

УДК 621.822.572

Д.Ю. Федориненко, С.П. Сапон, А.А. Урліна, С.В. Бойко
ВПЛИВ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ ШПИНДЕЛЬНОГО ВУЗЛА З
ГІДРОСТАТИЧНИМИ ОПОРАМИ НА ТОЧНІСТЬ ОБРОБКИ

За результатами експериментальних досліджень виявлено вплив режимів різання, стичного дисбалансу та тиску в карманах гідростатичної опори шпинделя токарного верстата на відхилення від круглості зразків-виробів. Обґрунтовано недоцільність забезпечення максимально високого тиску в карманах гідростатичної опори у зв'язку зі зниженням її демпфуючих властивостей.

Ключові слова: шпиндель, гідростатичні опори, експлуатаційні параметри, експериментальні дослідження, відхилення від круглості. Форм. 4. Табл. 1. Рис. 5. Літ. 11.

Д.Ю. Федориненко, С.П. Сапон, А.А. Урліна С.В. Бойко
ВЛИЯНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ШПИНДЕЛЬНОГО УЗЛА С
ГИДРОСТАТИЧЕСКИМ ОПОРАМИ НА ТОЧНОСТЬ ОБРАБОТКИ

В результате экспериментальных исследований выявлено влияние режимов резания, статического дисбаланса и давления в карманах гидростатической опоры шпинделя токарного станка на отклонение от круглости образцов-изделий. Обоснована нецелесообразность обеспечения максимально высокого давления карманах гидростатической опоры в связи со снижением ее демпфирующих свойств

Ключевые слова: шпиндель, гидростатические опоры, эксплуатационные параметры, экспериментальные исследования, отклонение от круглости.

D. Fedorinenko, S. Sapon, A. Urlina, S. Boycko
THE INFLUENCE OF OPERATIONAL PARAMETERS OF THE SPINDLE UNIT
WITH HYDROSTATIC SUPPORT FOR PRECISION MACHINING

In result of experimental researches revealed the effect of cutting conditions, static unbalance and the hydrostatic pressure in the pockets of the lathe spindle support on the deviation from roundness samples-products. Proved inexpedient to ensure the highest hydrostatic pressure pockets of support in connection with decrease of its damping properties

Keywords: spindle, hydrostatic supports, operational parameters, experimental researches, the deviation from roundness.

Постановка проблеми. Аналіз процесів формоутворення на верстатах різного технологічного призначення свідчить, що основними вихідними параметрами верстата, як елемента технологічного комплексу, є показники точності робочих рухів формоутворюючих вузлів. Шпиндельний вузол є одним з найбільш відповідальних формоутворюючих вузлів, на долю якого припадає від 50 до 80% похибок в загальному балансі точності верстата [1]. Оцінка геометричної точності металорізальних верстатів здійснюється за показниками радіального, осьового, торцевого биття допоміжних баз шпинделя в регламентованих умовах за стандартом [2]. Проте, в реальних умовах експлуатації на металорізальний верстат в цілому і шпиндельний вузол зокрема діє широкий спектр факторів внутрішнього (конструктивні особливості) та зовнішнього характеру (експлуатаційні параметри, технологічні навантаження) зумовлюючи відхилення показників точності. Тому об'єктивно оцінити вихідні показники точності шпиндельного вузла можна лише врахувавши весь комплекс факторів, які одночасно діють на шпиндельний вузол.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Широкого застосування в якості шпиндельних опор прецизійних верстатів набули гідростатичні підшипники (ГСП), які поряд з високими експлуатаційними характеристиками забезпечують можливість керування точністю шпинделя під навантаженням з боку процесу різання.

