

DOI 10.32820/2079-1747-2020-25-79-88

УДК 621.923

**ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЯКОСТІ ШВИДКОРІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТУ  
ПРИ ПЛОСКОМУ ШЛІФУВАННЯ****©Скоркін А.О., Кондратюк О.Л.<sup>1</sup>, Старченко О.П.<sup>2</sup>, Камчатна-Степанова К. В.<sup>3</sup>***Українська інженерно-педагогічна академія<sup>1</sup>**Харківський радіотехнічний коледж<sup>2</sup>**Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"<sup>3</sup>***Інформація про авторів:**

**Скоркін Антон Олегович:** ORCID: 0000-0003-3032-8341; [Andromeda862@ukr.net](mailto:Andromeda862@ukr.net); кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Кондратюк Олег Леонідович:** ORCID:0000-0002-3263-0483; [kondr20071@i.ua](mailto:kondr20071@i.ua); кандидат технічних наук; доцент кафедри машинобудування та транспорту; Українська інженерно-педагогічна академія, вул. Університетська 16, м. Харків, 61003, Україна.

**Старченко Олена Павлівна:** ORCID:0000-0002-7444-6668; [Estarchenko79@gmail.com](mailto:Estarchenko79@gmail.com); заступник директора з навчальної роботи, Харківський радіотехнічний коледж, вул. Сумська 18/20, м. Харків, 61057, Україна

**Камчатна-Степанова Катерина Валеріївна:** ORCID: 0000-0001-7825-1238; [katerina.ks@i.ua](mailto:katerina.ks@i.ua); інженер I категорії Науково-дослідної частини, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61002, Україна

Ріжучий інструмент - найбільш слабкий елемент в технологічній системі, тому його працездатність і безвідмовність у вирішальній мірі визначає стабільність вихідних параметрів технологічного процесу і його техніко-економічну ефективність. Частка швидкорізальних сталей в інструментальному виробництві досягає 65%, що пояснюється їх високою твердістю (до 70 HRC) і теплостійкістю (620 ... 650 ° C) в поєднанні з великим рівнем міцності і в'язкості. У зв'язку з постійно зростаючими вимогами до інструменту і вдосконаленням технологій в світовому виробництві змінюється номенклатура швидкорізальних сталей. Так, на зміну вольфрамовим і молібденовим швидкорізальним сталям нормальної продуктивності приходять сталі підвищеної продуктивності з високим вмістом ванадію і кобальту, які дозволяють підвищити продуктивність обробки деталей з високоміцних легованих, корозійно-стійких сталей і титанових сплавів, що застосовуються в літакобудуванні. За рахунок поліпшених ріжучих властивостей і збільшеного періоду стійкості цих сталей зростає продуктивність і стабільність процесу лезової обробки.

Стандарти на виготовлення швидкорізальних інструментів накладають високі вимоги на якість їх робочих поверхонь. Так, для дискових фрез з пластинами з швидкорізальних сталей за ГОСТ 16229-81 шорсткість передніх і задніх поверхонь ріжучої частини повинна бути не більше  $Rz$  3,2, опорних торців -  $Ra$  1,25. Технічні умови на циліндричні протягання з швидкорізальних сталей за ГОСТ 28442-9 встановлюють шорсткість задніх і передніх поверхонь чорнових і чистових зубів в межах  $Rz$  3,2 ... 1,6, калібрів зубів -  $Rz$  1,6 ... 0,8, опорних торців -  $Ra$  0,63.

**Ключові слова:** інструмент, шліфування, лезвий інструмент, дискова фреза, фінішна обробка

*Скоркин А.О., Кондратюк О.Л., Старченко Е.П., Камчатная- Степанова Е. В.*  
«Обеспечение качества быстрорежущего инструмента при плоском шлифовании»

Режущий инструмент – наиболее слабый элемент в технологической системе, поэтому его работоспособность и безотказность в решающей мере определяет стабильность выход-

ных параметров технологического процесса и его технико-экономическую эффективность. Доля быстрорежущих сталей в инструментальном производстве достигает 65 %, что объясняется их высокой твердостью (до 70 HRC) и теплостойкостью (620...650 °C) в сочетании с большим уровнем прочности и вязкости. В связи с постоянно повышающимися требованиями к инструменту и совершенствованием технологий в мировом производстве меняется номенклатура быстрорежущих сталей. Так, на смену вольфрамовым и молибденовым быстрорежущим сталям нормальной производительности приходят стали повышенной производительности с высоким содержанием ванадия и кобальта, которые позволяют повысить производительность обработки деталей из высокопрочных легированных, коррозионно-стойких сталей и титановых сплавов, применяемых в самолетостроении. За счет улучшенных режущих свойств и увеличенного периода стойкости этих сталей возрастает производительность и стабильность процесса лезвийной обработки.

