

МАТЮШЕНКО М. В., РУДНЄВ О. В., ГАСАНОВ М. І., КЛОЧКО О. О.

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ГЕОМЕТРІЇ ПОВЕРХНІ ШЛІФОВАНИХ З ВИКОРИСТАННЯМ ТВЕРДИХ ЗМАЩУВАЛЬНИХ РЕЧОВИН ВАЖКООБРОБЛЮВАНИХ МАТЕРІАЛІВ

Розроблено математичну модель для аналізу результатів досліджень алмазного шліфування важкооброблюваного матеріалу, що використовуються при виготовленні та ремонті авіаційної техніки: жароміцної дисперсійно-твердіючої високолегованої нержавіючої сталі 10X11N23T3MP. Шліфування проводилося з використанням твердих змащувальних матеріалів. Отримані результати дозволяють стверджувати, що тверді змащувальні матеріали здатні ефективно зменшувати роботу тертя. Стеаринову кислоту слід вважати основою для створення ТЗМ з подальшим удосконаленням їх складу.

Ключові слова: математична модель, алмазне шліфування, тверді змащувальні матеріали, важкооброблювані матеріали, жароміцна дисперсійно-твердіюча високолегована нержавіюча сталь.

MATIUSHENKO M., RUDNEV A., GASANOV M., KLOCHKO O.

MATHEMATICAL MODELING OF THE SURFACE GEOMETRY OF HEAVY-CUT MATERIALS GRINDING USING SOLID LUBRICANTS

A mathematical model has been developed to analyze the results of diamond grinding research on a difficult-to-machine material used in the manufacture and repair of aviation equipment: heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel 10X11N23T3MR. Grinding was carried out using solid lubricants. The results obtained allow us to state that solid lubricants are capable of effectively reducing friction work. Stearic acid should be considered the basis for the creation of TZM with further improvement of their composition.

Keywords: mathematical model, diamond grinding, hard lubricating materials, hard-to-machine materials, heat-resistant dispersion-hardening high-alloy stainless steel.

Вихідні експериментальні дані та їх підготовка

Експериментальні дані, використані в даній роботі, отримані в результаті дослідження процесу механічної обробки – алмазно-іскрового шліфування важкооброблюваного матеріалу жароміцної корозійностійкої сталі 10X11N23T3MP з використанням різних твердих мастильних матеріалів. Методика проведення експерименту, параметри оброблювального інструмента та вимірювальне обладнання регламентуються експериментальним протоколом.

У ході експерименту досліджувався вплив сукупності технологічних параметрів на значення параметра шорсткості обробленої поверхні Ra . Як фактори розглядалися:

- тип мастильного матеріалу;
- глибина різання $S_{\text{пор}}$;
- швидкість обробки V .

У дослідженні використовувалися чотири різні мастильні матеріали:

- стеарин (*Stearin 100%*);
- композиція стеарину з нітридом бору (*80% Stearin + 20% BN*);
- композиція стеарину з дисульфідом молібдену (*65% Stearin + 35% MoS₂*);
- композиція стеарину з колокольною бронзою (*90% Stearin + 10% кол. бр.*).

Глибина різання $S_{\text{пор}}$ приймала три фіксовані значення (мм/дв.х):

$$S_{\text{пор}} \in \{0,005; 0,010; 0,015\}.$$

Швидкість обробки V задавалася у п'яти режимах (м/с):

$$V \in \{25, 36, 50, 63, 78\}.$$

Зазначені значення швидкості різання безпосередньо пов'язані з частотою обертання інструмента, тому величини V та відповідні значення частоти в подальшому розглядаються як взаємно залежні параметри кінематичного режиму обробки.

Для кожної комбінації значень факторів: тип мастильного матеріалу, $S_{\text{пор}}$, V (Див. табл.1 – 4) проводилася серія повторних вимірювань параметра шорсткості поверхні Ra . Отримані значення утворювали скінченну множину результатів, що відповідає одній фіксованій комбінації режимів обробки.

