

О.А. Гавриш, д.т.н., проф.  
А.П. Гавриш, д.т.н., проф.  
П.О. Киричок, д.т.н., проф.  
Т.А. Роїк, д.т.н., проф.  
Ю.Ю. Віцюк, к.т.н., с.н.с.

*Національний технічний університет України «КПІ»*

## СИЛОВОЕ ПОЛЕ ПРИ ТОНКОМУ КУБОНІТОВОМУ ШЛІФУВАННІ ДЕТАЛЕЙ ТЕРТЯ З НОВИХ КОМПОЗИЦІЙНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ПОЛІГРАФІЧНОЇ ТЕХНІКИ

*Наведено результати дослідження впливу на складові сил різання тонкого кубонітового шліфування деталей тертя з нових композиційних матеріалів, створених на базі шліфувальних відходів інструментальних сталей 86ХБНФТ, 4ХМНФС та 5ХЗВЗМФС для важких умов роботи друкарської техніки. Встановлено закономірності впливу режимних факторів шліфування, типу кубоніту, зернистості та матеріалу зв'язки кубонітового круга на механізм формування складових сил різання на різальній кромці кубонітового зерна у зоні різання матеріалу. Визначено основні залежності оброблення нових високошвидкісних композитних сплавів від режимів процесу кубонітового шліфування (швидкості обертання, подовжньої подачі, швидкості обертання кубонітового круга) та зернистості кубонітових зерен в інструменті. Розроблено рекомендації з вибору кубонітових кругів і режимів різання для промисловості, що забезпечують якість поверхонь тертя високошвидкісних підшипників ковзання для друкарської техніки.*

**Ключові слова:** кубонітове шліфування, високошвидкісні композитні сплави, друкарська техніка.

**Постановка проблеми.** Вимоги до деталей тертя, які працюють в умовах інтенсивного зношування, постійно зростають. Це обумовлює необхідність створення та вдосконалення існуючих технологій виготовлення деталей такого типу, включаючи синтез нових видів матеріалів та розробку фінішних операцій технологічного процесу надтонкої обробки робочих поверхонь тертя з забезпеченням відповідних високих вимог до якості оброблення (мінімальних значень параметрів шорсткості поверхонь  $R_a$ , мінімальних спотворень, знака та значень залишкових напружень, дефектів тонкого поверхневого шару, глибини залягання наклепу, ступеню деформації металу у зоні зрізання стружки поодиноким абразивним зерном). Ці якості формують умови

придатності поверхні оброблення для задоволення високих функціональних вимог експлуатації, зокрема суттєвого підвищення строків служби машин та механізмів друкарської техніки.

На жаль, усі ці питання недостатньо досліджені, оскільки нові композиційні матеріали (на основі цінних шліфувальних відходів інструментальних сталей) для деталей, які працюють у жорстких умовах експлуатації, лише нещодавно були створені і почали застосовуватись у промисловості [1–5].

Відомо, що на параметри зносостійкості поверхонь тертя суттєво впливають не тільки параметри шорсткості  $R_a$ ,  $a_i$ , що не менш важливо, фізичні властивості тонкого шару поверхонь оброблення. Ці властивості (з точки зору загальної теорії шліфування) забезпечуються при обробці взаємодією силового та температурного полів на різальному лезі зерна шліфувального інструменту.

У машинобудівних галузях промисловості широке визнання та значне розповсюдження отримало тонке кубонітове шліфування з застосуванням створених у Інституті надтвердих матеріалів НАН України ім. В.М. Бакуля інструментів на базі кубічного нітриду бору (КНБ) [6]. Кубонітові шліфувальні круги забезпечують якість оброблення на рівні алмазних інструментів. На жаль, до сьогодення не вивчені особливості кубонітового шліфування нових композитів.

Таким чином, дослідження параметрів силового поля (складових сил різання) при тонкому кубонітовому шліфуванні нових композиційних матеріалів на основі цінної вторинної сировини – шліфувальних відходів сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5ХЗВЗМФС – є актуальним питанням, що має наукове та практичне значення.

