

УДК 621.923.6:621.318.4:621.002.3

А.П. Гавриш, П.О. Киричок, Т.А. Роїк, Ю.Ю. Віцюк

### АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХОНЬ ПІДШИПНИКІВ КОВЗАННЯ З КОМПОЗИЦІЙНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ДРУКАРСЬКИХ МАШИН ПРИ АБРАЗИВНОМУ ШЛІФУВАННІ

In the article we present the research results of defect layers formation on surfaces of sliding bearings made of new high-alloy composite alloys produced from tool steels wastes and intended for high-speed printing machines. We show that such quality parameters of surfaces like cold-work strengthening, depth of its bedding, and range of cold-work strengthening and distortions of the 2-nd type are formed as a result of interaction between force and temperature fields appearing on the top of abrasive grain at fine abrasive grinding of friction surfaces of sliding bearings. We prove that final quality of surfaces depends on interaction of simultaneously arising processes of strengthening and tempering of working surfaces of sliding bearings at abrasive grinding. Moreover, we define the dependence of range of cold-work strengthening, its depth and distortions of the 2-nd type from composition of abrasive tool, its graininess, bond type of abrasive disc, parameters of grinding: using lubricating and cooling liquid, depth of grinding, rotation speed of the disc and line feed. We make the recommendation on how to choose grinding tools and cutting parameters for industrial purposes which meet the demands to quality of friction surfaces of high-speed bearings for rotary printing machines.

#### Вступ

Розвиток сучасної техніки вимагає забезпечення високих параметрів надійності, працездатності та зносостійкості друкарських машин, їх вузлів і деталей у широкому спектрі умов експлуатації від нормальних до екстремальних (швидкість обертання до 800 об/хв, тиск 3–8 МПа). Одним із поширених видів деталей, що експлуатуються у зазначених умовах, є підшипники ковзання високошвидкісних машин поліграфічної техніки, зокрема ротаційних апаратів типу КВА “Rapida-105”, деталей вузлів тертя газоперекачувальних станцій, компресорів магістральних газогонів тощо.

Створення нових композиційних підшипникових матеріалів для важких умов експлуатації [1–3] з широким використанням як основи для них утилізованих і регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей переконливо довело наявність стабільно високих триботехнічних властивостей цих композитів [4].

Відомості про технологічні засади виготовлення та прецизійної механічної обробки нових композитних підшипників детально наведені у працях [2, 3, 5]. Цими дослідженнями було доведено, що на строки служби підшипників ковзання з нових композитів впливають показники якості поверхонь оброблення, а саме параметри шорсткості поверхонь  $R_a$  і властивості поверхневого шару, з якого абразивним інструментом здійснюється зрізання тонких стружок. З цієї точки зору ставились задачі досягнення характеристик мінімальної шорсткості  $R_a$  поверх-

онь оброблення, яка є передумовою високих функціональних властивостей підшипників. З цією метою були створені технологічні процеси, де фінішна абразивна обробка здійснювалась із застосуванням методів магнітно-абразивного оброблення [5, 6].

На жаль, досліджень одного з найважливіших параметрів якості обробленої поверхні, яким є фізичні властивості тонкого поверхневого шару, а саме знак і рівень залишкових напружень у зоні оброблення, глибини й ступеня наклепу, практично немає.

Вказані обставини зумовили необхідність детального вивчення властивостей тонкого поверхневого шару після абразивної обробки робочих поверхонь нових підшипників ковзання для друкарських машин. Виконання дослідів у цьому напрямі дає можливість науково обґрунтовано підходити до створення технології тонкого абразивного шліфування, а відтак призначати (залежно від складу того чи іншого композитного матеріалу) оптимальні режими різання.

#### Постановка задачі

Метою досліджень є встановлення науково обґрунтованих режимів тонкого абразивного шліфування робочих поверхонь підшипників ковзання з нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих і регенованих шліфувальних відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС і 5ХЗВЗМФС. Ці режими різання мають забезпечити відповідні параметри якості прошліфованих поверхонь і не-

обхідний рівень експлуатаційних властивостей вузлів тертя високообертового друкарського обладнання.

### Матеріали і результати досліджень

Методика вивчення фізичних властивостей поверхневого шару зразків наведена у працях [2, 3, 5, 7]. Слід підкреслити, що у всіх експериментах використовувались зразки з нових композитних матеріалів 86Х6НФТ + 5 %CaF<sub>2</sub>, 4ХМНФС + 5 %CaF<sub>2</sub> і 5ХЗВЗМФС + 5 %CaF<sub>2</sub> [1, 8].

