

## ПОШУК ЄДИНИХ ЗАКОНОМІРНОСТЕЙ У ВЗАЄМОЗВ'ЯЗКУ ПАРАМЕТРІВ ШОРСТКОСТІ ПРИ ОБРОБЦІ ІНСТРУМЕНТОМ З НТМ

*Основна ідея виконання робіт за даним напрямком полягає в тому, що аналіз отриманих закономірностей дозволяє встановити, яким способом чи методом обробки можна отримати, наприклад, різні значення кроку мікронерівностей для певного значення параметра  $R_a$ . Наведені дослідження є базою отримання фундаментальних залежностей за взаємозв'язком параметрів шорсткості, що дозволяє у подальшому скласти імітаційну модель формування шорсткості оброблювальної поверхні при обробці інструментом з надтвердих матеріалів.*

**Актуальність проблеми.** Найбільш поширеним показником шорсткості оброблювальної поверхні після багатьох методів та способів обробки є показник  $R_a$ . Але досвід експлуатації виробів свідчить [1, 2], що для різних умов їх застосування необхідно контролювати не один, а декілька параметрів шорсткості контактних поверхонь:

- для поверхонь, що працюють в умовах тертя-ковзання та котіння та не зазнають зносу –  $R_a$ ,  $t_p$  і напрямком нерівностей;
- для поверхонь, що схильні до контактних напружень –  $R_a$  і  $t_p$ ;
- для пресових поєднань –  $R_a$ ;
- для поверхонь виробів, що зазнають змінних навантажень –  $R_{max}$ ,  $S_m$  та напрямком нерівностей;
- для поверхонь, що утворюють герметичні з'єднання –  $R_a$  і  $t_p$ .

Відомо, що між вищенаведеними параметрами існує певний взаємозв'язок. Так, у праці [3] вказано, що крок мікронерівностей та параметр  $R_a$  пов'язані наступними залежностями:

$$S_m = 2 / (200 - 278 R_a) \quad \text{при } R_a = 0,63 \text{ мкм};$$

$$S_m = 2 / (43 - 11 R_a) \quad \text{при } R_a > 0,63 \text{ мкм}.$$

Автором роботи [4] цю залежність зведено до такого вигляду:  $S_m = 42R_a + 10$ .

Вкажемо, що в літературі зовсім не зустрічаються такі, наведені вище, відомості для переважної більшості методів та способів шліфування кругами з НТМ і майже відсутні такі відомості для обробки лезовим інструментом з НТМ. Крім того, нами не знайдені дослідження, які дозволяли визначити у математичному вигляді вплив різних методів на зміну, наприклад, крокових параметрів шорсткості при визначеному параметрі  $R_a$ .

Відсутність таких відомостей і не дозволяє керувати параметрами шорсткості за рахунок добору ефективних методів обробки, оскільки невідомо, що і як впливає на показники шорсткості. А це, в свою чергу, не дозволяє провадити розробку прецизійних технологій високого рівня за допомогою імітаційних моделей, бо відсутні, по-перше, самі моделі, а по-друге, відсутня концепція формування таких моделей.

**Мета роботи** полягала в отриманні фундаментальних залежностей, що відбивають взаємозв'язок параметрів шорсткості оброблювальної поверхні з базовим параметром  $R_a$  при шліфуванні та лезовій обробці інструментом із НТМ.

**Основні ідеї, що покладені в основу вирішення вказаної вище проблеми.** Як вказано вище, відомо лише не більше як 10 залежностей між  $R_a$  та  $S_m$ . Причина цього полягає у тому, що більшість дослідників виходять з тези про незалежність параметрів шорсткості між собою. Наш підхід є діаметрально протилежним. Ми принципово виходимо з ідеї про наявність залежності параметрів шорсткості від базового параметра  $R_a$ . У відомих з літератури рішеннях ця ідея не розглядається, бо апріорі вважається, що можна один параметр змінювати, як заманеться, а інші при цьому не зміняться. Така ідея базується на майже одиничних вимірах, які дійсно можуть давати результати ніби-то зміни лише одного параметра. Ми виходимо з положення про те, що шорсткість – це статистичний процес і оцінювати його треба лише за умов множинності вимірів та їх статистичної обробки.