**Мета і завдання досліджень.** Метою даної роботи було дослідження складових сил різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  при кубонітовій обробці деталей з нових композиційних сплавів на основі відходів інструментальних сталей 86Х6НФТ, 4ХМНФС та 5ХЗВЗМФС з домішками твердого мастила  $CaF_2$ , та встановлення впливу зернистості шліфувального круга, типу зв'язки круга і режимів різання на параметри силового поля.

*Задачами* даного дослідження було:

1. Виконати серію експериментів з визначення складових сил різання при фінішній механічній обробці зразків з нових композиційних матеріалів на основі шліфувальних відходів.
2. Визначити характер впливу зернистості кубонітового шліфувального круга та типу зв'язки круга на параметри силового поля.

3. Встановити вплив режимів різання на параметри силового поля при тонкому кубонітовому шліфуванні досліджуваних матеріалів.
4. Узагальнити одержані результати та зробити висновки.
5. Сформулювати практичні рекомендації для промисловців.

**Результати досліджень.** Експериментальне вивчення силового поля, зокрема, складових сил різання  $P_x$ ,  $P_y$ ,  $P_z$  при тонкому кубонітовому шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів, виконувалось згідно з методикою, наведеною у роботах [5, 6].

Як вже відзначалось вище, сили різання при шліфуванні металів є джерелом виникнення у зоні різання високих температур та залишкових пластичних деформацій у поверхневих шарах виробу. Сили різання при шліфуванні залежать від міцностних характеристик оброблювального матеріалу, складу кубонітового круга та режимів шліфування [6].

Для утворення стружки різальні кромки кубонітових зерен вдавлюються у матеріал деталі і на оброблювальній поверхні утворюються канавки у напрямку руху круга.

Згідно з різними дослідженнями процесів мікрорізання та шліфування, встановлено, що при малих глибинах вдавлювання кубонітового зерна відбувається пластичне деформування без зрізання стружки – видавлювання матеріалу з боків риски від проходження зерна; лише при глибині вдавлення 0,06–0,1 мкм починається процес утворення стружки перед різальними зернами [6]. У зв'язку з тим, що кубонітові зерна шліфувального круга знаходяться на значній відстані одне від одного і для металевих матеріалів діаграми розтягу при однакових повторних навантаженнях співпадають з діаграмою розвантаження, то пружній стан металу можна розглядати як результат силової дії поодинокого зерна.

Зміцнення поверхневого шару є результатом нормальної складової сили різання. Тому ступінь наклепу приблизно може характеризуватись величиною нормальної складової сили різання, що припадає на поодиноке зерно. Враховуючи, що різальні зерна кубонітового круга знаходяться на однаковій відстані  $L_\phi$  одне від одного, можна вважати, що кожному зерну відповідає площа  $L_\phi^2$ . Тоді кількість різальних зерен  $m$  на площі контакту круга з виробом  $F = L_k \cdot B$  буде рівною:

$$m = F_m = L_k \cdot B / l_\phi^2, \quad (1)$$

де  $B$  – ширина шліфування, мм;  $L_k$  – довжина дуги контакту, мм (для плоского шліфування  $L_k = D + t$ );  $l_\phi$  – фактична відстань між зернами, мм;  $m$  – кількість різальних зерен, що припадає на одиницю площі круга;  $D$  – діаметр шліфування, мм;  $t$  – глибина шліфування, мм.

Відстань між зернами  $l_{\phi}$  може бути визначена експериментально. Для деяких зерен, зокрема, для кубічного нітриду бору (КНБ),  $l_{\phi}$  розрахована, експериментально уточнена і використовується при дослідженнях силового поля [6].