Стандарты на изготовление быстрорежущих инструментов накладывают высокие требования на качество их рабочих поверхностей. Так, для дисковых фрез с пластинами из быстрорежущих сталей по ГОСТ 16229-81 шероховатость передних и задних поверхностей режущей части должна быть не более Rz 3,2, опорных торцов – Ra 1,25. Технические условия на цилиндрические протяжки из быстрорежущих сталей по ГОСТ 28442-9 устанавливают шероховатость задних и передних поверхностей черновых и чистовых зубьев в пределах Rz 3,2...1,6, калибрующих зубьев – Rz 1,6...0,8, опорных торцов – Ra 0,63.

**Ключевые слова:** инструмент, шлифование, лезвийный инструмент, дисковая фреза, финишная обработка

*Skorkin A., Kondratyuk O, Starchenko O, Kamchatna-Stepanova K.* «Quality assurance of the high-speed tool at flat grinding»

The cutting tool is the weakest element in the technological system; therefore, its operability and reliability depend crucially on the stability of the output parameters of the technological process and its technical and economic efficiency. The share of high-speed steels in tool production reaches 65%, which is explained by their high hardness (up to 70 HRC) and heat resistance (620...650°C) in combination with a high level of strength and toughness. Due to the constantly increasing requirements for the tool and the improvement of technologies in the world production, the range of high-speed steels is changing. So, tungsten and molybdenum high-speed steels of normal productivity are being replaced by high-performance steels with a high content of vanadium and cobalt, which can improve the processing performance of parts from high-strength alloyed, corrosion-resistant steels and titanium alloys used in aircraft construction. Due to the improved cutting properties and the increased durability of these steels, the productivity and stability of the blade processing process increase.

Standards for the manufacture of high-speed tools impose high demands on the quality of their work surfaces. So, for disk milling cutters with plates of high-speed steels according to GOST 16229-81, the roughness of the front and rear surfaces of the cutting part should be no more than Rz 3.2, and that of the supporting ends should not exceed Ra 1.25. Specifications for cylindrical broaches made of high-speed steels according to GOST 28442-9 establish the roughness of the rear and front surfaces of rough and final teeth in the range of Rz 3.2 ... 1.6, the calibrating teeth - Rz 1.6 ... 0.8, the supporting ends - Ra 0.63.

**Keywords:** tool, grinding, blade tool, disk cutter, finishing

## Вступ

Процес шліфування супроводжується високими швидкостями деформацій шліфується матеріалу, великими температурними навантаженнями і структурними перетвореннями. Шліфуємість швидкорізальних сталей залежить від їх хімічного і фазового складу. Найбільший вплив при цьому надає зміст карбідів ванадію (VC). В процесі термічної обробки змінюється кількість VC і їх розміри. При загартуванні частина карбідів розчиняється, а при відпустці разом з іншими карбідами виділяється VC. Чим більше відсоток об'ємного змісту VC, тим гірше оброблюваність шліфуванням.

Виробництво швидкорізальних сталей вольфрамової і вольфрамомолибденової груп в середині ХХ століття становило близько 80 ... 85% від всіх інших марок швидкорізальних сталей. До кінця 60-их років вольфрамова сталь Р18 (0,73 ... 0,83% С; 17 ... 18,5% W; 1% Мо; 3,8 ... 4,4% Cr; 1 ... 1,4% V) була основною інструментальною маркою. При утриманні ванадію менше 1,5 ... 2% карбіду VC після загартування і відпустки стали Р18 можуть або повністю відсутні, або бути в незначній кількості [1-3]. Дослідження [4-5] дозволили розробити широку базу технологічних рекомендацій для її бездефектного шліфування. У 70-их роках через дефіцит і високу вартість вольфраму був здійснений перехід на вольфрамомолибденову сталь марки Р6М5 (0,82 ... 0,90% С; 5,5 ... 6,5% W; 4,8 ... 5,30% Мо; 3,8 ... 4,4% Cr; 1,7 ... 2,1% V). Завдяки малому вмісту ванадію кількість карбідів VC в структурі стали Р6М5 після загартування і відпустки не перевищує 1,5%. Тому температура її загартування призначається з принципу достатньої міцності. При цьому забезпечується хороше шліфування інструменту і відсутність відмов в його роботі через поломки і відколів ріжучої кромки. З цих причин швидкоріжуча сталь Р6М5 і в даний час є найбільш поширеною в інструментальному виробництві [6].