**Основні результати роботи та їх обговорення.** Для вирішення викладених ідей, на наш погляд, важливим є, по-перше, встановити закономірності впливу способів та методів абразивної та лезової обробки інструментом з НТМ на показники шорсткості оброблювальної поверхні та їх взаємозв'язок, по-друге, виявити основні чинники, що впливають на взаємозв'язок параметрів шорсткості та базового параметра  $R_a$ .

**Вплив умов контактування при шліфуванні на шорсткість поверхні матеріалу, що піддається обробці.** Формоутворення ріжучої поверхні круга у процесі шліфування чинить, як показано нами у роботі [5], досить значний вплив на формування поверхні обробки. Але пов'язане воно здебільшого з режимами шліфування, а от у даному випадку нас буде більше цікавити безпосередній вплив характеристики робочого шару круга та властивостей самих інструментальних матеріалів на показники шорсткості поверхні.

З підвищенням **міцності алмазів** у кругах шорсткість поверхні змінюється мало, але спостерігається тенденція до її зростання [5]. **Покриття зерен НТМ** чинить значно більший вплив на шорсткість, ніж їх міцність. Нами вивчалися такі варіанти застосування різного покриття зерен: склопокриття (С), металеве (М), склометалеве (СМ), металоагреговане (МА). Дослідження [5, 6] дозволяють зробити однозначний висновок: **будь-яке покриття зерен призводить до підвищення висотних параметрів і кроку мікронерівностей профілю шорсткості.** Це однаково відноситься, як до кругів на металевих зв'язках, так і на полімерних. У цілому можна уявити вплив покриття зерен на шорсткість наступною низкою (за мірою збільшення порівняльних коефіцієнтів висотних параметрів):

Без покриття (1,0) → МА (1,6) → С (1,8) → СМ (2,0) → М (2,2).

**Зернистість НТМ** при формуванні шорсткості відіграє важливу роль, але вона не є однозначною і значною мірою залежить від методу шліфування і стану форми профілю ріжучої поверхні круга. Для способів шліфування з подовжньою подачею це пов'язане з утворенням трикутної форми, яка призводить до того, що поверхня обробки формується зернами, що знаходяться на вершині профілю, та їх зернистість при цьому не має значення. Так, при глибинному електрошліфуванні швидкоріжучих сталей кругами з КНБ, збільшення зернистості з 63/50 до 160/125 не змінює висотні параметри шорсткості [5]. У випадку наявності перехідного колового паска на ріжучій поверхні круга і при пружних методах шліфування зернистість НТМ має вже більше значення і з її збільшенням зростає висота мікронерівностей поверхні, що піддається обробці.

Зі зростанням відносної **концентрації зерен НТМ у крузі** від 25 до 100 % висотні параметри шорсткості поверхні знижуються і після 100 % дещо стабілізуються, а у випадку використання металополімерних зв'язок, з підвищенням концентрації за 100 % висотні параметри навіть збільшуються (табл. 1). Згадується тенденція до зменшення кроку профілю і зростання його заповнення. Це пояснюється тим, що при малих концентраціях шорсткість підвищується через зменшення кількості зерен, що формують поверхню, і підвищення їх фактичної глибини різання. Зі збільшенням концентрації за 100 % зв'язка стає більш твердою та жорсткою [5], ймовірність втиснення зерен у зв'язку знижується і сліди від поодиноких зерен стають глибшими. Крім того, наведена алогічність поведінки шорсткості із перевищенням відносної концентрації НТМ за 100 %, на наш погляд, підтверджує висловлене у роботі [7] припущення про те, що для тієї частки зерен, які нахилені не назустріч напрямку дії зусилля різання, участь у з'ємі припуску є неістотною. Встановлено також (табл. 1), що введення у зв'язку, нарівні із зернами середньої величини, зерен малих фракцій не сприяло зниженню шорсткості.