З урахуванням цього були виконані всебічні дослідження. Значення питомих (віднесених до 10 мм ширини круга) тангенціальної та нормальної складових зусиль різання наведено у таблицях 1–3. Аналіз результатів для обох видів матеріалів показує, що зі збільшенням глибини шліфування нормальна та тангенціальна складові зусилля різання закономірно зростають. Це пояснюється як збільшенням навантаження, що припадає на поодинокі різальне зерно, так і збільшенням кількості зерен у зоні контакту шліфувального круга з виробом. Також необхідно звернути увагу на важливий результат, отриманий при дослідженні тонкого кубонітового шліфування широкою гамою високолегованих композиційних сплавів, а саме: при досить значній зміні режимів різання (наприклад, глибина шліфування  $t_d$  у 10 разів – для всього кола тестування) співвідношення складових сил різання  $P_y/P_z$  залишається стабільним і незалежно від марки композиту знаходиться у межах 1,21–1,80 (для матеріалу на основі 86Х3В3НФТ) та 1,13–1,49 (для сплаву 5Х3В3МФС), тобто зміни цього показника не перевищують розбіжності у 12–25 %. Це свідчить про стабільність безпосередньо процесів різання при застосуванні кубонітових інструментів і саме в цьому виявляються переваги тонкого кубонітового шліфування, порівняно з абразивною обробкою [5, 8].

Крім того, збільшення у складі композитів таких легуючих елементів, як вольфрам, молібден та ванадій, а, відповідно, суттєва зміна механічних характеристик оброблюваних матеріалів з одночасним погіршенням оброблюваності їх різанням не викликає значних змін у співвідношенні складових сил шліфування  $P_y/P_z$ . Швидше за все, це явище найвірогідніше також може бути пояснено більш високою здатністю до різання кубонітових зерен шліфувального круга і відповідними перевагами кубонітового шліфування високолегованих важкооброблюваних композитів на основі відходів інструментальних сталей, порівняно з тонким абразивним шліфуванням кругами з найгостріших абразивних зерен карбиду кремнію зеленого [6, 9].

Зазначені закономірності зберігаються для кубонітових кругів на різних зв'язках (еластична бакелітно-гумова Бр1 чи жорстка металева М1). До речі, це свідчить про об'єктивну єдність отриманих залежностей і, більше того, повністю збігається із загальними положеннями теорії шліфування [11, 15].

Таблиця 1

Питомі сили різання при плоскому кубонітовому шліфуванні сплаву 86Х6НФТ+ 5%CaF<sub>2</sub>

Глибина шліфування по лімбі верстату t <sub>л</sub> , мм	Характеристика круга					
	200×32×16 мм					
	КНБМ14Бр1 100%			КНБМ14М1 100%		
	P <sub>z</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> /P <sub>z</sub>	P <sub>z</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> /P <sub>z</sub>
0,005	18,5	22,4	1,21	20,4	30,1	1,47
0,01	22,3	35,2	1,58	25,6	39,2	1,53
0,02	45,6	75,5	1,66	53,7	75,5	1,40
0,05	135,7	245,3	1,80	145,5	180,6	1,24

Примітка: верстат – FF-350 “Аbawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість кругу – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; обробка – без охолодження

Таблиця 2

Питомі сили різання при плоскому кубонітовому шліфуванні сплаву 4ХНМФС+ 5%CaF<sub>2</sub>

Глибина шліфування по лімбі верстату t <sub>л</sub> , мм	Характеристика круга					
	200×32×16 мм					
	КНБМ14Бр1 100%			КНБМ14М1 100%		
	P <sub>z</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> /P <sub>z</sub>	P <sub>z</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> /P <sub>z</sub>
0,005	14,4	19,2	1,33	19,3	19,4	1,01
0,01	23,2	33,1	1,42	34,2	39,5	1,15
0,02	38,3	58,5	1,53	58,1	58,3	1,01
0,05	112,6	127,6	1,13	118,6	129,7	1,09

Примітка: верстат – FF-350 “Аbawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість кругу – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; обробка – без охолодження