З метою зменшення впливу випадкових похибок вимірювання та отримання узагальненої характеристики якості поверхні, для кожної комбінації факторів використовувалося середнє арифметичне значення параметра Ra , обчислене за результатами відповідної серії вимірювань. Таким чином, експериментальні дані були зведені до таблиці середніх значень вигляду

$$Ra = Ra(\text{тип мастильного матеріалу}, S_{\text{пор}}, V),$$

яка містить по одному усередненому значенню параметра шорсткості для кожної комбінації досліджуваних факторів.

Таблиця 1 – Експериментальні значення параметра шорсткості Ra для мастильного матеріалу Stearin_100 для кожної комбінації $S_{пор}$ і швидкості V

$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra
0.005	25	0.324000	0.005	50	0.313333	0.005	78	0.245000
0.010	25	0.300000	0.010	50	0.371429	0.010	78	0.270000
0.015	25	0.290000	0.015	50	0.352000	0.015	78	0.397143
0.005	39	0.513333	0.005	63	0.240000			
0.010	39	0.345000	0.010	63	0.350000			
0.015	39	0.456667	0.015	63	0.280000			

Таблиця 2 – Експериментальні значення параметра шорсткості Ra для мастильного матеріалу BN 80 20

$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra
0.005	25	0.326667	0.005	50	0.226667	0.005	78	1.157500
0.010	25	0.297143	0.010	50	0.544444	0.010	78	0.224000
0.015	25	0.336667	0.015	50	0.462500	0.015	78	0.340000
0.005	39	0.286667	0.005	63	0.805714			
0.010	39	0.296667	0.010	63	0.416000			
0.015	39	0.356000	0.015	63	0.443333			

Таблиця 3 – Експериментальні значення параметра шорсткості Ra для мастильного матеріалу MoS₂_65_35

$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra
0.005	25	0.320000	0.005	50	0.240000	0.005	78	0.273333
0.010	25	0.536000	0.010	50	0.430000	0.010	78	0.474286
0.015	25	0.374286	0.015	50	0.343333	0.015	78	0.216667
0.005	39	0.340000	0.005	63	0.342857			
0.010	39	0.255000	0.010	63	0.320000			
0.015	39	0.280000	0.015	63	0.280000			

Таблиця 4 – Експериментальні значення параметра шорсткості Ra для мастильного матеріалу Kol br 90 10

$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra	$S_{пор}$	V	Середнє Ra
0.005	25	0.364000	0.005	50	0.308571	0.005	78	0.367500
0.010	25	0.345000	0.010	50	0.584000	0.010	78	0.553333
0.015	25	0.457143	0.015	50	0.343333	0.015	78	0.454286
0.005	39	0.333333	0.005	63	0.362857			
0.010	39	0.445000	0.010	63	0.456250			
0.015	39	0.570000	0.015	63	0.410000			

Загальна постановка задачі аналізу експериментальних даних

При аналізі експериментальних результатів важливим є вибір коректної математичної моделі, яка відповідає структурі наявних даних та поставленій меті дослідження. У даній роботі експериментальні дані мають дискретний характер, оскільки всі керовані параметри процесу приймають скінченну кількість фіксованих значень, заданих експериментальним планом.

Зокрема, кожен з досліджуваних факторів приймає значення з наперед визначеної скінченної множини, а експериментальна вибірка утворює повну факторну сітку за цими значеннями. За таких умов відсутнє природне підґрунтя для побудови неперервної функціональної залежності між параметром відгуку та факторами, оскільки:

- значення факторів не утворюють неперервного діапазону, а задані у вигляді окремих рівнів;
- кількість експериментальних точок є обмеженою і не дозволяє коректно ідентифікувати параметри функціональної моделі без введення додаткових припущень;

- форма можливої залежності між параметрами наперед невідома і не впливає безпосередньо з фізичної моделі процесу.

У зв'язку з цим використання класичних методів апроксимації або регресійного аналізу може призводити до надмірної інтерпретації експериментальних даних та появи артефактів, зумовлених вибором конкретної функціональної форми. Такий підхід є особливо некоректним у випадках, коли метою дослідження є не прогнозування значення параметра відгуку, а порівняльна оцінка впливу окремих факторів або їх рівнів.

