

УДК 621.87

DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10\(41\).1.155-163](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2024.10(41).1.155-163)**В.О. Дзюра**, проф., д-р техн. наук, **Т.Р. Дживак**, асп., **В.Я. Федів**, асп.*Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, м. Тернопіль, Україна***І.І. Чвартацький**, доц., канд. техн. наук*Бережанський агротехнічний інститут, м. Бережани, Україна**e-mail: volodymyrdzyura@gmail.com*

## Трансформація відхилень від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гідроциліндра при його виготовленні

В статті наведено результати визначення точності форми поперечних перерізів та отримано числові значення статистичних характеристик розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра телескопування стріли автомобільного крана КТА-25 після виконання кожної технологічної операції з її оброблення. Визначено вплив технологічних операцій як на величину відхилення від круглості та і переважаючі гармоніки, які вказують на тип відхилення форми. Побудовано полігони розсіювання відхилень від круглості поперечних перерізів гільз циліндрів. Встановлено, що технологічна операція напівчистового розточування суттєво не змінює величину та форму відхилення від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра. Форма відхилення від круглості допоможе встановити дефект верстатного обладнання та запобігти утворенню виявлених відхилень від круглості оброблених поверхонь.

**відхилення від круглості, точність форми, гармоніки, погон розсіювання, внутрішня циліндрична поверхня**

**Постановка проблеми.** Працездатність машини визначається працездатністю основних вузлів та агрегатів, які в свою чергу забезпечуються заданим ресурсом робочих поверхонь відповідальних деталей. У сучасних машинах є велика кількість деталей, де робочими поверхнями є циліндричні поверхні пар тертя. До таких деталей відносяться гільзи двигунів внутрішнього згорання, гільзи гідроциліндрів, амортизаторів та інші. Щоб забезпечити закладений у деталь ресурс необхідно забезпечити закладені конструктором геометричні параметри якості. Від точності виготовлення робочих поверхонь цих деталей залежить надійність деталі і, відповідно, вузла чи агрегату у який вона входить.

Виробництво високоякісних гідроциліндрів для техніки різного призначення залишається однією з найважливіших задач в машинобудуванні. Спеціалізовані підприємства повністю не забезпечують потреби виробників машин [1]. Багато заводів, що випускають спеціалізовану техніку, змушені самостійно виготовляти для неї гідроциліндри. При цьому використовують складні і трудомісткі технології, які вимагають спеціального обладнання та інструменту, екологічно шкідливих ділянок та т.п. Зношеність обладнання, відсутність належної якості комплектуючих і матеріалів, брак фахівців не дозволяють випускати машини сучасного технічного рівня.

Передові закордонні компанії максимально використовують покупні комплектуючі, виготовлені спеціалізованими підприємствами, які досягли досконалості своїх виробів. Одні виробники хонінгують, розвертають або розкатують труби, отримуючи високий рівень чистоти внутрішньої поверхні, інші - обробляють і хромують штоки, забезпечуючи їм необхідну твердість і опір агресивним зовнішнім впливам.

Таким чином підприємства, які виготовляють самі гідроциліндри фактично займаються лише їх складанням. Такий підхід істотно скорочує капіталовкладення у виробництво, оскільки всі операції можуть виконуватися на універсальному обладнанні і не вимагають дорогих спеціальних верстатів, оригінального інструменту і складної оснащення. Виключаються також екологічно шкідливі ділянки та постійна турбота про утилізацію відходів виробництва при хромованні штоків.