Таблиця 3

Питомі сили різання при плоскому кубонітовому шліфуванні сплаву 5ХЗВ3МФС+ 5%CaF<sub>2</sub>

Глибина шліфування по лімбі верстату t <sub>л</sub> , мм	Характеристика круга					
	200×32×16 мм					
	КНБМ14Бр1 100%			КНБМ14М1 100%		
	P <sub>z</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> /P <sub>z</sub>	P <sub>z</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> , Н/см	P <sub>y</sub> /P <sub>z</sub>
0,005	15,2	20,1	1,32	20,5	20,4	1,00
0,01	25,4	35,3	1,39	35,3	40,2	1,14
0,02	40,3	60,2	1,49	60,2	70,3	1,16
0,05	115,5	130,7	1,13	120,6	131,7	1,09

*Примітка:* верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; обробка – без охолодження

При кубонітовому шліфуванні використання дрібнозернистих кругів на еластичній зв'язці Бр1 також знижує величини тангенціальної та нормальної складових сили різання (табл. 1–5). Це пояснюється більшою пружністю бакелітно-гумової зв'язки, порівняно з металевою М1.

Для розрахунку навантаження на окреме зерно було прийнято, що у процесі стружкоутворення приймає участь у середньому 0,1 всіх зерен, які знаходяться на периферії круга, тобто:

$$m = 0,1 \cdot L_k \cdot V / l_{\phi}^2. \quad (2)$$

З експериментальних даних (табл. 4, 5) видно, що при тонкому кубонітовому шліфуванні навантаження, що припадає на одне зерно, зростає дуже інтенсивно до глибини 0,012 мм. При подальшому збільшенні глибини шліфування величина розрахункового навантаження незначна. Тому подальше збільшення сил різання пов'язане, в основному, тільки зі збільшенням кількості різальних кубонітових зерен у зоні контакту шліфувального круга з виробом.

При використанні еластичних зв'язок, наприклад, бакелітно-гумових Бр1, навантаження на одне зерно менше залежить від глибини різання.

Таблиця 4

*Розрахункове навантаження на окреме різальне зерно круга при кубонітовому шліфуванні зразків з композиційного сплаву 86Х6НФТ + 5%CaF<sub>2</sub>*

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_n$ , мм	Довжина дуги контакту $L_k$ , мм	Характеристика круга					
		КНБМ14Бр1 100%			КНБМ14М1 100%		
		m	$P_{z3}$ , Н	$P_{y3}$ , Н	m	$P_{z3}$ , Н	$P_{y3}$ , Н
0,005	0,80	465	0,025	0,041	237	0,085	0,085
0,01	1,1	675	0,030	0,050	348	0,127	0,097
0,02	1,6	910	0,051	0,066	426	0,186	0,210
0,05	2,7	1550	0,078	0,093	780	0,255	0,325

*Примітка:* верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 22 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; В – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії

Таблиця 5

Розрахункове навантаження на окреме різальне зерно круга при кубонітовому шліфуванні зразків з композиційного сплаву 4ХНМФС + 5%CaF<sub>2</sub>

Глибина шліфування по лімбу верстату $t_{л}$ , мм	Довжина дуги контакту $L_{к}$ , мм	Характеристика круга					
		400×32×16 мм			200×32×16 мм		
		КНБ25Бр1 100%			КНБМ14Бр1 100%		
		m	$P_{z3}, H$	$P_{y3}, H$	m	$P_{z3}, H$	$P_{y3}, H$
0,005	0,80	10	2,6	4,2	465	0,017	0,028
0,01	1,1	14	2,9	4,9	675	0,025	0,037
0,02	1,6	22	3,1	5,7	910	0,032	0,044
0,05	2,7	38	3,7	7,4	1550	0,043	0,063

*Примітка:* верстат – FF-350 “Abawerk” (ФРН); режими шліфування: швидкість круга – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; В – 10 мм; охолодження – 3% розчин содової емульсії