Дослідженню впливу конструктивних та експлуатаційних параметрів на показники точності шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах (ГСО) присвячені роботи багатьох вітчизняних вчених. Зокрема, в роботі [3] авторами показана принципова можливість керування вихідними характеристиками роторів на основі регулювання геометричних, теплофізичних параметрів опор рідинного тертя, розроблені методики розрахунку характеристик регульованих підшипників гідростатичного і гідростатодинамічного типів. Вплив регулювання зазору в ГСО на показники точності оброблених деталей досліджено в монографії [4]. В роботі проф. Гордєєва О.Ф. [5] відображено вплив зазору в ГСО на відхилення від круглості оброблених зразків.

Невирішені частини проблеми. Незважаючи на значний обсяг досліджень впливу параметрів ГСО на показники точності шпиндельних вузлів, в наявних літературних джерелах не виявлено вплив тиску в карманах ГСО на точність обробки, лише констатується необхідність забезпечення максимального тиску в карманах для підвищення несучої здатності та жорсткості опор. Не знайшли відображення питання впливу статичної невірноваженості шпиндельного вузла, яка має місце при обробці конструктивно невірноважених заготовок, на показники точності форми оброблених поверхонь. Тому, на наш погляд існує необхідність більш ґрунтовного

дослідження впливу названих експлуатаційних параметрів шпиндельного вузла з ГСО на точність обробки зразків-виробів.

Метою дослідження є встановлення залежності відхилення від круглості оброблених деталей від експлуатаційних параметрів шпиндельного вузла з гідростатичними опорами.

Основні результати дослідження. Одним із способів оцінки точності верстатів токарної групи є контроль відхилення від круглості оброблених зразків-виробів [6]. Вагомою складовою точності верстата, що безпосередньо впливає на параметри оброблюваних деталей, є точність шпиндельного вузла. Істотний вплив на показники точності шпиндельних вузлів здійснюють технологічні навантаження (зусилля різання, частота обертання шпинделя, статична нерівноваженість оброблюваної заготовки тощо) та експлуатаційні параметри їхніх опор. В якості опор шпиндельних вузлів багатьох прецизійних і важких металорізальних верстатів застосовуються гідростатичні підшипники, які дозволяють забезпечувати високі показники довговічності, несучої здатності, жорсткості, вібростійкості та забезпечують високу точність обертання шпинделя. Основними експлуатаційними параметрами ГСО шпиндельних вузлів є тиск в карманах опори, температура, в'язкість та витрати мастила.

В даній роботі досліджувався вплив тиску в карманах ГСО та технологічних навантажень процесу різання на відхилення від круглості оброблених поверхонь зразків-виробів. З цією метою здійснювали обробку партію зразків-виробів зі сталі 45 ГОСТ 1050-88 (рис.1) в кількості 27 штук.