Використання високоякісних комплектуючих економічно виправдано. Відмова від малоефективних і трудомістких виробничих операцій дає можливість скоротити персонал або переорієнтувати його на інші види робіт. Подібні технології забезпечують високий рівень якості гідроциліндра, підвищують гнучкість виробництва, створюють можливість швидкого розширення асортименту продукції, що випускається [4].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Одним із головних параметрів якості циліндричних (зовнішніх і внутрішніх) поверхонь гідроциліндрів є точність їх форми у поперечних перерізах, яка визначається таким параметром як відхилення від круглості. Нормування відхилень від круглості регламентовано відповідними стандартами, наприклад ГОСТ 24642-81, і полягає в обмеженні їх допусками. Відхилення від круглості визначаються як максимальні відхилення реальних профілів від вписаного у круглограму кола для внутрішніх циліндричних поверхонь і описаного кола навколо круглограми – для зовнішніх циліндричних поверхонь [5]. Таке подання точності форми з точки зору інформативності є недостатнім і не може бути використано для виявлення і аналізу причини, які впливають на точність форми поперечних перерізів циліндричних поверхонь. Більш прогресивним у дослідженні точності форм поперечних перерізів циліндричних поверхонь є використання методу апроксимації відхилень радіуса-вектора реального профілю від номінального на проміжку  $[0, 2\pi]$ , як випадкової величини, тригонометричним рядом Фур'є [3]. Для оцінки точності форми циліндричних поверхонь використовують також метод Спрега [5], за яким відхилення від круглості приймають як відхилення радіуса-вектора реального профілю від усередненого номінального профілю. Основним недоліком цього методу є те, що перша гармоніка тригонометричного ряду Фур'є у спектрі гармонік відсутня, а величину ексцентриситету визначають як віддаль між двома центрами двох систем координат. Окрім цього при визначенні дисперсії розсіювання відхилень від круглості апроксимацією тригонометричним рядом Фур'є не враховується амплітуда першої гармоніки, що вносить значну похибку у значення дисперсії.

**Постановка завдання.** Метою завдання є аналіз відхилень від круглості аналіз відхилень від круглості внутрішньої циліндричної поверхні гідроциліндра при його виготовленні. Цей аналіз включає кілька етапів: аналіз величини відхилень від круглості; побудова полігонів розсіювання відхилень від круглості (визначення законів розподілу) та визначення амплітуд гармонік відхилень від круглості. Побудова полігонів розсіювання дозволить зробити висновок про стабільність технологічного процесу, а розподіл амплітуд гармонік відхилень від круглості – про тип відхилення та природу його походження.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 наведено типову конструкцію плунжерного гідроциліндра виробництва Дрогобицького заводу автомобільних кранів (ДЗАК). Об'єктом досліджень був гідроциліндр КС-4574.63.900 телескопування (випускання) стріли автомобільного крана КТА-25 (рис. 1).

До поверхні гільзи гідроциліндра, ставляться високі вимоги по точності форми, а саме – відхилень від прямолінійності в повздовжньому та відхилень від круглості в поперечному перерізі. Такі вимоги до гідроциліндрів обумовлені тим, що їх експлуатація не

допускає перетікання робочої рідини з однієї порожнини в іншу. Технічні вимоги до гідроциліндрів регламентуються ДСТУ 2351-94 (ГОСТ 30074-93).

При виготовленні гільзи циліндра необхідно забезпечити виготовлення внутрішнього отвору гільзи циліндра піднімання стріли автокрана в розмір  $\text{Ø}100\text{H}9$  з шорсткістю поверхні  $Ra=0,32$  мкм, точність внутрішнього діаметра гільзи по 5, 6 квалітету, овальність конусність в межах 0,01мм.



Рисунок 1 – Гідроциліндр плунжерний КС-4574.63.900 телескопування стріли автомобільного крана КТА-25

Джерело: на підставі [1]

Заготовками для гідроциліндрів є безшовні холодно-тягнуті труби хонінговано або поліровані у відповідності до ISO H8, а також зварні холодно-тягнуті труби, оброблені по внутрішньому діаметру у відповідності до ISO H9 або ISO H10. Для виготовлення гідроциліндрів використовують сталі марок: St 52, St 52.3, St E 460 згідно DIN 2393-1994 та DIN 17102 виготовлені в Німеччині. Аналогами для матеріалу St 52 та St 52.3 в Україні є сталі 17Г1С та, 17ГС, а для сталі, St E 460 – 18Г2АФпс.