При шліфуванні дрібнозернистими кругами значення  $P_{z3}$  та  $P_{y3}$  приблизно у 100–150 разів менші, ніж при шліфуванні крупнозернистими кругами (табл. 5). Таким значним зменшенням нормальної складової зусилля різання поодиноким зерном і пояснюється, в основному, зниження ступеню зміцнення поверхневого шару й умов покращення формування мінімальної шорсткості поверхонь оброблення деталей тертя з нових композитних матеріалів [5, 7–9] при використанні дрібнозернистих кубонітових інструментів.

**Висновки.** З точки зору формування поглядів на процеси утворення умов забезпечення якісних показників поверхонь оброблення деталей тертя високошвидкісних друкарських машин, вперше виконано дослідження силових параметрів поля при тонкому кубонітовому шліфуванні деталей тертя з нових композиційних

сплавів, які синтезовані з утилізованих шліфувальних відходів інструментальних легованих сталей.

Для забезпечення високих вимог до якості виробів з нових композитних матеріалів необхідно враховувати, що найкращі показники (з точки зору дії силових факторів процесу тонкої обробки, зокрема, складових сил різання  $P_z$ ,  $P_y$ ,  $P_x$ ) гарантує застосування інструментів на основі кубічного нітриду бору (КНБ) на бакелітно-гумовій зв'язці (Бр1), які мають зернистість – 14–20 мкм.

Дослідження показали, що суттєво впливають на параметри якості поверхонь кубонітового оброблення режими різання. Для практичних цілей отримання стабільних та високих результатів (щодо параметрів якості поверхонь оброблення) забезпечує використання наступних режимів різання: шліфувальний круг КНБМ14Бр1 100 %; швидкість кругу – 25 м/с; поздовжня подача – 0,1 мм/подв. хід; ширина шліфування (В) – 10 мм; охолодження – 3 % розчин содової емульсії.

Подальші дослідження процесів тонкого кубонітового шліфування нових високолегованих композитних матеріалів доцільно виконувати для вивчення значень миттєвих контактних температур шліфування у зоні різання. У поєднанні з результатами силового поля всебічне вивчення температурного поля на різальній кромці кубонітового зерна при тонкому шліфуванні дозволить отримати об'єктивні параметри якості поверхонь оброблення і, перш за все, таких важливих факторів, як глибина та ступінь наклепу, глибина його залягання, рівень залишкових напружень та їх знак (розтягу чи стиску). Це дозволить призначати такі режими тонкого шліфування, які забезпечать отримання необхідних параметрів зносостійкості та ремонтоздатності при їх експлуатації в умовах жорстких навантажень.

### Список використаної літератури:

1. Патент України № 60522, МПК С22С33/02 (2006.01). Підшипниковий композиційний матеріал на основі інструментальної сталі / *Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, П.О. Киричок, О.А. Гавриш, Ю.Ю. Віцюк, О.О. Мельник*, Опубл. 25.06.2011, Бюл. № 12.
2. Патент України № 30377 МПК (2006), С22С33/02 Порошковий антифрикційний матеріал на основі швидкорізальної сталі / *Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, В.В. Холявко, Б.П. Зора*, опубл. 25.02.08, Бюл. № 4.