З огляду на зазначене, у даній роботі експериментальні дані розглядаються як сукупність дискретних спостережень, а аналіз залежності параметра відгуку від факторів здійснюється не шляхом побудови неперервних функцій, а на основі порівняльного аналізу значень параметра відгуку між рівнями факторів при фіксованих значеннях інших параметрів.

За умов дискретного характеру експериментальних даних та обмеженої кількості рівнів досліджуваних факторів доцільним є перехід від аналізу абсолютних значень параметра відгуку до аналізу відносних відмінностей між ними. Такий підхід дозволяє безпосередньо порівнювати вплив окремих рівнів одного фактора за фіксованих значень інших параметрів, не вводячи додаткових припущень щодо форми функціональної залежності.

Параметр шорсткості поверхні, заданий як Ra , виміряний для двох різних рівнів одного і того ж фактора за однакових значень решти факторів. У цьому випадку природною мірою порівняння є відношення відповідних значень параметра шорсткості. Для кожної фіксованої комбінації інших параметрів вводиться безрозмірна величина

$$K_{ij} = \frac{Ra_i}{Ra_j} \quad (1)$$

де Ra_i та Ra_j відповідають значенням параметра шорсткості для двох різних рівнів аналізованого фактора.

Значення величини K_{ij} безпосередньо відображає напрям порівняльного впливу рівнів фактора: при $K_{ij} < 1$ рівень i забезпечує менше значення параметра шорсткості порівняно з рівнем j , тоді як при $K_{ij} > 1$ має місце протилежна ситуація. Таким чином, відношення K_{ij} дозволяє формалізувати порівняльну оцінку якості обробки у вигляді числового критерію, інваріантного до вибору одиниць вимірювання параметра Ra .

Оскільки кожна пара рівнів фактора порівнюється не в одному фіксованому режимі, а в сукупності різних комбінацій інших параметрів, для однієї і тієї ж пари рівнів виникає множина значень величини K_{ij} , що відповідає різним умовам обробки. За таких обставин аналіз окремих значень K_{ij} не дозволяє зробити узагальнену оцінку впливу фактора в цілому.

Для отримання загальної характеристики порівняльного впливу рівнів фактора доцільним є агрегування значень відношень K_{ij} за всіма фіксованими комбінаціями інших параметрів. Враховуючи мультиплікативний характер відношень, таке агрегування здійснюється шляхом переходу до логарифмічної шкали, що дозволяє звести добуток відношень до суми відповідних логарифмів.

Такий підхід узгоджується з сучасними результатами теорії вимірювань та математичної статистики для шкал відношень, відповідно до яких коректне агрегування відносних показників повинно зберігати інваріантність до масштабування та відображати мультиплікативну природу вихідних даних. У цьому випадку логарифмічне перетворення є математично обґрунтованим засобом переходу до адитивної форми, що забезпечує коректну агрегацію результатів за різними умовами спостереження та дозволяє отримати узагальнену характеристику порівняльного впливу рівнів фактора без введення додаткових апріорних припущень.

У результаті для кожної пари рівнів фактора вводиться узагальнена величина

$$S_{ij} = \sum_c \log \frac{Ra_i^{(c)}}{Ra_j^{(c)}} \quad (2)$$

де сумування виконується за всіма можливими комбінаціями фіксованих значень інших факторів, а $Ra_i^{(c)}$ та $Ra_j^{(c)}$ — значення параметра шорсткості, отримані в умовах c .

Знак величини S_{ij} визначає напрям типового відхилення значень параметра шорсткості між рівнями фактора в сукупності режимів обробки, тоді як її модуль характеризує ступінь стійкості цього відхилення при зміні умов експерименту. Такий підхід дозволяє перейти від аналізу окремих режимів до узагальненої порівняльної оцінки впливу рівнів фактора на параметр шорсткості поверхні.

Аналіз результатів

У результаті застосування логарифмічної агрегації попарних відношень параметра шорсткості було отримано узагальнені матриці часткової домінації для кожного з досліджуваних факторів. У наведених таблицях елемент матриці S_{ij} визначається як описано в рівнянні 2. Сумування виконується за всіма фіксованими комбінаціями інших параметрів процесу обробки. Таким чином, кожна таблиця відображає інтегральний результат порівняння рівнів фактора за всією множиною експериментальних режимів.