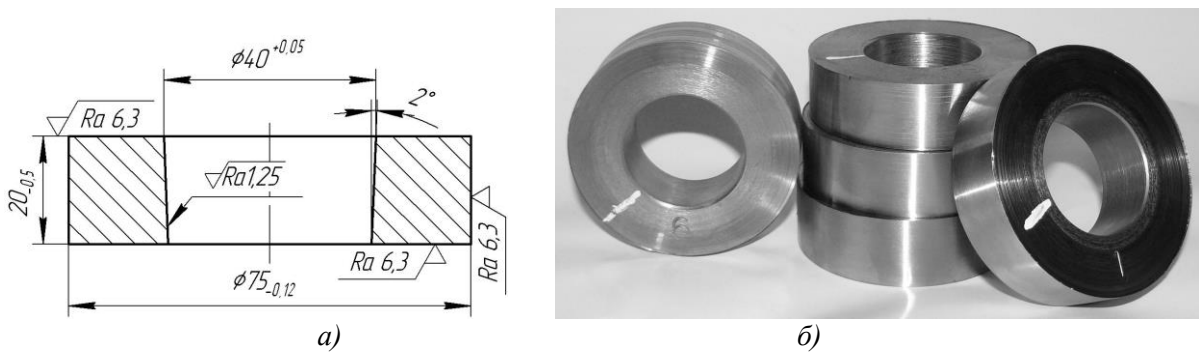


Рис. 1. Ескіз а) та загальний вигляд б) дослідних зразків-виробів

Партія зразків-виробів виготовлена в однакових умовах відповідно до вимог стандарту [7], без термообробки. Обробка партії зразків-виробів здійснювалась відповідно до рекомендацій стандарту [6]. Заготовки закріплювались на конічній поверхні прецизійної оправки (рис.2). Обробку здійснювали токарним прохідним прямим різцем з пластиною з твердого сплаву Т15К6, з кутами $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$, $\alpha = 8^\circ$; $\gamma = 10^\circ$.

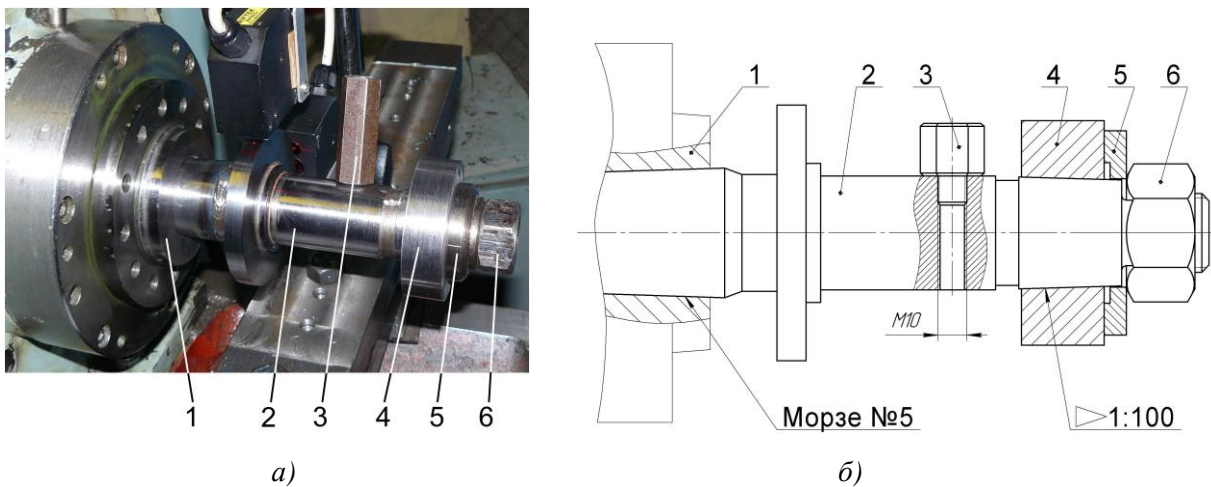


Рис. 2. Загальний вигляд а) та ескіз б) прецизійної оправки: 1 – шпиндель; 2 – прецизійна оправка; 3 – змінний вантаж; 4 – оброблювана заготовка; 5 – шайба; 6 – гайка

Для отримання математичної моделі, що описує залежність відхилення від круглості оброблених зразків від режимів різання, стичного дисбалансу та тиску в карманах ГСО шпинделя

здійснено планування експерименту методом ортогонального планування 2-го порядку [8], інтервали варіювання, рівні та натуральні значення факторів наведено в таблиці 1.

Таблиця 1. Рівні та інтервали варіювання факторів

Інтервал варіювання і рівні факторів	Натуральні значення факторів				
	n, хв ⁻¹	S, мм/об	t, мм	D _{ст.} · 10 ⁻⁶ кг·м	p, МПа
Інтервал варіювання	900	0,072	0,4	2150	1,0
Верхня «зіркова точка» (-1,414)	2770	0,23	1,4	7385	4,4
Верхній рівень (+1)	2400	0,2	1,2	6524	4,0
Нульовий рівень (0)	1500	0,128	0,8	4360	3,0
Нижній рівень (-1)	600	0,056	0,4	2219	2,0
Нижня «зіркова точка» (-1,414)	230	0,026	0,2	1303	1,6

Відхилення від круглості оброблених поверхонь вимірювались на кругломірі моделі 298 в п'яти поперечних перерізах по довжині зразка-виробу з одночасним записом круглограм в масштабі 1000:1 (рис. 3) та відхилень радіальної координати контуру вимірюваної поверхні в кодах АЦП з метою наступної цифрової обробки на комп'ютері.