## 1. Аналіз останніх досліджень і публікацій

Традиційно шліфування крайок швидкоріжучого інструменту виконується шліфувальними кругами (ШК) з електрокорунду на керамічній зв'язці. Електрокорунд отримав свою назву від способу отримання - плавкою мінералу корунду (хімічна формула  $Al_2O_3$ ) в електротічах. Залежно від процентного вмісту корунду і легуючих елементів розрізняють [7]:

- Електрокорунд білий (98 ... 99,5% корунду), мікротвердість (20 ... 22)  $\times$  103 МПа. Має найбільш гострі і крихкі зерна. Зарубіжні аналоги 25А - 42А, 89А, Е і ін.
- Електрокорунд нормальний 10А (93 ... 96% корунду), мікротвердість (18 ... 20)  $\times$  103 МПа. Менш тверді, але міцніші зерна. Зарубіжні марки 13А, 14А, 15А, 18А.
- Електрокорунд хромовий рожевий 33А, 34А з вмістом хрому менше 0,5% (за кордонні аналоги 57А, 88А, ЕКd) і рубіновий (2 ... 3% Cr) - зарубіжні марки 86А, 68А, 26А. Відрізняється підвищеною ударною міцністю і застосовується на інтенсивних режимах шліфування.
- Електрокорунд хромтітаністий з підвищеною здатністю до самозатачування (91А, 92А, 93А, 94А).
- Цирконієвий електрокорунд 38А-3, 38А-4, 38А-5 з вмістом двоокису цирконію  $ZrO_2$  23 ... 25%. Завдяки високим характеристикам міцності і експлуатаційними показниками ШК з цирконієвого електрокорунду застосовуються для силового високошвидкісного шліфування. Зарубіжна марка 80А.
- Монокорунд з вмістом близько 99%  $Al_2O_3$ . Відмітна особливість полягає в технології його отримання - не дроблінням технічної породи, а безпосередньо у вигляді зе-

рен. Найміцніші зерна в порівнянні з іншими різновидами електрокорунду. Вітчизняні марки 43А, 44А, 45А, зарубіжний аналог - 31А.

За обсягом виробництва традиційних абразивних матеріалів електрокорунд займає перше місце. В Україні найбільш застосовні електрокорунди білий і нормальний.

## **2. Постановка проблеми**

Зниження режимів різання, твердості ШК і його часта правка призводить до втрати продуктивності. Застосування пульсуючої подачі ускладнює кінематику верстата і веде до зниження точності обробки. Шліфування переривчастими ШК призводить до підвищення шорсткості поверхні в порівнянні з обробкою звичайними кругами.

Ефективним засобом підвищення якості процесу шліфування є застосування високопористих ШК - особливого класу абразивного інструменту, характерною рисою якого є зменшений об'ємний вміст зерен. Будова ВПК з 10-ю і більш відкритими структурами в порівнянні з інструментом нормальної (5 ... 8) структури обумовлює збільшення порового простору, яке може досягати 60 ... 75% від обсягу кола. Відкрита структура ВПК дозволяє знижувати температуру в процесі шліфування шляхом створення ефекту «повітряного насоса». При обертанні кола під дією відцентрової сили відбувається відкидання повітря від центру до периферії кола.

При шліфуванні швидкорізальних сталей найбільш ефективні ВПК з зернами з кубічного нітриду бору (КНБ) ГОСТ 53922-2010, для яких структура в позначенні характеристики кола не регламентована.

**3. Метою роботи** є дослідження якості швидкоріжучого інструменту при плоскому шліфуванні високопористими нітрідборовими кругами.

## **4. Виклад основного матеріалу**

Незважаючи на широту наведених досліджень відсутні комплексні математичні моделі для операцій плоского шліфування, що описують закономірності зміни параметрів якості. Крім того, в існуючих моделях відсутній облік податливості деталей і операційних припусків. В даному випадку операційний припуск розглядається з позиції впливу на якість одержуваних деталей, а не по традиційному підходу, при якому розглядається видалення тільки дефектів попередньої обробки. Це ускладнює і знижує ефективність проєктованих шліфувальних операцій і подовжує терміни технологічної підготовки інструментального виробництва.

Необхідність моделей технологічних процесів в сучасному виробництві зумовлена широким впровадженням систем автоматизованого проєктування. Для процесів шліфування швидкорізальних інструментів із застосуванням ВПК з КНБ на сьогоднішній момент відсутні науково обґрунтовані технологічні рекомендації. Широке різноманіття існуючих технологічних процесів на підприємствах не завжди може забезпечити необхідні шорсткість, точність форми і фізико-механічний стан поверхонь. Останнє змушує технологів вводити додаткові операції механічної і термічної обробки, що підвищує собівартість виробів і знижує продуктивність процесу.

При вивченні технічних систем найбільшою ефективністю володіють методи планування експерименту. Суть принципу планування узгоджується з принципами робастності

проектування технологічних процесів, так як дозволяє варіювати всі значущі фактори, що впливають на процес, одночасно.