Таблиця 5 – Агрегована логарифмічна матриця часткової домінації для фактора «тип мастильного матеріалу»

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	0.000000	-0.934368	2.742464	2.550926
Kol_br_90_10	0.934368	0.000000	3.676832	3.485294
MoS ₂ _65_35	-2.742464	-3.676832	0.000000	-0.191538
Stearin_100	-2.550926	-3.485294	0.191538	0.000000

Таблиця 6 – Агрегована логарифмічна матриця часткової домінації для фактора глибини різання $S_{\text{пор}}$

	0.005	0.01	0.015
0.005	0.000000	-1.487582	-0.754157
0.01	1.487582	0.000000	0.733425
0.015	0.754157	-0.733425	0.000000

Таблиця 7 – Агрегована логарифмічна матриця часткової домінації для фактора швидкості обробки V

	25	39	50	63	78
25	0.000000	-0.392311	-0.412002	-0.763902	-0.571033
39	0.392311	0.000000	-0.019690	-0.371591	-0.178722
50	0.412002	0.019690	0.000000	-0.351900	-0.159031
63	0.763902	0.371591	0.351900	0.000000	0.192869
78	0.571033	0.178722	0.159031	-0.192869	0.000000

Наведені матриці відповідають підсумковим логарифмічним сумах попарних порівнянь. Повний набір проміжних матриць відношень K_{ij} , побудованих для кожної фіксованої комбінації режимів обробки, наведено в табл. 8 - 23. У основному тексті розглядаються лише агреговані результати, що узагальнюють поведінку факторів по всій множині експериментальних умов.

Таблиці порівняння результатів співвідношення за формулою 1 та відповідна таблиця агрегованого результату 2

Таблиця 8 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{\text{пор}} = 0.005$, $V = 25$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.897437	1.020834	1.008231
Kol_br_90_10	1.114285	1.000000	1.137500	1.123457
MoS ₂ _65_35	0.979591	0.879121	1.000000	0.987654
Stearin_100	0.991836	0.890110	1.012500	1.000000

Таблиця 9 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{\text{пор}} = 0.005$, $V = 36$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.860002	0.843138	0.558443
Kol_br_90_10	1.162788	1.000000	0.980391	0.649350
MoS ₂ _65_35	1.186045	1.020001	1.000000	0.662338
Stearin_100	1.790694	1.540001	1.509803	1.000000

Таблиця 10 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.005$, $V = 50$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.734570	0.944446	0.723406
Kol_br_90_10	1.361341	1.000000	1.285713	0.984802
MoS ₂ _65_35	1.058822	0.777779	1.000000	0.765958
Stearin_100	1.382349	1.015432	1.305554	1.000000

Таблиці підсумкових результатів, за формулою 2Таблиця 11 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.005$, $V = 63$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	2.220473	2.350000	3.357142
Kol_br_90_10	0.450355	1.000000	1.058333	1.511904
MoS ₂ _65_35	0.425532	0.944882	1.000000	1.428571
Stearin_100	0.297872	0.661418	0.700000	1.000000

Таблиця 12 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.005$, $V = 78$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	3.149660	4.234761	4.724490
Kol_br_90_10	0.317495	1.000000	1.344514	1.500000
MoS ₂ _65_35	0.236141	0.743763	1.000000	1.115645
Stearin_100	0.211663	0.666667	0.896343	1.000000

Таблиця 13 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.01$, $V = 25$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.861284	0.554371	0.990477
Kol_br_90_10	1.161057	1.000000	0.643657	1.150000
MoS ₂ _65_35	1.803845	1.553623	1.000000	1.786667
Stearin_100	1.009615	0.869565	0.559701	1.000000

Таблиця 14 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.01$, $V = 36$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.666667	1.163400	0.859904
Kol_br_90_10	1.499998	1.000000	1.745098	1.289855
MoS ₂ _65_35	0.859550	0.573034	1.000000	0.739130
Stearin_100	1.162920	0.775281	1.352941	1.000000

Таблиця 15 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.01$, $V = 50$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.932267	1.266149	1.465809
Kol_br_90_10	1.072654	1.000000	1.358140	1.572306
MoS ₂ _65_35	0.789797	0.736301	1.000000	1.157691
Stearin_100	0.682217	0.636009	0.863788	1.000000