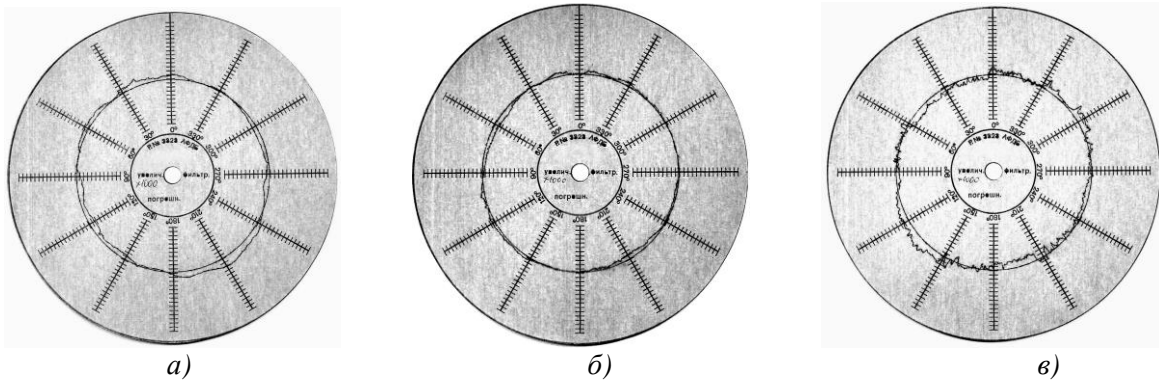


Рис. 3. Приклади круглограм поверхонь зразків-виробів оброблених при варіюванні тиском в карманах ГСО: а) p=1,6 МПа; б) p=3,0 МПа; в) p=4,4 МПа

Попередній статистичний аналіз результатів вимірювань здійснювали за методикою [9]. Спочатку перевіряли гіпотезу про нормальність закону розподілу результатів вимірювання відхилень від круглості за критерієм χ^2 Пірсона. Розраховане значення $\chi^2 = 2,302$ не перевищує критичне значення $\chi_{\alpha}^2 = 7,82$ для рівня значимості $\alpha = 0,05$ та числа ступенів волі $r = 3$, що підтверджує гіпотезу про нормальність закону розподілу результатів вимірювання відхилень від круглості. Далі оцінювали дисперсії середнього арифметичного в кожному рядку плану експерименту, після чого здійснювали перевірку відтворюваності дослідних даних за критерієм Кохрена. Розраховане значення критерія Кохрена $G_{розр} = 0,111$ не перевищує табличного $G_{табл} = 0,138$, що підтверджує гіпотезу про однорідність дисперсій. Наступним етапом був розрахунок коефіцієнтів рівняння регресії та оцінка їх значимості за t-критерієм Стьюдента. Після виключення не значимих коефіцієнтів отримали рівняння регресії:

$$\Delta_{кр} = 16,687 - 6,43 \cdot 10^{-3} \cdot n - 6,907 \cdot t + 17,866 \cdot S - 2 \cdot 10^{-4} \cdot D_{ст} - 4,904 \cdot p + 1,74 \cdot n \cdot t - 0,012 \cdot n \cdot S + 3,46 \cdot 10^{-7} \cdot n \cdot D_{ст} + 17,014 \cdot S \cdot t + 2,3 \cdot t \cdot p + 0,65 \cdot p^2 + 1,7 \cdot 10^{-6} \cdot n^2 \quad (1)$$

Перевірка за критерієм Фішера підтвердила адекватність отриманої математичної моделі з довірчою ймовірністю 0,95: розраховане значення критерія Фішера $F_{розр} = 0,889$ не перевищує табличного $F_{розр} = 1,76$.