Режими оброблення внутрішньої циліндричної поверхні гільзи циліндра представлено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Режими обробки гільзи гідроциліндра КС-4574.63.900-05 телескопування стріли крана КТА-25

№ п/п	Операції механічної обробки	Діаметр $D$ , мм	Довжина $L$ , мм	Припуск, $z$ , мм	Подача $S_m$ , мм/хв	К-ть об $n$ , об/хв	Швидкість $V$ , м/хв
1	Чорнове розточування	99,5	6765	5,25	50	200	62,5
2	Напівчистове розточування	99,96	6765	0,23	160	400	78,5
3	Чистове розточування	100	6765	0,02	60	200	62,8

Методика проведення дослідження була наступною. Для отримання статистично достовірних результатів значень відхилень від круглості поперечних перерізів внутрішніх циліндричних поверхонь та їх статистичних характеристик (дисперсії, середнього арифметичного відхилення, середнього квадратичного відхилення та максимальних значень) було вирішено провести вимірювання відхилень від круглості

на п'яти трасах, що дозволило отримати по п'ять круглограм для кожної технологічної операції. Мала кількість трас вимірювання нівелюється використанням теорії малої вибірки та спеціально розробленим програмним забезпеченням для визначення статистичних характеристик розсіювання відхилень від круглості [3].

Таблиця 2 – Значення відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь гільз гідроциліндрів після виконання кожної технологічної операції

№ полож.	Відхилення після чорнової обробки $\Delta_{чорн.}$ , МКМ	Відхилення після напівчистої обробки $\Delta_{напівчист.}$ , МКМ	Відхилення після чистої обробки $\Delta_{чист.}$ , МКМ
0	42,48	36,26	12,5
1	43,32	35,38	9,26
2	35,3	32,56	10,02
3	24,88	19,16	12,22
4	24,72	6,22	12,7
5	14,1	2	2,66
6	5,88	4,5	6,34
7	1,98	5,66	9,34
8	1,84	0	4,2
9	7,84	5,78	7,1
10	10,62	8,8	19,78
11	14,44	9,5	18,34
12	9,92	14,32	12,84
13	7,94	11,42	8,22
14	2,9	6,54	13,2
15	5,94	2,96	8,76
16	8	3,78	9,72
17	6,68	6,08	4,64
18	1,66	11,5	1,88
19	1,04	7,9	7,1
20	4,34	2,76	15,56
21	3,72	4,56	13,52
22	6,78	2,64	14,98
23	4,88	3,26	24,66
24	2,38	5,16	28,16
25	2,08	9,74	22,74
26	1,86	6,96	26,16
27	2,26	3,48	14,42
28	6,88	2,34	4,68
29	8,4	4,22	1,36
30	6,14	0,5	5,74
31	7,46	5,54	5,82
32	12,04	16,14	2,86
33	20,62	31,3	6,5
34	34,94	33,94	8,44
35	35,02	32,28	17,26

Джерело: розроблено на підставі [3]

Усереднені розгортки круглограм відхилень від круглості внутрішніх циліндричних поверхонь гільз циліндрів, отримані після виконання кожної технологічної операції представлено на рис. 2.

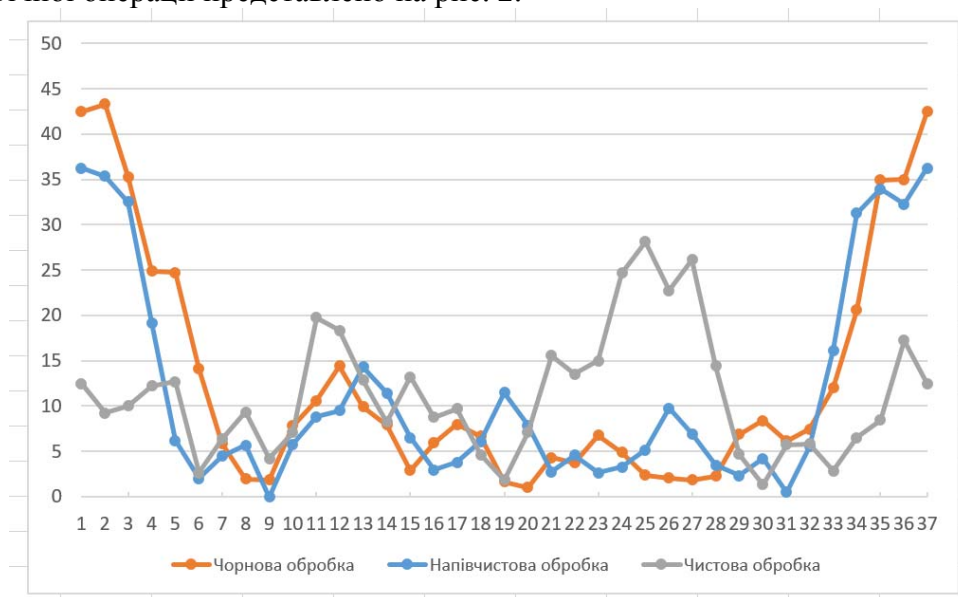


Рисунок 2 – Усереднені розгортки круглограм внутрішніх циліндричних поверхонь гільз гідроциліндрів отримані після виконання кожної технологічної операції