Таблиця 16 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.01, V = 78$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.911781	1.300000	1.188571
Kol_br_90_10	1.096755	1.000000	1.425781	1.303571
MoS ₂ _65_35	0.769231	0.701370	1.000000	0.914286
Stearin_100	0.841346	0.767123	1.093750	1.000000

Таблиця 17 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.01, V = 78$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.404820	0.472289	0.829630
Kol_br_90_10	2.470237	1.000000	1.166665	2.049381
MoS ₂ _65_35	2.117348	0.857144	1.000000	1.756615
Stearin_100	1.205357	0.487952	0.569277	1.000000

Таблиця 18 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.015, V = 25$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.736459	0.899491	1.160921
Kol_br_90_10	1.357849	1.000000	1.221373	1.576355
MoS ₂ _65_35	1.111739	0.818750	1.000000	1.290641
Stearin_100	0.861385	0.634375	0.774809	1.000000

Таблиця 19 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.015, V = 36$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.624561	1.271429	0.779561
Kol_br_90_10	1.601124	1.000000	2.035714	1.248174
MoS ₂ _65_35	0.786517	0.491228	1.000000	0.613138
Stearin_100	1.282772	0.801170	1.630954	1.000000

Таблиця 20 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.015, V = 50$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	1.347089	1.347089	1.313920
Kol_br_90_10	0.742342	1.000000	1.000000	0.975378
MoS ₂ _65_35	0.742342	1.000000	1.000000	0.975378
Stearin_100	0.761081	1.025244	1.025244	1.000000

Таблиця 21 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{pop} = 0.015, V = 78$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	1.081300	1.583332	1.583332
Kol_br_90_10	0.924813	1.000000	1.464286	1.464286
MoS ₂ _65_35	0.631579	0.682927	1.000000	1.000000
Stearin_100	0.631579	0.682927	1.000000	1.000000

Таблиця 22 – Матриця відношень $K[i][j] = Ra_i/Ra_j$ для factor = lubricant; фіксовано $S_{\text{пор}} = 0.015$, $V = 78$

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	1.000000	0.748427	1.569228	0.856115
Kol_br_90_10	1.336135	1.000000	2.096701	1.143885
MoS ₂ _65_35	0.637256	0.476940	1.000000	0.545564
Stearin_100	1.168068	0.874214	1.832965	1.000000

Таблиця 23 – Підсумкова таблиця часткової домінації для factor = lubricant: агрегування через логарифмічну суму за всіма 15 контекстами

	BN_80_20	Kol_br_90_10	MoS ₂ _65_35	Stearin_100
BN_80_20	0.000000	-0.934368	2.742464	2.550926
Kol_br_90_10	0.934368	0.000000	3.676832	3.485294
MoS ₂ _65_35	-2.742464	-3.676832	0.000000	-0.191538
Stearin_100	-2.550926	-3.485294	0.191538	0.000000

Аналіз отриманих матриць свідчить про відсутність повної домінації будь-якого рівня факторів. Для жодного з рівнів не виконується умова сталого переважання над усіма іншими рівнями у всіх напрямках порівняння, що є характерним для експериментальних даних, отриманих у різних режимах обробки. У межах прийнятої моделі знак елемента матриці S_{ij} має чітку інтерпретацію: від'ємне значення означає, що рівень i у сукупності режимів забезпечує менше значення параметра шорсткості порівняно з рівнем j , тоді як додатне значення вказує на протилежний ефект. Таким чином, рівень фактора, для якого відповідний рядок матриці містить переважно від'ємні значення, демонструє кращі результати порівняно з іншими рівнями, тоді як переважання додатних значень свідчить про гірші показники шорсткості.

Водночас порівняння абсолютних величин додатних та від'ємних елементів між собою не є доцільним, оскільки модулі значень S_{ij} залежать від кількості та розподілу режимів, у яких проявляється перевага або недолік відповідного рівня фактора. З огляду на це, зведення кількох числових значень до єдиної скалярної метрики ефективності може призводити до втрати змістовної інтерпретації.