Підстановкою в рівняння (1) розраховано числові значення відхилення від круглості оброблених зразків-виробів для різних комбінацій змінних факторів та отримано графіки залежностей (рис.4).

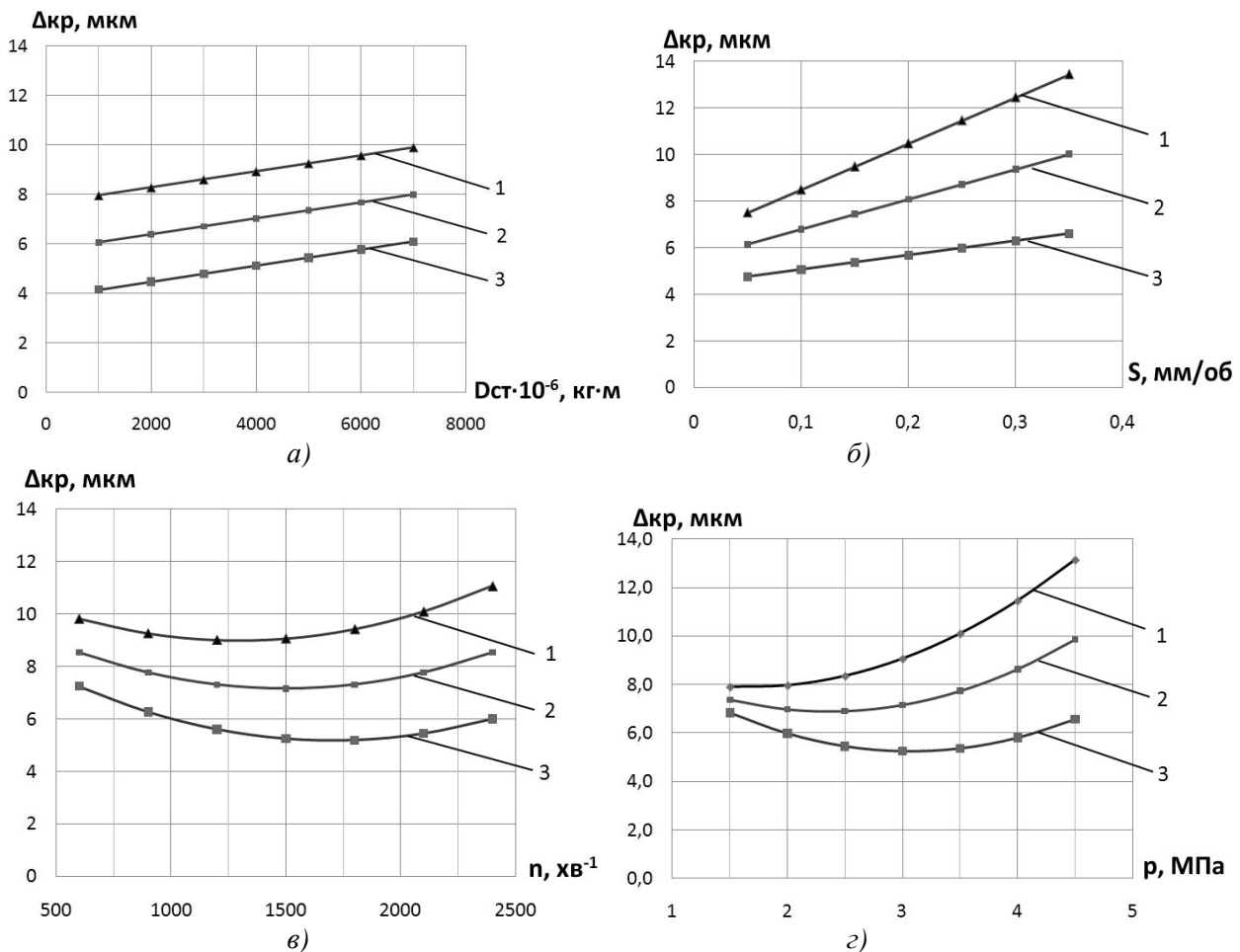


Рис.4. Залежності відхилення від круглості зразків-виробів: 1 – t=1,2мм; 2 – t=0,8мм; 3 – t=0,4мм