**Основа зв'язки кругів** значно впливає на шорсткість, оскільки властивості матриці, у якій знаходиться зерно, визначають умови його контактування з матеріалом, що піддається обробці. Більш тверда та жорстка матриця забезпечує і більшу шорсткість поверхні. Нами встановлено, що переважно при застосуванні більш еластичних полімерних зв'язок, у порівнянні з металевими та керамічними, шорсткість знижується в 2,0–2,4 рази [6]. Наведені вище закономірності не підтверджуються тільки при електрошліфуванні незагартованої сталі кругами з КНБ. Виявлено, що у цьому випадку найменша шорсткість спостерігається при шліфуванні кругом на металевій зв'язці МО20-2. Застосування полімерної зв'язки не знижує, як очікувалося, значення параметра  $R_a$ , а навпаки – підвищує. Це пов'язано з інтенсивним зносом кругів на полімерних зв'язках при шліфуванні незагартованої сталі внаслідок значних електроерозійних процесів. У зв'язку з цим, звернемо увагу на те, що при електроерозійному

шліфуванні з підвищенням напруги від 30 до 55 В шорсткість за параметром  $R_a$  зростає від 0,34 мкм до 0,75 мкм, а відносна опорна крива профілю практично не змінюється. Це, на наш погляд, є важливим, оскільки означає, що **більше вскриття зерен НТМ не впливає на розподіл зерен у ріжучому шарі** (опорну криву), а впливає тільки на їх виступання над зв'язкою.

Таблиця 1

Вплив концентрації алмазів АС4 з покриттям МА у кругах на полімерній зв'язці ВСЕ на показники шорсткості при електрохімічному шліфуванні (ЕХШ) сплаву ТН20 із продуктивністю 525 мм<sup>3</sup>/хв.

Характеристика круга	Показники шорсткості			
	$R_a$ , мкм	$R_{max}$ , мкм	$S_m$ , мкм	$t_{50}$ , %
100/80 – 100 %	0,36	2,75	136	46,3
(100/80 – 100 %) + (50/40 – 25 %)	0,63	2,99	323	38,6
100/80 – 150 %	0,40	3,29	115	84,9

Нашими дослідженнями виявлено, що шорсткість шліфованої поверхні інструментальних матеріалів має певний статистичний зв'язок із їх фізичними властивостями. Оскільки з таких матеріалів лише тверді сплави мають найбільшу номенклатуру їх марок, то саме на них нами вперше встановлений математичний вигляд залежностей шорсткості з фізичними властивостями матеріалів. Так, із зростанням густини та коерцитивної сили твердих сплавів шорсткість відповідно збільшується:

$$R_a = 1 / (2,204 + 5,87 \cdot 10^5 e^{-\rho});$$

$$R_a = 0,208 + 1,068 \cdot 10^{-2} K_C.$$

А із підвищенням твердості, міцності на згин та величини зерен карбідної фази шорсткість відповідно зменшується:

$$R_a = 3,72 - 3,74 \cdot 10^{-2} H_{TC};$$

$$R_a = 0,4004 - 1,96 \cdot 10^{-5} \sigma_{zc};$$

$$R_a = 0,555 - 0,146 \cdot Z_{TC}.$$

Наведені залежності дозволяють у цілому прогнозувати напрямок зміни показника шорсткості поверхні, що шліфується, особливо у тих випадках, коли піддається обробці широка номенклатура сплавів в умовах дрібносерійного виробництва.

**Зв'язок параметрів шорсткості з параметром  $R_a$ .** Нами проведені дослідження з процесів шліфування та електрошліфування інструментальних матеріалів. Для цієї області встановлено, що між параметрами  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $t_p$  та параметром  $R_a$  існує досить стійкий статистичний зв'язок, приклади якого наведені на рис. 1. За сформульованим напрямком нами зібраний та проаналізований масив даних, що становить приблизно 6000 точок, що дозволило вперше визначити більше 70 статистичних залежностей, які відображають зв'язок основних параметрів шорсткості:  $R_p$ ,  $R_{max}$ ,  $S_m$ ,  $t_{20}$ ,  $t_{50}$  з базовим параметром  $R_a$ . Вигляд деяких (враховуючи обмежений обсяг цієї роботи) апроксимуючих функцій для різних умов шліфування матеріалів кругами з НТМ наведений у табл. 2.