Зазначимо, що фізичні властивості поверхневого шару деталей із нових композитів, а са-

ме – глибина та ступінь наклепу, спотворення 2-го роду, знак і величина залишкових напружень, цілковито залежать від взаємодії силового та температурного полів [9].

Було враховано попередньо отримані авторами результати досліджень сил та миттєвих контактних температур [9], що виникають і одночасно діють на вершині абразивного зерна шліфувального круга при зрізанні тонких стружок із поверхні оброблення. При цьому сили різання спричиняють зміцнення тонкого поверхневого шару, в той час як миттєві контактні температури сприяють відпочинку зміцненої від дії сил різання поверхні. Як наслідок, формуються кінцеві значення параметрів якості поверхні оброблення. У праці [7] було спрогнозовано, що при раціональному підборі режимів шліфування у майбутньому можливо буде виконувати обробку так, що відпочинок поверхневого шару від дії температур буде здатен повністю усунути зміцнення від сил різання.

Отже, технологічні дослідження впливу режимів різання при тонкому абразивному шліфуванні на фізичні властивості поверхневого шару деталей із нових композитів є актуальними, а отримані результати дадуть змогу створити умови, коли призначення відповідних режимів різання уможливить максимальне збереження вихідних властивостей матеріалу, з якого виготовлено деталі тертя. Це своєю чергою забезпечить відповідне зменшення зносу при терті поверхонь підшипників ковзання та значно підвищить строк служби деталі та друкарської машини в цілому, зокрема апарата КВА "Rapida-105".

Результати експериментальних досліджень параметрів зміцнення поверхневого шару при тонкому абразивному шліфуванні зразків з нових підшипникових матеріалів наведені у табл. 1–5 ( $\Delta a/a$  – спотворення 2-го роду,  $H_d$  – мікротвердість деталі за Вікерсом,  $H_z$  – мікротвердість зразка за Вікерсом,  $K$  – ступінь на-

**Таблиця 1.** Залежність наклепу від матеріалу зв'язки круга при шліфуванні зразків зі сплаву 6Х6НФТ + 5 %CaF<sub>2</sub>

Абразивний інструмент	Зернистість, мкм	Зв'язка інструменту	Параметри наклепу		
			$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$H_d$ , МПа	$K$
23А5К	50	Керамічна	23,74	5500	1,52
23А5Гл	50	Гліфталева	20,50	5430	1,51
63С5К	50	Керамічна	19,39	5430	1,51
63С5Гл	50	Гліфталева	17,94	5380	1,49
63СМ28К	28	Керамічна	16,71	5570	1,54
63СМ28Гл	28	Гліфталева	13,71	4120	1,17
63СМ14К	14	Керамічна	14,28	4190	1,19
63СМ14Гл	14	Гліфталева	13,30	4170	1,15

**Таблиця 2.** Залежність наклепу від матеріалу зерна при шліфуванні зразків зі сплаву 6Х6НФТ + 5 %CaF<sub>2</sub> крупнозернистими абразивами

Абразивний інструмент	Зернистість, мкм	Параметри наклепу			Охолодження при обробці
		$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$H_d$ , МПа	$K$	
63С10Гл	100	21,30	5490	1,52	Емульсія
23А10Гл	100	23,70	5700	1,58	Емульсія
63С5Гл	50	17,94	5380	1,49	Емульсія
23А5Гл	50	19,25	5290	1,46	Без охолодження
М5К	50	20,50	5600	1,55	Емульсія
М5Гл	50	20,35	5430	1,51	Без охолодження

**Таблиця 3.** Залежність наклепу від матеріалу зерна при шліфуванні зразків зі сплаву 86Х6НФТ + 5 %CaF<sub>2</sub> дрібнозернистими абразивами зернистістю 28 мкм

Абразивний інструмент	Параметри наклепу			Охолодження при обробці
	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$H_z$ , МПа	$K$	
63СМ28Гл	13,71	4230	1,17	Емульсія
63СМ28Гл	15,63	4120	1,14	Без охолодження
23АМ28Гл	16,90	4250	1,18	Емульсія
23АМ28Гл	15,75	4230	1,17	Без охолодження
ММ28Гл	18,40	4190	1,16	Емульсія
ММ28Гл	16,50	4170	1,15	Без охолодження