3. 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.
4. Принципи одержання композиційних зносостійких матеріалів на основі відходів інструментального виробництва / *Т.А. Роїк, А.П. Гавриш, П.О. Киричок та ін.* // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : междунар. сб. науч. тр. – Донецк : ДонНТУ, 2012. – Вып. 1, 2 (43). – С. 261–265.
5. Вплив абразивного інструменту на шорсткість поверхонь композитних підшипників поліграфічної техніки при тонкому шліфуванні / *А.П. Гавриш, П.О. Киричок, Т.А. Роїк та ін.* // Технологія і техніка друкарства. – № 3. – 2012. – С. 65–77.
6. *Гавриш А.П.* Алмазно-абразивна обробка магнітних матеріалів : монографія / *А.П. Гавриш, П.П. Мельничук.* – Житомир : ЖДТУ, 2004. – 552 с.
7. Силове поле при тонкому абразивному шліфуванні деталей тертя з нових композиційних сплавів для друкарської техніки / *А.П. Гавриш, П.О. Киричок, Т.А. Роїк та ін.* // Прогрессивные технологии и системы машиностроения : междунар. сб. научн. тр. – Донецк : Дон НТУ, 2013. – Вып. 1, 2 (45). – С. 85–90.
8. Аналіз параметрів якості поверхонь підшипників ковзання з композиційних сплавів для друкарських машин при абразивному шліфуванні / *А.П. Гавриш, П.О. Киричок, Т.А. Роїк та ін.* // Наукові вісті Національного технічного університету України «КПІ». – № 1. – 2013. – С. 63–67.
9. Вплив складу інструменту та режимів тонкого кубонітового шліфування на шорсткість поверхонь композитних підшипників ковзання поліграфічних машин / *А.П. Гавриш, Т.А. Роїк, П.О. Киричок та ін.* // Національний технічний університет України «КПІ». – № 5. – 2013. – С. 66–73.
10. Дослідження температур при тонкому абразивному шліфуванні деталей з композитів на основі відходів інструментальних сталей / *А.П. Гавриш, П.О. Киричок, Т.А. Роїк та ін.* // Вісник Тернопільського національного університету. – № 1 (69). – 2013. – С. 125–130.
11. Абразивная и кубонитовая обработка материалов : справочник / Под. ред. *А.Н. Резникова.* – М. : Машиностроение, 1977. – 391 с.

12. *Маслов Е.Н.* Теория шлифования материалов : учебник / *Е.Н. Маслов.* – М. : Машиностроение, 1974. – 320 с.
13. *Сверхтвердые материалы. Получение и применение : монография. в 6 т. / Под общ. ред. Н.В. Новикова.* – К. : ИСМ им. В.Н. Бакуля, ИПЦ «АЛКОН» НАНУ. – Т. 6 : Алазно-абразивный инструмент в технологиях обработки / Под ред. *А.А. Шепелева.* – 340 с.
14. *Рабочие процессы высоких технологий в машиностроении : учебн. пособие / Под ред. А.И. Грабченко.* – Харьков : ХГПУ, 1999. – 436 с.
15. *Основи теорії різання матеріалів : підручник / М.П. Мазур, Ю.Ю. Внуков, В.Л. Добро скок ; за заг. ред. М.П. Мазура.* – Львів : Новий світ, 2010. – 422 с.

ГАВРИШ Олег Анатолійович – доктор технічних наук, професор, декан факультету менеджменту та маркетингу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- інноваційні технології машинобудування;
- фінішні методи прецизійної обробки поверхонь деталей.

ГАВРИШ Анатолій Павлович – доктор технічних наук, професор, головний науковий співробітник Видавничо-поліграфічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- теорія процесів шліфування;
- фінішні методи оброблення матеріалів зі спеціальними властивостями.

КИРИЧОК Петро Олексійович – доктор технічних наук, професор, директор Видавничо-поліграфічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- технологія поліграфічного машинобудування;
- поверхнева оздоблювально-зміцнююча обробка деталей.

РОЇК Тетяна Анатоліївна – доктор технічних наук, професор, професор кафедри репрографії Видавничо-поліграфічного інституту

Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- синтез нових композиційних матеріалів;
- технологія виробництва матеріалів.

ВІЦЮК Юлія Юліївна – кандидат технічних наук, ст. науковий співробітник, старший викладач кафедри репрографії Видавничо-поліграфічного інституту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут».

Наукові інтереси:

- синтез нових композиційних матеріалів;
- фізико-механічні властивості композитів.

Стаття надійшла до редакції 11.04.2012