На першому етапі планування вибирається тип матриці плану і рівні варіювання досліджуваних факторів. Визначення рівнів варіювання кожного фактора залежить від можливостей обладнання та інструменту, існуючих рекомендацій і поставлених завдань. Число рівнів визначається з міркувань найбільш повного опису досліджуваного процесу без істотного ускладнення завдання. При цьому найбільш поширеними є дво- і трирівневі плани. Трирівневий план експерименту найбільш повно описує поведінку кожного фактора, завдяки чому підвищується точність побудованих моделей.

Нормований вид чинників в плані дозволяє отримувати прості формули для пошуку коефіцієнтів регресії і визначати за знаком і величиною внесок кожного ефекту в варіацію прогнозованого відгуку. Перехід від натуральних значень змінних до нормованих здійснюється формулами перетворення:

$$x_i = (x_i - x_{0i}) / \Delta x_i$$

У цьому дослідженні були використані D-оптимальні плани експерименту: для чотирьох чинників з числом дослідів  $N = 38$ , з числом повторень  $n = 3$  (таблиця 1) - для абсолютно жорстких БП; для п'яти чинників з  $N = 69$ ,  $n = 3$  (таблиця 2) - для БП змінної податливості.

Таблиця 1 - Матриця D-оптимального плану експерименту  $N = 38$  для абсолютно жорстких БП

Опит	A	B	C	D	Опит	A	B	C	D
1	0	-1	-1	-1	20	-1	1	0	0
2	-1	0	-1	-1	21	-1	-1	1	0
3	0	1	-1	-1	22	0	-1	1	0
4	1	1	-1	-1	23	-1	0	1	0
5	-1	-1	0	-1	24	1	0	1	0
6	1	-1	0	-1	25	0	1	1	0
7	0	0	0	-1	26	1	1	1	0
8	0	1	0	-1	27	0	-1	-1	1
9	0	-1	1	-1	28	0	0	-1	1
10	0	0	1	-1	29	1	0	-1	1
11	1	0	1	-1	30	-1	1	-1	1
12	-1	1	1	-1	31	0	-1	0	1
13	-1	-1	-1	0	32	-1	0	0	1
14	1	-1	-1	0	33	0	1	0	1
15	0	0	-1	0	34	1	1	0	1
16	0	1	-1	0	35	-1	-1	1	1
17	0	-1	0	0	36	-1	-1	1	1
18	0	0	0	0	37	0	0	1	1
19	1	0	0	0	38	0	1	1	1

Властивості факторів можна охарактеризувати властивостями відповідного еліпсоїда розсіювання. Нехай величини  $b_1, b_2, \dots, b_k$  мають розподіл з математичними очікуваннями  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  і коваріації  $c_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, k$ ). Розглянемо  $k$ -мірний еліпсоїд, центр якого збігається з точкою, що має координати  $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k)$ . Припустимо, що в цій області щільність ймовірності постійна. Коваріації цього рівномірного розподілу можна підібрати так, щоб во-

ни збігалися з  $c_{ij}$ . Тоді величини  $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$  і  $c_{ij}$  ( $i, j = 1, 2, \dots, k$ ) визначають параметри еліпсоїда, який і є еліпсоїд розсіювання.

Таблиця 2 - Матриця D-оптимального плану експерименту  $N = 69$  для БП змінної піддатливості

Опит	A	B	C	D	E	Опит	A	B	C	D	E	Опит	A	B	C	D	E
1	1	1	-1	-1	-1	24	1	0	1	1	-1	47	-1	-1	1	-1	1
2	-1	0	1	-1	-1	25	-1	1	-1	1	-1	48	-1	-1	1	-1	1
3	-1	-1	-1	-1	-1	26	-1	1	1	1	-1	49	0	1	1	-1	1
4	-1	1	1	-1	-1	27	0	-1	-1	1	-1	50	0	-1	1	-1	1
5	1	-1	1	-1	-1	28	1	-1	1	1	-1	51	1	1	1	-1	1
6	1	1	-1	-1	-1	29	1	0	-1	-1	0	52	1	0	-1	-1	1
7	1	1	-1	-1	-1	30	0	1	-1	-1	0	53	-1	1	-1	-1	1
8	1	1	0	-1	-1	31	-1	0	-1	-1	0	54	-1	1	1	0	1
9	0	0	0	0	-1	32	1	-1	0	-1	0	55	1	-1	-1	0	1
10	-1	1	-1	0	-1	33	1	-1	-1	-1	0	56	1	-1	-1	0	1
11	1	1	1	0	-1	34	-1	-1	-1	-1	0	57	1	1	1	0	1
12	1	-1	-1	0	-1	35	1	-1	1	-1	0	58	1	1	1	0	1
13	-1	-1	-1	0	-1	36	-1	-1	1	1	0	59	1	1	0	0	1
14	1	-1	1	0	-1	37	1	-1	-1	1	0	60	-1	-1	0	0	1
15	-1	-1	1	0	-1	38	-1	1	1	1	0	61	-1	1	0	0	1
16	-1	0	1	0	-1	39	-1	-1	0	1	0	62	-1	1	1	1	1
17	-1	-1	1	1	-1	40	1	1	-1	1	0	63	1	1	-1	1	1
18	-1	0	-1	1	-1	41	0	1	1	1	0	64	1	-1	1	1	1
19	0	-1	-1	1	-1	42	0	-1	1	1	0	65	-1	-1	-1	1	1
20	1	0	1	1	-1	43	0	0	0	0	0	66	0	0	0	1	1
21	-1	1	-1	1	-1	44	1	-1	0	0	0	67	-1	1	-1	1	1
22	-1	1	1	1	-1	45	-1	1	-1	0	0	68	-1	1	-1	1	1
23	0	-1	-1	1	-1	46	1	-1	1	0	0	69	1	1	-1	1	1