Аналіз отриманих залежностей виявляє, що, наприклад, крок мікронерівностей  $S_m$  підвищується зі зростанням параметра  $R_a$ . Але характер цього зростання залежить від матеріалу, що піддається обробці, та способу обробки (рис. 2). Так, з рис. 2 видно, що способи шліфування за ступенем збільшення величини кроку мікронерівностей можна подати у такій послідовності: врізний → глибинний → пружний. Порівняння багатопрохідного та глибинного методів шліфування (рис. 2) свідчить, що, у першому випадку (до нього відноситься і точіння), кроки нерівностей є більшими, ніж у другому. В залежності від матеріалу, що піддається обробці, крок мікронерівностей змінюється, причому з підвищенням твердості матеріалу він зростає. У цілому, інструментальні матеріали за ступенем збільшення кроку нерівностей можна розташувати у такій послідовності:

Сталі (Р6М5 → Ст.10 + 9ХФ → Х12М) → Кераміка → Тверді сплави → БВТС.

Аналогічно проаналізовані й інші параметри. У цілому, отриманий комплекс рівнянь (табл. 2) дозволяє, визначивши параметр  $R_a$  (теоретично або експериментально), оцінювати інші параметри шорсткості та вибирати шляхи їх регулювання.

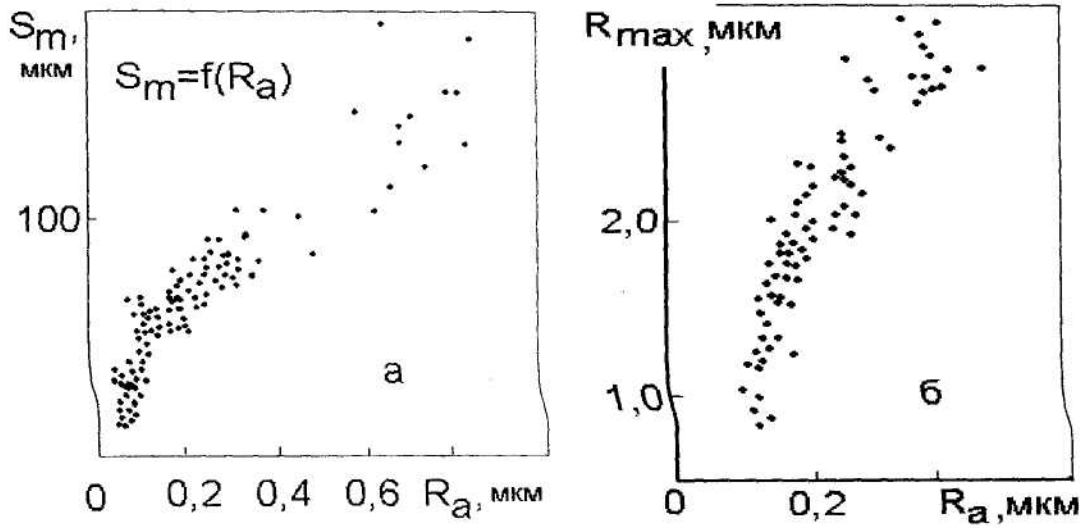


Рис. 1. Залежність параметрів шорсткості  $S_m$  (а) та  $R_{max}$  (б) при глибокому шліфуванні оксидно-карбідної кераміки