Джерело: розроблено авторами

Для отриманих значень відхилень від круглості визначаємо середнє арифметичне відхилення за формулою

$$\bar{\Delta} = \sum_{i=1}^{36} \Delta_i . \quad (1)$$

Отримані значення для різних видів обробки заносимо в таблицю 2.

Для отриманих значень відхилень визначаємо дисперсію за формулою:

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{36} (\Delta_i - \bar{\Delta}_i)^2}{n} , \quad (2)$$

де  $n$  – кількість виміряних відхилень,  $n = 36$ .

Отримані значення для різних видів обробки заносимо в таблицю 3.

Таблиця 3 – Статистичні характеристики відхилення від круглості  $\Delta$  внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра

№ п/п	Операції механічної обробки	Середнє значення $\bar{\Delta}_i$ , мкм	Дисперсія $D$ , мкм <sup>2</sup>	Середнє квадратичне відхилення $\sigma$ , мкм
1	Чорнове розточування	11.98	150,89	12,28
2	Напівчистове розточування	10.97	122,91	11,08
3	Чистове розточування	11.2	47,99	6,92

Визначаємо середнє квадратичне відхилення для отриманих значень відхилень

$$\sigma = \sqrt{D} , \quad (3)$$

Побудова полігону розсіювання відхилень від круглості допоможе оцінити стабільність розподілу відхилень у поперечному січенні в діапазоні від 0 до 360°. а також частково відобразить закон розподілу відхилень від круглості поперечних перерізів циліндричних поверхонь. Суть методу полягає у поділі діапазону значень між максимальним та мінімальним відхиленням на рівну кількість інтервалів та виявленні розподілу відхилень між цими інтервалами [5]. На відміну від нормального закону розподілу, при оцінюванні відхилень від круглості, рівномірність розподілу відхилень між інтервалами свідчить про нестабільність забезпечення точності технологічної операції. Чим більше відхилень потрапляють в один найменший діапазон значень тим вищу точність забезпечує виконання технологічної операції.

Будуємо полігон розсіювання

Визначаємо розмах  $R$  інтервалу за формулою

$$R = \Delta_{\max} - \Delta_{\min} . \quad (1)$$

Кількість інтервалів визначаємо за формулою:

$$n = 1 + 3.322 \cdot \log N . \quad (2)$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою

$$h = (\Delta_{\max} - \Delta_{\min}) / n . \quad (3)$$

Будуємо полігон розсіювання для деталі після чорнової обробки.

Для нашого випадку всі круглограми після чорнової, напівчистої і чистої обробки поділені на 36 частин, тому кількість інтервалів буде рівна  $n = 1 + 3.322 \cdot \log 36 = 6,17$ . Приймаємо 6 інтервалів.

Визначаємо розмах інтервалу розсіювання для чорнової обробки за формулою (1)

$$\Delta_{\max} = 43,32 , \Delta_{\min} = 1,04 .$$

$$R = 43,32 - 1,04 = 42,28$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою (3)

$$h = (43,32 - 1,04) / 6 = 7,046 .$$

Будуємо полігон розсіювання (рис.3).