Можна поставити такий план експерименту, при якому обсяг еліпсоїда розсіювання буде мінімізуватися на безлічі планів в цій галузі. Плани, що відповідають цій вимозі, називаються D-оптимальними.

У матричному поданні критерієм D-оптимальності відповідає мінімум визначника матриці

$$|X'X| = 1/|(X'X)^{-1}|.$$

Нижче представлена матриця дисперсій-коваріацій вектора  $\beta$ :

$$(X'X)^{-1}\sigma^2 = Var \beta = \begin{pmatrix} Var\beta_1 & Cov(\beta_1, \beta_2) & \dots & Cov(\beta_1, \beta_n) \\ Cov(\beta_2, \beta_1) & Var\beta_2 & & Cov(\beta_2, \beta_n) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Cov(\beta_n, \beta_1) & Cov(\beta_n, \beta_2) & & Var\beta_n \end{pmatrix}$$

Поверхня стандарту помилки використаного в дослідженні D- оптимального плану представлена на рис. 1, а, а ізолінії рівних значень - на рисунку 1, б. Можна помітити, що мінімум стандарту помилки зміщений від центру і знаходиться в двох зонах зі значенням 0,45. На границях плану стандарт помилки незначно зростає і для більшої частини поверхні не перевищує 0,55.

В результаті тестування встановлено, що вимоги параметричної статистики не виконуються в повному обсязі. У зв'язку з цим звернемося до рангових методів.

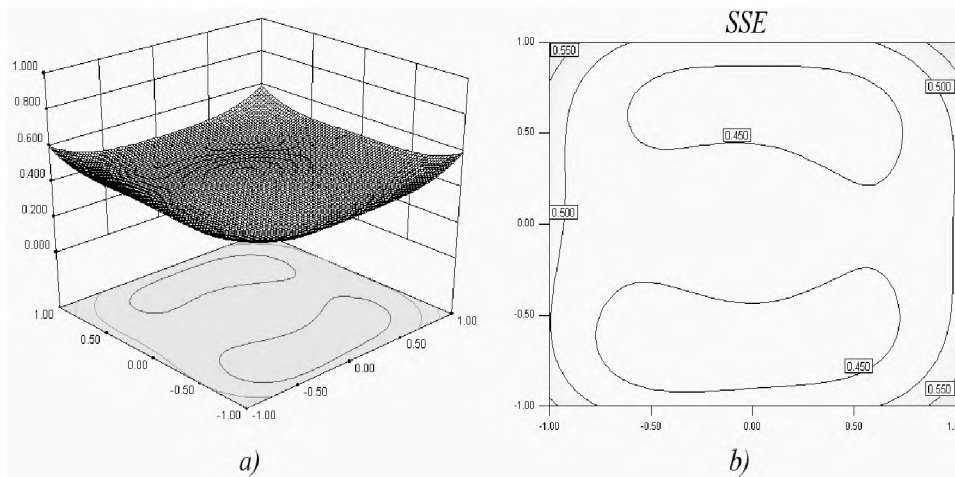


Рис. 1. - Поверхня квадратів помилки D-оптимального плану (а) і її ізолінії (б) при варіюванні двох значущих чинників.

Розглянемо заходи положення і розсіювання середнього арифметичного відхилення  $RaI$  і найбільшої висоти нерівностей профілю  $RmaxI$ , представлені на рис. 2.