**Таблиця 4.** Залежність ступеня наклепу  $K$  від зернистості при шліфуванні зразків з досліджуваних композитних сплавів абразивами з карбїду кремнію зеленого (63С) на гліфталевій зв'язці

Абразивний інструмент	Зернистість, мкм	Матеріал композитних зразків		
		86Х6НФТ + 5 %CaF <sub>2</sub>	4ХМНФС + 5 %CaF <sub>2</sub>	5Х3В3МФС + 5 %CaF <sub>2</sub>
		Ступінь наклепу $K$		
63С10Гл	100	1,95	1,87	1,86
63С5Гл	50	1,52	1,46	1,47
63СМ28Гл	28	1,17	1,15	1,17
63СМ20Гл	20	1,16	1,14	1,15
63СМ14Гл	14	1,15	1,13	1,12
63СМ7Гл	7	1,13	1,11	1,11

**Таблиця 5.** Параметри наклепу на різних рівнях наклепаної зони при абразивному шліфуванні зразків з композитного сплаву 86Х6НФТ + 5 %CaF<sub>2</sub>

Вид обробки, тип круга	Глибина шару вимірювання, мкм							
	5		10		15		20	
	Параметри наклепу							
	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$K$	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$K$	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$K$	$\Delta a/a \cdot 10^{-4}$	$K$
Без охолодження, 23А5Гл	23,74	1,52	22,30	1,50	7,01	1,01	1,27	0,50
З охолодженням, 63С5Гл	17,94	1,49	16,97	1,48	6,90	1,00	1,17	0,40
З охолодженням, 63СМ28Гл	13,71	1,17	13,55	1,16	6,90	0,91	2,11	0,30
Без охолодження, 63СМ28Гл	13,33	1,16	12,31	1,14	5,91	0,63	2,01	0,28
Без охолодження, ММ28Гл	13,30	1,15	12,50	1,12	6,10	0,65	3,10	0,31
З охолодженням, 23АМ28Гл	16,90	1,18	14,30	1,15	6,15	0,70	3,50	0,40
Без охолодження, 23АМ28Гл	15,75	1,17	13,10	1,14	5,13	0,50	2,70	0,30
З охолодженням, 63СМ14Гл	13,30	1,15	12,10	1,12	5,17	0,51	2,80	0,32
Без охолодження, 63СМ14Гл	12,90	1,14	10,90	1,11	3,51	0,37	1,65	0,33
З охолодженням, 63СМ7Гл	11,70	1,13	10,40	1,10	2,53	0,39	1,93	0,35

клепу ( $H_d/H_z$ ). Режими шліфування: однопрохідне плоске з виходжуванням, верстат FF-250 "Abawerk" (ФРН), швидкість круга  $V_{кр} = 22$  м/с, швидкість виробу  $V_v = 2$  м/хв, глибина різання  $t = 2$  мкм, охолодження – 3 %-ний розчин содової емульсії. Показники наклепу зразків без обробки:  $\Delta a/a \cdot 10^{-4} = 0$ ,  $H_z = 3600$  МПа. Шліфувальні круги: електрокорунд білий (23А), карбїд кремнію зелений (63С), монокорунд (М).

При визначенні залежностей утворення наклепу при тонкому шліфуванні деталей з нових композитних матеріалів виявлено такі закономірності: обробка абразивами на гліфталевій зв'язці забезпечує менший наклеп, ніж обробка на керамічній зв'язці – спотворення 2-го роду, мікротвердість і ступінь наклепу більші при застосуванні шліфувальних інструментів на керамічній зв'язці. Це є характерним для всіх досліджуваних складів композиційних сплавів, синтезованих із відходів інструментальних сталей. Також слід відзначити схожість цієї за-

лежності при застосуванні як крупнозернистих, так і дрібнозернистих шліфувальних інструментів. Пояснити це можна властивостями гліфталевої зв'язки, а саме її меншою жорсткістю, більшою еластичністю порівняно з керамічною зв'язкою. Внаслідок цього під час зрізання стружки з поверхні досліджуваного зразка на ріжучому лезі абразивного зерна утворюється відповідна сила різання, яка залежить від технологічних режимів різання [9]. Ця сила деформує шар матеріалу і зумовлює утворення у ньому різних дефектів (наклепу, спотворень 2-го роду, залишкових напружень). При цьому саме завдяки еластичності гліфталевої зв'язки сили різання перерозподіляються і демпфірують ріжуче зерно в тіло абразивного круга. Це зменшує фактичну глибину шліфування і, відповідно, складові сил шліфування, які своєю чергою зумовлюють зменшення параметрів наклепу [9].