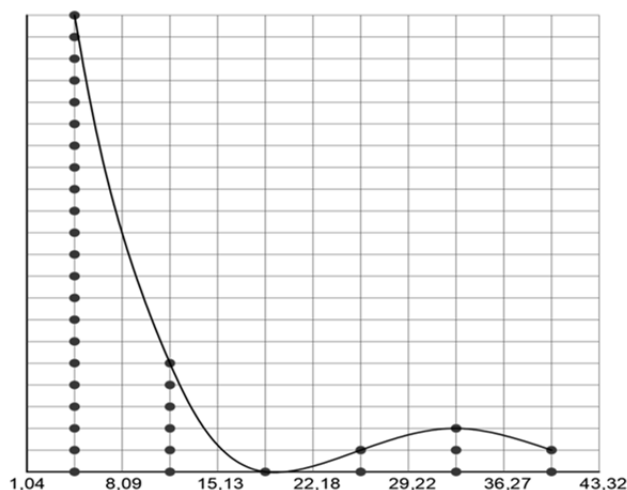


Рисунок 3 – Полігон розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра після чорнової обробки

Джерело: розроблено авторами

Визначаємо розмах інтервалу розсіювання за формулою (1)

$$\Delta_{\max} = 36,26, \Delta_{\min} = 0.$$

$$R = 36,26 - 0 = 36,26$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою (3)

$$h = (36,26 - 0) / 6 = 6,043.$$

Будуємо полігон розсіювання (рис.4).

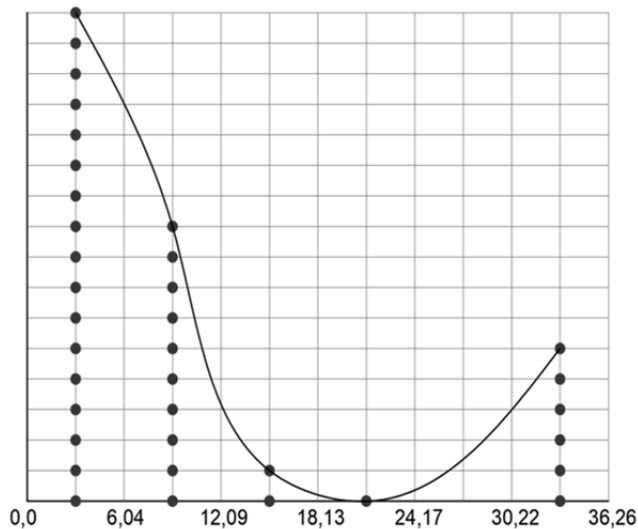


Рисунок 4 - Полігон розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра після напівчистої обробки

*Джерело: розроблено авторами.*

Будуємо полігон розсіювання для поверхні після чистої обробки.

$$\Delta_{\max} = 28,16, \Delta_{\min} = 1,36.$$

$$R = 28,16 - 1,36 = 26,8$$

Крок інтервалу визначаємо за формулою (3)

$$h = (28,16 - 1,36) / 6 = 4,466.$$

Будуємо полігон розсіювання (рис.5).

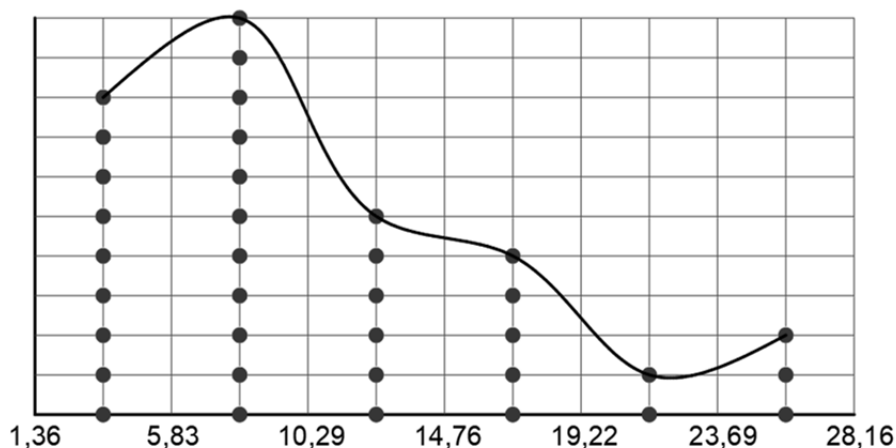


Рисунок 5 - Полігон розсіювання відхилень від круглості поверхні гільзи циліндра після чистої обробки

*Джерело: розроблено авторами.*

Як видно з рис. 3 більшість відхилень потрапила у перший діапазон, що свідчить про відмінну забезпеченість точності для цієї операції. Однак наявність кількох високих значень відхилень від круглості свідчить про те, що технологічне обладнання має виробничий чи експлуатаційний дефект у вигляді радіального биття. Аналогічна ситуація спостерігається і після виконання операції напівчистового розточування.