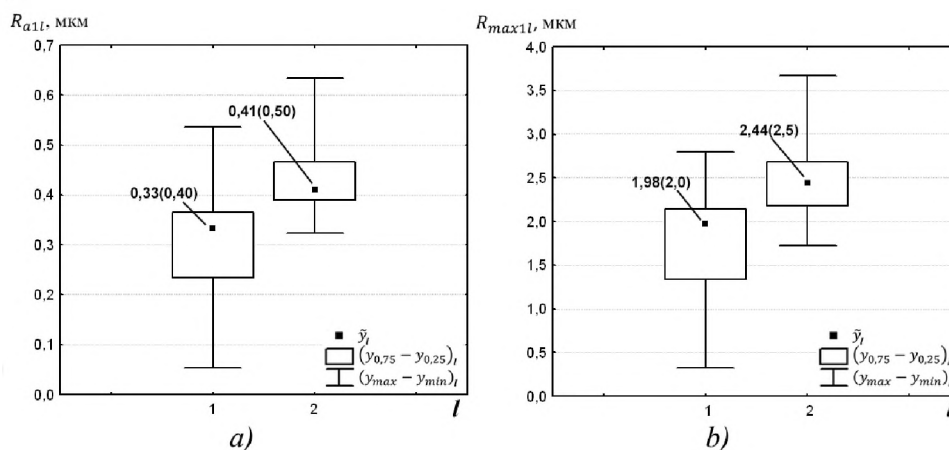


Рис. 2. - Описові непараметричні статистики висотних параметрів мікрорельєфу  $RaI$  (а) і  $RmaxI$  (б) при  $Sn$ : 1 - 4 мм / под.хід, 2 - 2 мм / хід.

Для обох параметрів встановлена аналогічна мінливість опорних значень, викликана схемою завдання поперечної подачі. Шліфування з подачею на одинарний хід ( $l = 2$ ) призводить до зростання спостережуваних медіан на одну КВ:  $RaI10,33 (0,40)$  мкм,  $RaI20,41 (0,50)$  мкм і  $RmaxI11,98 (2,0)$  мкм,  $RmaxI22,44 (2,5)$  мкм. Ця тенденція підтверджена для прогнозованих медіан висотних і крокових параметрів мікроегеометрії, за винятком  $RzI1$ , яка вийшла за межі КВ  $RzI,25$  на 0,06 мкм. Зниження висот мікрорельєфу для схеми  $l = 1$  може бути пояснено тим, що на другому неробочому ході фактично виконується виходжування, при якому згладжуються мікронерівності.

Оцінка мінливості процесу шліфування з поперечною подачею на одинарний хід для всіх параметрів мікрорельєфу приведена в таблиці 3. Стабільність формування всіх критеріїв, за винятком  $SmI2$ , значно вище, ніж при шліфуванні з подачею на подвійний хід. У той же час з точки зору забезпечення менших опорних значень кращою слід визнати схему  $l = 1$  з поперечною подачею на подвійний хід, оскільки для неї верхня межа КШ  $y_{0.75} l$  розташовані нижче  $y_{0.25} 2$  для варіанту  $l = 2$ .

Таблиця 2 - Вплив схем завдання поперечної подачі на стабільність процесу плоского шліфування за параметрами мікрорельєфу

напрямок мікрорельєфу	коефіцієнт стабільності $k_{\text{КШЛ}}(1.20) / k_{\text{SDI}}(1.21)$					
	$R_{ad2}$	$R_{qd2}$	$R_{zd2}$	$R_{maxd2}$	$S_{d2}$	$S_{md2}$
$d=1$	2,12 / 2,00	2,36 / 2,08	3,18 / 3,64	1,90 / 1,96	1,90 / 2,03	0,82 / 0,94
$d=2$	4,29 / 2,99	5,24 / 2,82	2,49 / 1,74	3,54 / 1,82	1,34 / 1,28	1,83 / 2,15

Менша стабільність показників топографії при шліфуванні з подачею на подвійний хід пояснюється тим, що знімання металу при робочому ході більше, ніж при зворотньому, який фактично є виходжувальним в процесі циклу шліфування. При роботі з одинарною подачею обидва хода є робочими при меншому переміщенні кола на хід, в результаті чого стабільність процесу зростає. Однак при заточуванні швидкорізальних різців виконання поперечної подачі на одинарний хід важко. У зв'язку з цим, рекомендується використовувати схему завдання на подвійний хід, залишивши в пріоритеті тільки міру положення мікрорельєфу. Вплив рівнів технологічних факторів на топографію поверхні абсолютно жорстких БП при шліфуванні ВПК з КНБ досліджено за допомогою D-оптимального плану експерименту. Спрогнозовані дані дозволили поставити граничні умови при оптимізації процесу.