При тонкому абразивному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів було виявлено залежність параметрів наклепу від

матеріалу зерна абразиву, на основі якого формується шліфувальний інструмент.

Експериментально доведено, що мінімальні спотворення 2-го роду, мікротвердість, ступінь наклепу та глибина залягання дефектів за товщиною поверхневого шару забезпечують застосування шліфувальних кругів на основі карбіду кремнію зеленого (63С).

Найбільш чітко це проявляється при тонкому абразивному шліфуванні крупнозернистими абразивами (табл. 2), хоча така ж залежність існує і для випадку шліфування дрібнозернистими кругами (табл. 3).

Узагальнюючи всю сукупність експериментальних даних як для крупнозернистих, так і для дрібнозернистих абразивних інструментів, необхідно зробити загальний висновок про зменшення наклепу при тонкому шліфуванні абразивними кругами на основі карбіду кремнію зеленого (63С). Зменшення наклепу можна пояснити більш гострою формою ріжучого леза кожного окремого зерна абразиву та більшою крихкістю зерен карбіду кремнію зеленого, здатних при шліфуванні сприймати та передавати деформованим мікрооб'ємам металу (в процесі зрізання стружки) менші навантаження, ніж зерна електрокорунду білого (23А) і монокорунду (М). Ці висновки повністю збігаються з висновками, що отримані при дослідженні силового поля при тонкому абразивному шліфуванні нових композитних сплавів [9], зокрема щодо значень питомих складових сил шліфування ( $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$ ), які припадають на кожне поодинокі ріжуче зерно, що міститься в шарі оброблення і зрізує тонку стружку з перерізом  $a_z$ .

Аналіз даних табл. 4, 5 показує, що існує фактичний зв'язок між параметрами наклепу та зернистістю абразивного інструмента. Незалежно від виду абразивного інструмента зі зменшенням його зернистості (у діапазоні 7–100 мкм) параметри наклепу зменшуються. Мінімальний наклеп забезпечує шліфування кругами зернистістю 14 мкм з карбіду кремнію зеленого (63С) на гліфталевій зв'язці (Гл) – типу 63СМ14Гл. Підвищення ступеня наклепу зі збільшенням розміру зерна пояснюється істотним збільшенням силової дії на мікрооб'єм металу [9], у зв'язку з чим зростає ступінь пластичної деформації.

Необхідно зазначити, що отримані висновки про закономірності утворення наклепу підтверджуються різними фізичними методами вимірювання (рентгеноструктурним аналізом, ме-

талографією, індукційним зондуванням поверхні оброблення) [7, 8]. Це свідчить про наявність внутрішнього зв'язку між різними параметрами наклепу та підтверджує достовірність результатів досліджень.

У роботі не ставилась задача отримання кореляційних моделей зв'язку між різними досліджуваними параметрами. Проте слід звернути увагу на те, що в більшості випадків параметри наклепу менші при шліфуванні без охолодження змащувально-охолоджувальною рідиною, ніж при різанні з охолодженням. Це пояснюється більшим впливом миттєвих контактних температур при зрізанні стружки і відпочинком металу після дії силового поля [9]. Але питання застосування охолоджувальної рідини при тонкому шліфуванні нових композиційних сплавів має вирішуватись у комплексному поєднанні з призначенням режимів різання, які також повинні забезпечити мінімальну шорсткість поверхні оброблення нових високошвидкісних підшипників [8], що є важливим показником якості й істотно впливає на параметри зношування при їх роботі і довговічності відповідних вузлів, зокрема ротаційних поліграфічних машин типу КВА "Rapida-105".

Аналіз табл. 5 показує, що глибина наклепаної зони залежить від зернистості інструмента, зменшуючись від 20 мкм (при розмірі зерна 50–55 мкм) до 5 мкм (при розмірі зерна 7–14 мкм).