Таким чином, у межах даного підходу аналіз часткової домінації базується на знаковій структурі агрегованих матриць, що дозволяє встановити напрями відносної переваги між рівнями факторів без введення додаткових припущень щодо кількісної шкали ефективності.

Аналіз впливу типу мастильного матеріалу

Знакова структура матриці дозволяє виявити відносні тенденції. Зокрема, для мастильних матеріалів на основі MoS₂ та чистого стеарину спостерігається переважання від'ємних значень у відповідних рядках при порівнянні з композиціями BN_80_20 та Kol_br_90_10, що вказує на типову перевагу цих матеріалів за показником шорсткості в сукупності режимів обробки. Водночас композиції BN_80_20 та Kol_br_90_10 характеризуються переважанням додатних значень при попарних порівняннях, що свідчить про менш сприятливі результати в середньому по експериментальній сітці.

Аналіз впливу швидкості обробки

Водночас можна відзначити, що нижчі значення швидкості (зокрема $V = 25$ м/с) характеризуються переважанням від'ємних елементів у відповідному рядку матриці при порівнянні з більшістю вищих швидкостей, що вказує на тенденцію до зменшення шорсткості поверхні за нижчих швидкісних режимів. Навпаки, для вищих значень швидкості ($V = 63$ м/с та $V = 78$ м/с) спостерігається зростання кількості додатних значень у попарних порівняннях, що свідчить про погіршення якості поверхні у середньому по всіх розглянутих режимах.

Аналіз впливу глибини різання

Агрегована матриця часткової домінації для фактора глибини різання $S_{\text{пор}}$ вказує на чітко виражену нестрогу домінацію окремих рівнів. Зокрема, для глибини $S_{\text{пор}} = 0,005$ мм/дв.х спостерігається переважання від'ємних значень у попарних порівняннях з іншими рівнями, що свідчить про типову перевагу меншої глибини різання з точки зору зменшення параметра шорсткості.

Для найбільшого значення глибини $S_{\text{пор}} = 0,015$ мм/дв.х, навпаки, характерним є переважання додатних значень у відповідних елементах матриці, що вказує на погіршення якості поверхні при збільшенні глибини різання. Проміжне значення $S_{\text{пор}} = 0,01$ мм/дв.х займає перехідне положення, не демонструючи однозначної переваги або недоліку відносно інших рівнів у всій сукупності режимів.

Список літератури:

1. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter. 2nd ed. O'Reilly Media, 2017. ISBN 978–1491957660.
2. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer, 2004. ISBN 978–0387402727.
3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Wiley, 2019. ISBN 978–1119492443.
4. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning. 2nd ed. Springer, 2021. ISBN 978–1071614174.
5. Оцінка ефективності застосування твердих змащувальних матеріалів при алмазному шліфуванні труднообробних сплавів і сталів / Степанов М.С., Гасанов М.И., Руднев А.В., Котляр О.В., Титаренко О.В., Иванова М.С. Баранов В.М. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 2(10),2024. – С. 3–8. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).01 <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/a7341a28-bf2b-4045-9cf4-7fb6628d7d21>
6. Оцінка змащувальної здатності твердих змащувальних матеріалів при алмазному шліфуванні важкооброблюваних матеріалів / Гасанов М.И., Руднев А.В., Котляр О.В., Титаренко О.В., Корчагин І.Г. // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Techniques in a machine industry: зб. наук.пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. № 1 (9) 2024. – С. 65–70. – ISSN 2079-004X, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/55c7a8dd-57b3-4f0d-831a-ad6f1c754887>
7. Оцінка змащувальної здатності твердих змащувальних матеріалів при шліфуванні важкооброблюваних жароміцних сталей / Титаренко О.В., Руднев О.В. // Збірник тез доповідей всеукраїнської науково-практичної конференції «Актуальні проблеми діяльності складових сектору безпеки і оборони України в умовах особливих правових режимів: поточний стан та шляхи вирішення», 2024 р. – С. 373 - 374. <https://nangu.edu.ua/uploads/files/Zbirnyk%20TEZ%2028.03.2024.pdf>
8. Study of the Effect of Solid Lubricant Composition on Surface Roughness of Ground Parts / Rudnev Aleksandr; Stepanov Mykhaylo; Gasanov Magomedimin; Permyakov Alexander; Kotliar Alexey; Ivanova Maryna; Edl Milan // Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1129. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_8 Ciobaotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024. ICoRSE 2024.

