007. – Вип. 20, том 1. – с. 96–101.

2. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія/ В.Б. Струтинський, Д.Ю. Федориненко. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 464с.

3. Бушуев В.В. Гидростатическая смазка в станках /В.В. Бушуев. – М.: Машиностроение, 1989. – 176 с.

4. Дем'яненко С.К. Розробка методології конструювання гідростатично-гідродинамічних шпиндельних опор металорізальних верстатів з підвищеними показниками жорсткості: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / С.К. Дем'яненко. – К.: НТУУ «КПІ», 2002. – 21 с.

5. Ковальов В.Д. Основи теорії розрахунку та проектування гідравлічних опорних вузлів верстатного устаткування: дис. доктора техн. наук: 05.03.01 / Віктор Дмитрович Ковальов. – К.: НТУУ „КПІ”, 2001. – 424 с.

6. Пономаренко О.В. Підвищення точності важких верстатів за рахунок застосування адаптивних гідростатичних опорних вузлів: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: спец. 05.03.01 / О.В. Пономаренко. – Донецьк, 2010. – 21 с.

7. Проектирование металлорежущих станков и станочных систем: справочник-учебник в 3-х т. Т.2. ч.1 Расчет и конструирование узлов и элементов станков / [А.С. Проников, О.И. Аверьянов, Ю.С. Аполлонов и др.]; под общ. ред. А. С. Проникова. – М.: Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана: Машиностроение, 1995. – 371с.

8. Допуски формы и расположения поверхностей. Числовые значения: ГОСТ 24643-81. – [Действ. от 1981-07-01]. – М.: Госстандарт, 1988. – 14 с.

9. Федориненко Д.Ю. Вплив технологічної спадковості на точність регульованих шпиндельних гідростатичних опор / Д.Ю. Федориненко, С.П. Сапон, С.В. Бойко // Технологічні комплекси. – 2012. – № 1,2 (5,6). – С. 176 – 182.