Отже, на основі наведених експериментальних досліджень можна дійти висновку, що при тонкому абразивному шліфуванні нових композитних сплавів відбуваються складні процеси зміцнення та відпочинку тонкого шару поверхонь тертя нових підшипників ковзання, які впливають на показники стійкості та довговічності. Знання закономірностей утворення наклепу дає можливість технологам промислових підприємств створювати технологічні процеси, які враховують вплив складу абразивного інструмента на параметри якості деталей підшипників ковзання та інших деталей тертя друкерських машин і механізмів. Це дає змогу оптимізувати режими різання, створювати реальні технологічні процеси для виробництва.

## Висновки

Вперше досліджено питання абразивного оброблення нових композиційних сплавів, синтезованих на основі утилізованих та регенованих шліфувальних відходів інструментальних

сталей з точки зору формування у поверхневих шарах прошліфованих поверхонь параметрів якості з мінімізацією спотворень вихідних властивостей металу внаслідок дії силового та температурного полів.

Показано, що на параметри наклепу поверхневого шару істотно впливають матеріал зерна абразиву, зернистість шліфувального круга та тип зв'язки абразивного інструмента, а також такий технологічний фактор, як застосування для оброблення змащувально-охолоджувальної рідини.

Найкращі показники параметрів наклепу, а саме мінімальні спотворення 2-го роду, мінімальні мікротвердість і ступінь наклепу, а також мінімальну глибину утворення наклепу в шарі поверхні оброблення деталі, забезпечують абразивні інструменти з карбіду кремнію зеленого (63С) зернистістю 14–20 мкм на гліфталевій зв'язці.

Для забезпечення необхідних параметрів якості поверхневого шару (параметри наклепу,

шорсткість поверхні оброблення) абразивне шліфування підшипників з нових композиційних матеріалів необхідно виконувати із застосуванням тонких режимів різання, а саме для плоского однопрохідного шліфування периферією круга: швидкість круга – 22 м/с, швидкість виробу (поздовжня подача) – 2 м/хв, глибина різання – 2 мкм, охолодження – 3 %-ний розчин содової емульсії.

Подальші дослідження процесу тонкого абразивного шліфування нових композитних деталей будуть спрямовані на всебічне вивчення характеру залишкових напружень у поверхневому шарі оброблення, зокрема величини напружень, їх знаку (розтягу чи стиску) та глибини залягання. Це дасть можливість виконати комплексний аналіз властивостей поверхні деталі з урахуванням вимог подальшого підвищення строків служби деталей тертя та друкарських машин у цілому.

1. Підшипниковий композиційний матеріал на основі інструментальної сталі: Патент України № 60522, МПК С22С33/02 (2006.01) / Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, П.О. Киричок та ін. – Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
2. Роїк Т.А., Киричок П.О., Гавриш А.П. Композиційні підшипникові матеріали для підвищених умов експлуатації: Монографія. – К.: НТУУ “КПІ”, 2007. – 404 с.
3. Роїк Т.А., Гавриш А.П., Гавриш О.А. Сучасні системи технологій заготівельного виробництва в машинобудуванні: Монографія. – К.: ЕКМО, 2010. – 212 с.
4. Вибір режимів експлуатації підшипникових матеріалів з відходів швидкорізальних сталей на основі аналізу плівок тертя / А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок та ін. // Наукові вісті НТУУ “КПІ”. – 2011. – № 2. – С. 100–107.
5. Нові технології фінішного оброблення композиційних підшипників ковзання для жорстких умов експлуатації: Монографія / А.П. Гавриш, О.О. Мельник, Т.А. Роїк та ін. – К.: НТУУ “КПІ”, 2012. – 196 с.
6. Вплив технології виготовлення та магнітно-абразивної обробки на властивості високошвидкісних підшипників / О.О. Мельник, Ю.Ю. Віщюк, А.П. Гавриш, Т.А. Роїк // Вісник НТУУ “КПІ”. Сер. Машинобудування. – 2010. – № 59. – С. 75–78.
7. Гавриш А.П., Мельничук П.П. Алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів: Монографія. – Житомир: ЖДТУ, 2003. – 652 с.
8. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні / А.П. Гавриш, А.В. Шевчук, Т.А. Роїк та ін. // Технологія і техніка друкарства. – 2012. – № 3. – С. 119–127.
9. Обеспечение качества поверхностей деталей из магнитомягких сплавов прецизионной доводкой: Монографія / Т.А. Роик, П.А. Киричок, А.П. Гавриш и др. – К.: НТУУ “КПИ”, 2013. – 233 с.