Спочатку проаналізуємо моделі мікрорельєфу поверхні. Нижче в нормованому вигляді наведені регресивні рівняння поперечних висотних параметрів  $R_{a1}$  і  $R_{max1}$ :

$$\hat{R}_{a1} = 0,36 + 0,049A + 0,05B + 0,04C + 0,037AB + 0,035BC, \text{ мкм}$$

$$\hat{R}_{max1} = 2,06 + 0,25A + 0,29B + 0,24C - 0,055D + 0,19AB + 0,18BC - 0,088CD + 0,12B^2, \text{ мкм}$$

З рівнянь видно, що поперечна подача (ефект В) має найбільший вплив на висотний мікрорельєф поверхні, оскільки коефіцієнти її чистого ефекту мають найбільші значення. Потім по мірі спадання впливу слідує поздовжня подача (А), глибина (С) і ефекти їх взаємодій. Вплив припуску D визнано мінімальним. Аналогічні залежності встановлені для всіх висотних параметрів. На рис. 3 представлені поверхні відгуків  $R_{a1}$  на різних режимах шліфування.

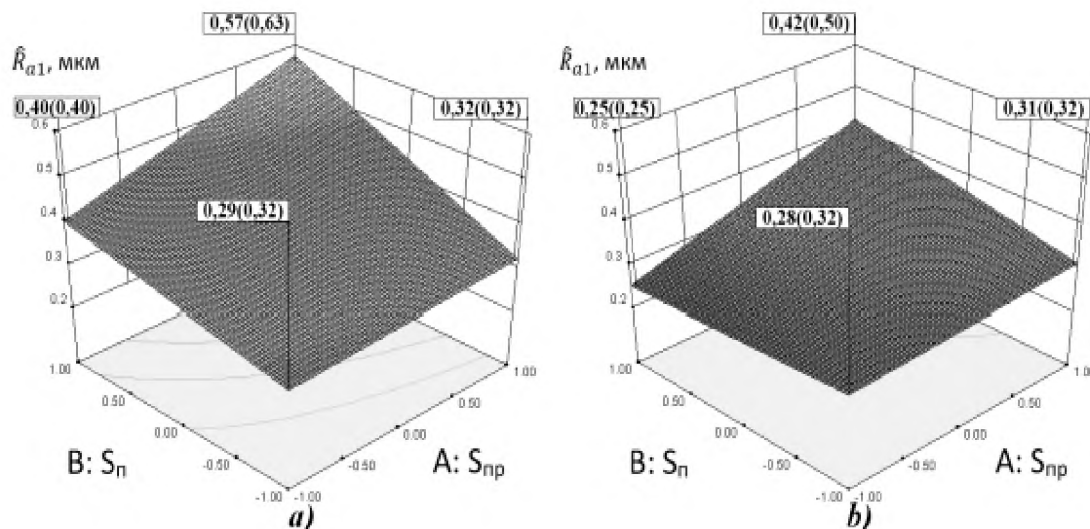


Рис. 3. - Вплив поздовжньої (А) і поперечної (В) подач на поверхні відгуків  $R_{a1}$  при: а -  $C = D = +1$ ; б -  $C = D = -1$



З рис. 3, а видно, що максимальне значення функції відгуку  $Ra1\ 0,57\ (0,63)$  мкм відповідає умові  $A = B = C = D = +1$  при чорновому етапі шліфування. При постійному  $B = +1$  переміщення функції відгуку паралельно осі  $A$  в інтервалі від  $+1$  до  $-1$  супроводжується зниженням висоти нерівностей до  $a1\ 0,40\ (0,40)$  на 2 КВ. У міру зниження фактора поперечної подачі  $B$  вплив поздовжньої подачі  $A$  зменшується і при  $B = -1$  варіювання супроводжується зменшенням  $Ra1$  від  $0,32\ (0,32)$  мкм до  $0,29\ (0,32)$  мкм, тобто в межах однієї КВ. передбачені величини  $Ra1$  відповідають чистового етапу шліфування БП [8-9]. При зменшенні факторів  $C = D = -1$  (рисунок 3, б) вид поверхні відгуку зберігся, але зменшився вплив змінних факторів  $A$  і  $B$  на кут її нахилу і екстремальні величини шорсткостей. Максимальний відгук становить  $Ra1\ 0,42\ (0,50)$  мкм, що на одну КВ менше, ніж при шліфуванні з більшою постійною глибиною. Зниження рівня фактора  $A$  від  $+1$  до  $-1$  при  $B = +1$  забезпечує мінімальне значення відгуку  $Ra1\ 0,25\ (0,25)$  мкм. При русі вздовж осі  $B$  [ $+1$ ;  $-1$ ] при збереженні рівня  $A$  спрогнозовано невелике зростання до  $Ra1\ 0,28\ (0,32)$ , який вийшов межі КВ =  $0,25$  мкм. Таким чином, на обох етапах шліфування представляється два варіанти зниження шорсткостей: шліфування з найбільшою поздовжньої ( $A$ ) подачею при мінімальній поперечній ( $B$ ) і шліфування з максимальною поперечною подачею при мінімальній поздовжній. При чистовому шліфуванні обидва варіанти практично рівнозначні (рисунок 3, б), а при чорновому (рисунок 3, а) - перший варіант кращий.