Для отримання гармонік круглограм відхилень від круглості використано математичний апарат та відповідне програмне забезпечення для його реалізації, яке представлено в роботі [3]. При проведенні даного дослідження ми обмежились першими десятима гармоніками, що достатньо для відхилень від круглості поперечних перерізів циліндричних поверхонь.

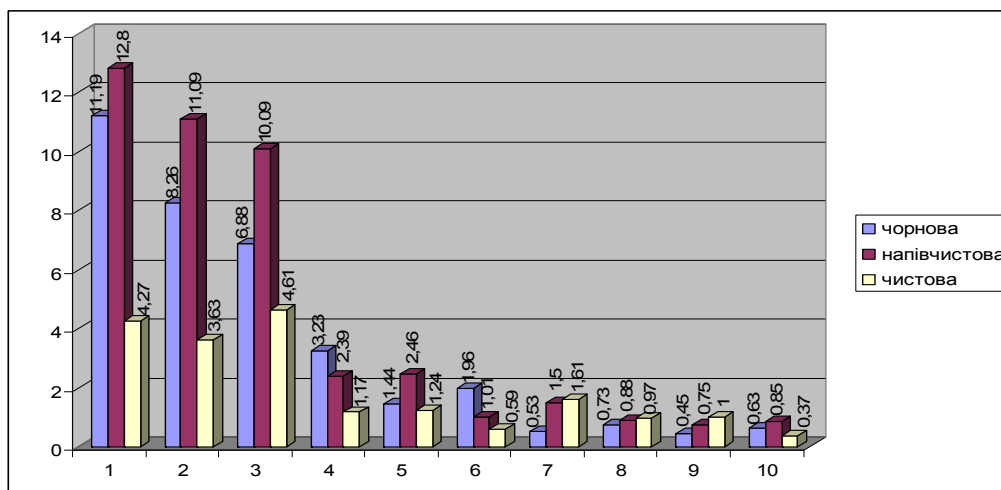


Рисунок 6 - Розподіл амплітуд гармонік відхилень від круглості поперечних перерізів внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра при виконанні технологічних операцій

Джерело: розроблено авторами

Як видно з рис. 6 після виконання чорнового та напівчистового розточування в розподілі амплітуд гармонік відхилень від круглості переважає перша гармоніка. Це свідчить про те, що при виконанні операцій лезового оброблення на верстаті має місце радіальне биття шпинделя. Наслідком цього є сформована ексцентричність обробленої поверхні. Після виконання фінішної операції – чистового розкатування в розподілі амплітуд гармонік відхилень від круглості починає переважати третя гармоніка.

**Висновки:** 1. Під час виконання операцій технологічного процесу виготовлення гільзи гідроциліндра точність форми його внутрішньої циліндричної поверхні змінюється, причому форма відхилень від круглості зберігається після виконання перших двох операцій. Це свідчить про наявність явища технологічної спадковості.

2. Величина відхилень від круглості після виконання операції напівчистового розточування суттєво не зменшується при збереженій формі відхилення, що свідчить про її неефективність з точки зору впливу на точність форми поперечних перерізів при обробленні внутрішньої циліндричної поверхні гільзи гідроциліндра.

## Список літератури

1. Офіційний сайт Дрогобицького заводу автомобільних кранів. URL: <http://www.dak.com.ua/uk> (дата звернення: 29.11.2024).
2. Dzyura V., Maruschak, P., Kuchvara I., Tkachenko I. *Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies*. *Strojnícky časopis-Journal of Mechanical Engineering*, 2021. VOL 71 (2021), NO 1. С. 41 – 50. eISSN 2450-5471.

3. Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., Krupa V.V. *Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces*. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 2014. P. 9–13. ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946.
4. *Наукові основи забезпечення параметрів якості робочих поверхонь тіл обертання технологічними методами* : дис... докт. техн. наук: 05.02.08 / Дзюра Володимир Олексійович ; НУ «Львівська політехніка». Л., 2021. 413 с.
5. В.О. Дзюра, П.О. Марущак, В.О. Семененко, В.В. Головка, В.Я. Федів. Обґрунтування параметрів регулярних мікрорельєфів сформованих на плоских поверхнях. *Центральноукраїнський науковий вісник*. 2023. Вип. 8(39), ч. I. С.37-47. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.37-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.37-47).