Аналізуючи наведені на рисунку 4 графіки, можна зробити наступні висновки: зі збільшенням глибини різання в усіх випадках комбінування факторів спостерігається зростання відхилення від круглості оброблених зразків. Це зумовлено головним чином зростанням зусилля різання, від якого прямо пропорційно залежать пружні деформації елементів технологічної системи ВПД та вібро активність шпиндельного вузла. Аналогічними причинами обумовлено зростання відхилення від круглості при збільшенні величини подачі S (див. рис.4,б). Також зростанням вібро активності шпиндельного вузла пояснюється збільшення відхилення від круглості при зростанні величини зовнішнього статичного дисбалансу $D_{ст}$ (див. рис.4,а).

Залежність відхилення від круглості від тиску в карманах опори (див. рис.4,г) та частоти обертання шпинделя (див. рис.4,в) має екстремальний характер. Зменшення некруглості оброблених зразків-виробів при підвищенні частоти обертання шпинделя пояснюється зниженням величини складових зусилля різання при швидкостях $V > 100 \text{ м/хв}$ (для даних умов проведення експерименту $n > 425 \text{ хв}^{-1}$) [10]. Зростання відхилення від круглості при подальшому підвищенні частоти обертання шпинделя пояснюється збільшенням невірноваженої сили P_H від дисбалансів, яка пропорційна квадрату кутової швидкості ω обертання шпинделя ($P_H \sim \omega^2$), що обумовлює відповідне збільшення ексцентриситету обертання шпинделя та параметрів вібрації шпиндельного вузла.

Зростання відхилення від круглості при малих значеннях тиску в карманах ГСО обумовлено недостатньою жорсткістю, а при збільшенні тиску – навпаки надмірною жорсткістю та зниженням демпфуючих властивостей мастильного шару. Оптимальна величина тиску в карманах ГСО, при якій досягається найменше значення відхилення від круглості, зі зменшенням глибини різання зростає.

За результатами математичного описання контуру оброблених поверхонь партії зразків-виробів засобами пакету MathCAD здійснено спектральний аналіз частотного складу круглограм.

Описання форми заготовки здійснено інтерполяцією дискретних значень ординат контуру перерізу заготовки кубічними сплайнами за допомогою вбудованих функцій `cspline` і `interp`.

Математичний опис форми зразків-виробів виконано за допомогою ряду Фур'є, що включає 80 гармонік і відповідає частотному діапазону 0...400 Гц. Розклад в ряд Фур'є форми зразків-виробів подано у вигляді суми синусоїдальних функцій-складових гармонік розкладу [11]:

$$r(\varphi) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^{80} Am_k \sin(k\varphi + \psi_k), \quad (2)$$

де Am_k , ψ_k – амплітуда і початкова фаза k -ї гармоніки.

Коефіцієнти, амплітуди і початкові фази ряду (2) знайдені шляхом розрахунків за формулами [11]:

$$Am_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}, \quad \psi_k = \arctg \frac{a_k}{b_k}. \quad (3)$$

$$a_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} r(\varphi) \cos(k\varphi) d\varphi, \quad b_k = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} r(\varphi) \sin(k\varphi) d\varphi, \quad (4)$$