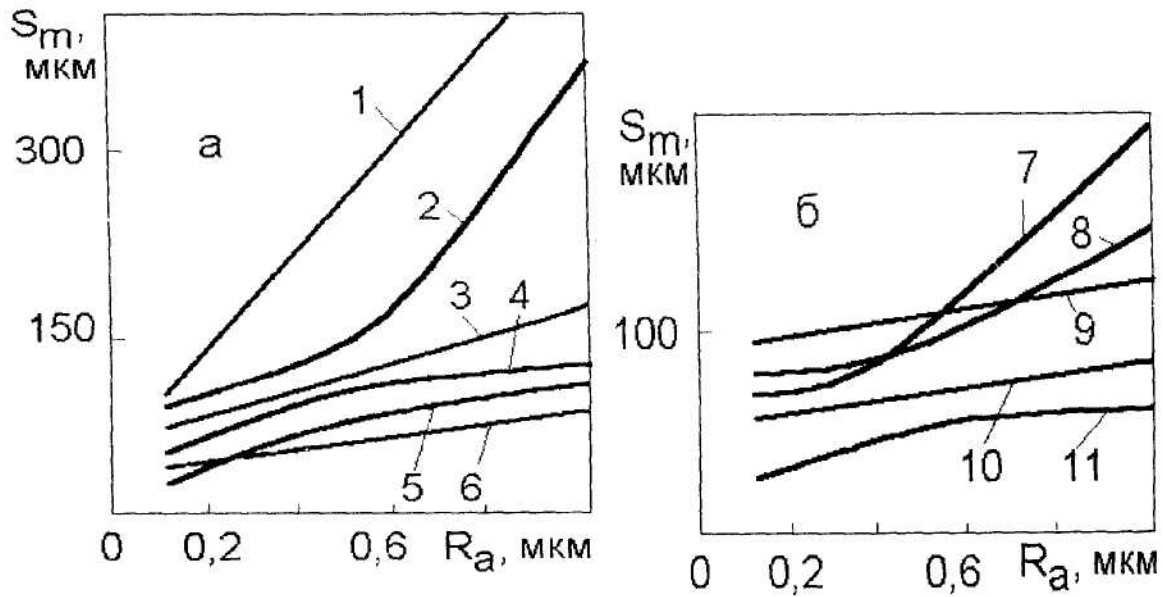


Рис. 2. Залежність кроку мікронерівностей  $S_m$  від параметра  $R_a$  при різних способах шліфування кераміки (а) та сталі (б): 1 - врізному; 2 - глибокому (оксидно карбідна); 3 - глибокому (оксидна); 4 - пружньому; 5 - плоскому; 6 - круглому; 7 - багатопрохідному сталі Р6М5 кругами з КНБ; 8 - те ж саме для сталі 10+9ХФ; 9 - багатопрохідному сталі Р6М5 кругом з електрокорунду; 10 - глибокому ЕХШ сталі Р6М5; 11 - багатопрохідному ЕХШ сталі Р6М5



Таблиця 2

Зв'язок параметрів шорсткості з параметром  $R_a$  для різних умов обробки  
(діапазон значень  $R_a$  0,1...1,0 мкм)

Умови обробки	Апроксимуючі функції	Відносна похибка апроксимації, %
1	2	3
Глибинне електрошліфування кругами з КНБ швидкоріжучих сталей	$S_m = 42,56 + 26,08R_a$ $R_{\max} = 4,612R_a^{0,564}$ $t_{50} = 80,64 - 23,19R_a$	17,5 8,2 15,5
Багатопрхідне шліфування сталі Р6М5 кругами з електрокорунду без охолодження	$S_m = 55,45 + 29,19R_a$ $R_{\max} = 4,012R_a^{0,1948}$ $t_{50} = 66,43 + 5,502R_a$	9,9 2,95 8,3
Багатопрхідне шліфування сталі Р6М5 кругами з КНБ без охолодження	$S_m = 23,21 + 153,6R_a$ $R_{\max} = 3,989R_a^{0,4235}$ $t_{50} = 37,41 + 23,89R_a$	20,0 6,8 22,1
Багатопрхідне шліфування сталі Р6М5 кругами з КНБ без охолодження	$S_m = 23,21 + 153,6R_a$ $R_{\max} = 3,989R_a^{0,4235}$ $t_{50} = 37,41 + 23,89R_a$	20,0 6,8 22,1
Багатопрхідне шліфування сталі 10 + 9ХФ кругами з КНБ із охолодженням	$S_m = 51,37 + 92,77R_a$ $R_{\max} = 6,02R_a + 0,95R_a^2$ $t_{50} = 72,8 - 7,873R_a$	8,9 21,6 9,1
Глибинне алмазне шліфування БВТС марки КНТ	$S_m = 27,09 + 405R_a - 238,9R_a^2$ $R_{\max} = 0,998 + 3,865R_a$ $t_{50} = 76,42 - 81,93R_a + 66,93R_a^2$	24,0 20,6 30,5
Глибинне алмазне шліфування БВТС марки ТН	$S_m = 23,83 + 577,5R_a - 471,7R_a^2$ $R_{\max} = 0,7485 + 4,054R_a$ $t_{50} = 62,2 - 36,35R_a + 50,64R_a^2$	94,0 * 17,3 24,3
Глибинне алмазне шліфування твердих сплавів	$S_m = 34,61 + 320,1R_a - 155R_a^2$ $R_{\max} = 0,9486 + 3,255R_a$ $t_{50} = 84,08 - 144,2R_a + 137,3R_a^2$	40,9 78,3 * 14,9
Глибинне алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки з охолодженням	$S_m = 84,12 - 77,82R_a + 397,1R_a^2$ $R_{\max} = 4,012R_a^{0,6164}$ $t_{50} = 66,6 - 4,621R_a$	24,3 14,0 22,4
Глибинне алмазне шліфування оксидної ріжучої кераміки з охолодженням	$S_m = 47,14 + 135,4R_a$ $R_{\max} = 0,1182 + 3,255R_a$	15,8 10,7
Пружне алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки з охолодженням	$S_m = 176,5R_a^{0,6533}$ $R_{\max} = 4,575R_a^{0,6192}$ $t_{50} = 70,47 - 16,04R_a$	16,7 42,5 16,4
Врізне алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки з охолодженням	$S_m = 48,41 + 477,6R_a$ $R_{\max} = 1,092 + 3,451R_a$ $t_{50} = 56,51R_a^{-0,09175}$	20,6 40,6 16,3
Врізне алмазне шліфування твердих сплавів групи ВК з охолодженням	$S_m = 133,8 + 17,76R_a + 96,76R_a^2$ $R_{\max} = 1 / (0,2665 - 0,1389R_a + 0,02245R_a^2)$	13,3 11,0
Двостороннє алмазне шліфування оксидно-карбідної кераміки з охолодженням	$S_m = 16,69 + 206,48R_a^3$ $R_{\max} = -0,2554 + 7,1852R_a - 2,872R_a^2$ $t_{50} = 58,43 - 123,2R_a + 227,9R_a^2$	17,9 5,1 17,0
Багатопрхідне алмазне шліфування магнітотвердих сплавів	$S_m = 30 + 70,59R_a$ $R_{\max} = 0,4 + 5,2R_a$ $t_{30} = 19 + 9R_a^2$	25,0 10,2 40,4