## References

1. Drohobych Automotive Cranes Plant. (n.d.). *Official website of Drohobych Automotive Cranes Plant*. Retrieved November 29, 2024, from <http://www.dak.com.ua/uk>
2. Dzyura V., Maruschak, P., Kuchvara I., & Tkachenko I. (2021). *Ensuring a stable relative area of burnishing of partially regular microrelief formed on end surfaces of rotary bodies*. *Strojnícky časopis - Journal of Mechanical Engineering*. VOL 71, NO 1. P. 41 – 50. eISSN 2450-5471.
3. Dzyura V.O., Kryvyi P.D., Tymoshenko N.M., & Krupa V.V. (2014). *Technological heredity and accuracy of the cross-section shapes of the hydro-cylinder cylindrical surfaces*. Volume 2: Processing, Detroit, Michigan, USA, June 9–13, ISBN: 978-0-7918-4581-3. DOI: 10.1115/MSEC2014-3946.
4. *Scientific bases of ensuring the quality parameters of the working surfaces of the bodies of rotation by technological methods*: dis... doc. technical Sciences: 05.02.08 / Dzyura Volodymyr Oleksiyovych; NU "Lviv Polytechnic". L., 2021. 413 p. [in Ukrainian].
5. Dzyura V., Maruschak, P., Semehen V., Golovko V., & Fediv V. (2023) Justification of the parameters of regular microreliefs formed on flat surfaces. *Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences*. Vol. 8(39), I. P. 37-47. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8\(39\).1.37-47](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2023.8(39).1.37-47). [in Ukrainian].

**Volodymyr Dzyura**, Prof., DSc., **Taras Dzhvyak**, post-graduate, **Vasyl Fediv**, post-graduate  
*Ternopil National Technical University named after Ivan Pulyu, Ternopil, Ukraine*  
**Ihor Chvartazkuy**, Assoc. Prof., Ph.D.  
*Berezhany Agrotechnical Institute, Berezhany, Ukraine*

### **Transformation of Deviations from the Roundness of the Inner Cylindrical Surface of the Hydraulic Cylinder During Its Manufacture**

The article presents the results of determining the accuracy of the shape of the cross-section and obtained numerical values of the statistical characteristics of dispersion of deviations from the roundness of the surface of the cylinder sleeve of the telescoping boom of the KTA-25 automobile crane after each technological operation of its processing.

The impact of technological operations on the amount of deviation from roundness and the prevailing harmonics, which indicate the type of shape deviation, is determined. Moreover, the form of deviations from roundness is preserved after the first two operations. This indicates the presence of the phenomenon of technological heredity. Polygons for scattering deviations from roundness were built for deviations from roundness after each technological operation. It was established that the technological operation of semi-clean boring does not significantly change either the size or the shape of the deviation from the roundness of the inner cylindrical surface of the hydraulic cylinder sleeve.

The shape of the deviation from roundness will help to establish the defect of the machine tool and prevent the formation of detected deviations from the roundness of the processed surfaces. After performing rough and semi-finish boring, the first harmonic prevails in the distribution of amplitudes of harmonics of deviations from roundness. This indicates that during blade processing operations on the machine tool, radial beating of the spindle takes place.

The consequence of this is the formed eccentricity of the treated surface. After performing the finishing operation - final rolling, the third harmonic begins to prevail in the amplitude distribution of harmonics of deviations from roundness. It was established that the amount of deviations from roundness after the semi-clean boring operation does not significantly decrease with the shape of the deviation preserved, which indicates its ineffectiveness in terms of influence on the accuracy of the shape of the cross-sections when processing the inner cylindrical surface of the hydraulic cylinder sleeve.

**deviation from roundness, accuracy of form, harmonics, dispersion shoulder, inner cylindrical surface**

*Одержано (Received) 17.10.2024*

*Прорецензовано (Reviewed) 22.10.2024*