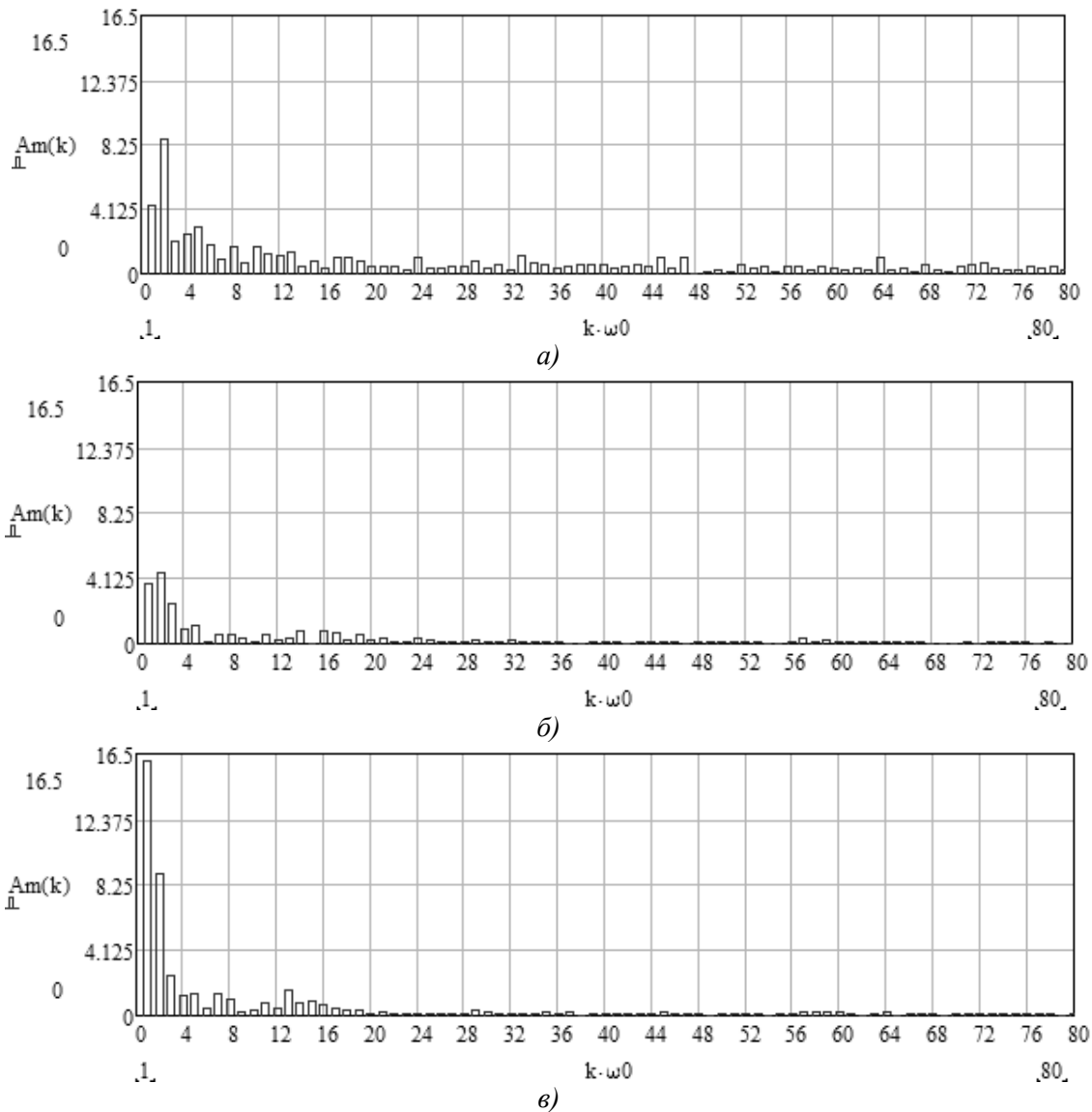


Рис. 5. Спектр амплітуд гармонік зразків-виробів, оброблених при різній величині тиску в карманах ГСО шпинделя: а) $p=4,4$ МПа; б) $p=3,0$ МПа; в) $p=1,6$ МПа

Коефіцієнти ряду Фур'є, амплітуд і початкових фаз гармонік утворюють спектр контуру обробленої поверхні зразка-виробу. На рис. 5 наведено спектри гармонік A_{mk} ряду Фур'є заготовок, які оброблювалися при варіюванні тиском в карманах ГСО.