Закінчення таблиці 2

1	2	3
Точіння сталі Х12М різьцями з гексаніту без охолодження	$S_m = 101,1 + 27,16R_a$ $R_{\max} = 3,861R_a^{0,3854}$ $t_{50} = 61,42 - 1,28R_a$	36,5 5,4 18,7
Точіння сталі 40Х різьцями з гексаніту без охолодження	$S_m = 100,1 + 90,59R_a$ $R_{\max} = 1,489e^{1,227R_a}$ $t_{50} = 54,97 + 4,621R_a$	27,7 25,8 19,8

- Вимагає додаткового дослідження

## ЛІТЕРАТУРА:

1. Козловский Н.С., Виноградов А.Н. Основы стандартизации, допуски, посадки и технические измерения. – М.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
2. Рыжов Э.В., Сагарда А.А., Ильицкий В.Б., Чеповецкий И.Х. Качество поверхности при алмазно-абразивной обработке. – К.: Наук. думка, 1979. – 224 с.
3. Лукьянов В.С., Рудзит Я.А. Параметры шероховатости поверхности. – М.: Изд-во стандартов, 1979. – 162 с.
4. Экслер Л.И. Экспериментальные соотношения для высотных и шаговых параметров шероховатости // Метрологические и технологические исследования качества поверхности. – Рига: Зинатне, 1976. – С. 37-42.
5. Лавриненко В.И. Электрошлифование инструментальных материалов. – К.: Наукова думка, 1993. – 155 с.
6. Лавриненко В.И. Шероховатость поверхности при шлифовании инструментальных материалов // Повышение качества поверхности деталей при физико-механической обработке: Сб. науч. трудов. – К.: ИСМ АН УССР, 1990. – С. 32-39.
7. Лавриненко В.І. Наукові основи шліфування інструментальних матеріалів із спрямованою зміною характеристик контактних поверхонь: Автореферат на здоб. д.т.н. – К.: ІНМ НАН України, 2000. – 35 с.

ЛАВРИНЕНКО Валерій Іванович – доктор технічних наук, с.н.с., провідний науковий співробітник Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- електрошліфування;
- інструменти з НТМ;
- обробка монокристалів.

Тел. 430-35-29

Подано 15.05.2001