### **Висновки**

При дослідженні схеми завдання поперечної подачі встановлено, що шліфування з подачею на одинарний хід дозволяє збільшити стабільність макрорельєфа до 3-ох, а мікрорельєфу до 5-ти разів в порівнянні з базовим варіантом. Для обох схем прогнозовані макровідхилення виявилися в межах одного квалітету точності, а мікротвердість встановлена рівнозначною. У той же час встановлено значиме погіршення висотних і крокових параметрів мікрогеометрії на одну КВ. З урахуванням складності шліфування з одинарним ходом пріоритету опорних значень шорсткості поперечна подача на подвійний хід визнана найбільш оптимальною.

### **Список використаних джерел:**

1. Адашкин А. М. Технологические возможности использования быстрорежущей стали Р6М5 / А. М. Адашкин // СТИН. – 2009. – № 11. – С. 29–34.
2. Инструмент для высокопроизводительного и экологически чистого резания / В. Н. Андреев, Г. В. Боровский, В. Г. Боровский [и др.]. – М. : Машиностроение, 2010. – 480 с.
3. Балла О. М. Обработка деталей на станках с ЧПУ. Оборудование. Оснастка. Технология / О. М. Балла. – СПб. : Лань, 2015. – 368 с.
4. Дрейпер Н. Р. Прикладной регрессионный анализ / Н. Р. Дрейпер, Г. Смит. – М. : Диалектика, 2007. – 912 с.

5. Дослідження методів і умов формоутворення різальних елементів твердосплавного інструменту для фрезерної обробки композиційних неметалевих матеріалів / А. О. Скоркін, О. Л. Кондратюк, О. П. Старченко [та ін.] // *Машинобудування: зб. наук. пр.* – Харків : УПА, 2019. – № 23. – С. 31–40.
6. A. Devillez, O. Sinot, P. Chevrier и D. Dudzinski. High speed grinding: an industrial study of lubrication parameter // *Metal Cutting and High Speed Machining* edited by D. Dudzinski et al. – Kluwer Academic/Plenum Publishers, 2002. – pp. 251- 265.
7. Frees E. W. Regression modeling with actuarial and financial applications / E. W. Frees. – New York : Cambridge University Press, 2010. – 565 p.
8. Jaya A. S. M. Fuzzy logic-based for predicting roughness performance of TiAlN coating / A. S. M. Jaya , S. Z. M. Hashim, M. N. A. Rahman // *In Intelligent Systems Design and Applications : 10th International Conference 2010.* – London, 2010. – P. 91–96.
9. Rao R. V. Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes / R. V. Rao. – London : Springer, 2011. – 380 p.

#### References

1. Adaskin, AM 2009, 'Tehnologicheskie vozmozhnosti ispolzovaniya bystrorezhushej stali R6M5', *STIN*, no. 11, pp. 29-34.
2. Andreev, VN, Borovskij, GV, Borovskij, VG & Grigorev, SN 2010, *Instrument dlya vysokoproduktivnogo i ekologicheskogo rezaniya*, Mashinostroenie, Moskva.
3. Balla, OM 2015, *Obrabotka detalej na stankah s ChPU. Oborudovanie. Osnastka. Tehnologiya*, Lan, Sankt-Peterburg.
4. Drejper, NR & Smit, G 2007, *Prikladnoj regressionnyj analiz*, Dialektika, Moskva.
5. Skorkin, AO, Kondratyuk, OL, Starchenko, OP & Kamchatna-Stepanova, KV 2019, 'Doslidzhennya metodiv i umov formoutvorenniya rizalnih elementiv tverdosplavnogo instrumentu dlya frezernoyi obrobki kompozicijnih nemetalevih materialiv', *Mashinobuduvannya*, Ukrainska inzhenerno-pedahohichna akademiia, no. 23, pp. 31-40.
6. Devillez, A, Sinot, O, Chevrier, P & Dudzinski, D 2002, 'High speed grinding: an industrial study of lubrication parameter', *Metal Cutting and High Speed Machining*, Kluwer Academic/Plenum Publishers, pp. 251- 265.
7. Frees, EW 2010, *Regression modeling with actuarial and financial applications*, Cambridge University Press, New- York.
8. Jaya, ASM, Hashim, SZM & Rahman, MNA 2010, 'Fuzzy logic-based for predicting roughness performance of TiAlN coating', *In Intelligent Systems Design and Applications (ISDA)*, pp. 91-96.
9. Rao, RV 2011, *Advanced Modeling and Optimization of Manufacturing Processes*, Springer, London.

Стаття надійшла до редакції 17 березня 2020 р.