Як видно з приведених спектрів, найменші значення амплітуд 1-ї та 2-ї гармонік, що відповідно характеризують ексцентриситет та овальність контуру зразків-виробів, спостерігаються при тиску в карманах ГСО, $p=3\text{МПа}$, що в повній мірі корелюється із залежностями, наведеними на рис. 4, г. і підтверджує адекватність рівняння регресії (1).

Висновки. За результатами експериментальних досліджень встановлено аналітичну залежність відхилення від круглості зразків-виробів оброблених на токарному верстаті від режимів різання, стичного дисбалансу та тиску в карманах ГСО шпинделя. Адекватність отриманої математичної моделі підтверджено розрахунком критерію Фішера та експериментальним шляхом. Встановлено, що збільшення глибини різання, подачі та зовнішнього статичного дисбалансу викликають прямо пропорційне зростання відхилення від круглості оброблених деталей. Вплив тиску в карманах ГСО та частоти обертання шпинделя на відхилення від круглості оброблених зразків-виробів має нелінійний характер. Отримані експериментальні залежності свідчать про недоцільність забезпечення максимально високого тиску в карманах гідростатичної опори, оскільки при цьому спостерігається зростання відхилення від круглості внаслідок зниження демпфуючих властивостей мастильного шару.

Для підвищення точності обробки необхідно застосовувати регульовані ГСО шпинделя, які дозволять керувати експлуатаційними параметрами, що впливають на точність обертання шпинделя, з метою встановлення їх оптимальної величини в залежності від експлуатаційних навантажень.

1. Пуш А.В. Шпиндельные узлы: Качество и надежность. / – М.: Машиностроение, 1992. – 228 с.
2. Станки металлорежущие. Схемы и способы измерений геометрических параметров: ГОСТ 22267-76. – [Действ. от 1988-01-01]. – М.: Издательство стандартов, 1988. – 141 с.
3. Артеменко Н.П., Чайка А.И., Доценко В.Н. Гидростатические опоры роторов быстроходных машин / под. ред. Н.П. Артеменко. – Х.: Основа, 1991. – 197 с.
4. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / В.Б.Струтинський, Д.Ю.Федориненко. – Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 464 с.
5. Гордеев А.Ф. Гидростатические шпиндельные подшипники /А.Ф. Гордеев, Ю.Н.Соколов//Станки и инструмент. – 1966. – № 7. – С. 14-17.
6. Станки токарно-винторезные и токарные. Основные размеры. Нормы точности: ГОСТ 18097-93. – [Действ. от 1996-07-01]. – М.: Издательство стандартов, 1996. – 20 с.
7. Станки металлорежущие. Образцы-изделия для проверки точности обработки. Общие технические требования: ГОСТ 25443-82. – [Действ. от 1982-09-09] – М.: Издательство стандартов, 1983. – 5 с.
8. Душинский В.В. Оптимизация технологических процессов в машиностроении / В.В.Душинский, Е.С. Пуховский, С.Г. Радченко. – К.: Техника, 1977. – 176 с.
9. Степнов М.Н. Статистические методы обработки результатов механических испытаний: справочник. – М.: Машиностроение, 1985. – 232 с.
10. Соколовский А.П. Расчеты точности обработки на металлорежущих станках. / А.П.Соколовский – М.: Машгиз, 1952. – 288 с.
11. Струтинський В.Б. Статистична динаміка шпиндельних вузлів на гідростатичних опорах: монографія / В.Б.Струтинський, Д.Ю. Федориненко. – Ніжин: ТОВ „Видавництво „Аспект-Поліграф”, 2011. – 464 с.

Стаття надійшла до редакції 01.05.2013