Bibliography (transliterated):

1. McKinney W. Python for Data Analysis: Data Wrangling with pandas, NumPy, and Jupyter. 2nd ed. O'Reilly Media, 2017. ISBN 978–1491957660.
2. Wasserman L. All of Statistics: A Concise Course in Statistical Inference. Springer, 2004. ISBN 978–0387402727.
3. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. 10th ed. Wiley, 2019. ISBN 978–1119492443.
4. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning. 2nd ed. Springer, 2021. ISBN 978–1071614174.
5. Otsenka effektivnosti prochnosti tverdykh splavov pri almaznom shlifovanii trudnoobrabotannykh splavov i staley / Stepanov M.S., Gasanov M.I., Rudnev A.V., Kotlyar O.V., Titarenko O.V., Ivanova M.S. Baranov V.M. // Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii = Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnika v mashinostroyenii: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Khar'kov. politekhn. in-t». – Khar'kov : NTU «KHPİ», 2024. № 2(10), 2024. – S. 3–8. – ISSN 2079-004KH, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.2(10).01 <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/a7341a28-bf2b-4045-9cf4-7fb6628d7d21>
6. Otsenka smachivayemosti tverdykh smachivayushchikh materialov pri almaznom shlifovanii vazhnykh materialov / Gasanov M.I., Rudnev A.V., Kotlyar O.V., Titarenko O.V., Korchagin I.G. // Visnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnologii v mashinostroyenii = Vestnik Natsional'nogo tekhnicheskogo universiteta «KHPİ». Seriya: Tekhnika v mashinostroyenii: zb. nauk.pr. / Nats. tekhn. un-t «Khar'kov. politekhn. in-t». – Khar'kov : NTU «KHPİ», 2024. № 1 (9) 2024. – S. 65–70. – ISSN 2079-004KH, ISSN 2786-7587, DOI: 10.20998/2079-004X.2024.1(9).9. <https://repository.kpi.kharkov.ua/items/55c7a8dd-57b3-4f0d-831a-ad6f1c754887>
7. Otsenka smachivayemosti tverdykh smachivayushchikh materialov pri shlifovke sil'noobrabotannykh zharomitskikh staley / Titarenko O.V., Rudnev O.V. // Sbornik tez dopovedey vseukrainskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii «Aktual'nyye problemy skladskoy otrasli bezpeki i obrony Ukrainy v umakh osobykh pravovykh periodov: potochnyy stan i shlyakhi virishenyya», 2024 g. – S. 373 - 374. <https://nangu.edu.ua/uploads/files/Zbirnyk%20TEZ%2028.03.2024.pdf>
8. Study of the Effect of Solid Lubricant Composition on Surface Roughness of Ground Parts / Rudnev Aleksandr; Stepanov Mykhaylo; Gasanov Magomedimin; Permyakov Alexander; Kotliar Alexey; Ivanova Maryna; Edl Milan // Lecture Notes in Networks and Systems, vol 1129. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-70670-7_8 Ciobaotă, D.D. (eds) International Conference on Reliable Systems Engineering (ICoRSE) - 2024. ICoRSE 2024.

Надійшла (received) 09.03.2026

Відомості про авторів / About the Authors

Матюшенко Микола Васильович (Matiushenko Mykola) – кандидат технічних наук, доцент кафедри "Геометричне моделювання та комп'ютерна графіка" Навчально-наукового інституту комп'ютерного моделювання, прикладної фізики та математики Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-64-31; e mail: Mykola.Matiushenko@kpi.edu.ua, ORCID: 0000-0003-4727-8993

Гасанов Магомедмін Ісамагомедович (Hasanov Magomedemin) – доктор технічних наук, професор кафедри «Технологія машинобудування та металорізальні верстати» Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-66-34; e-mail: kh.hpi.hasanov@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2161-2386

Руднев Олександр Віталійович (Rudnev Aleksandr) – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник кафедри «Інтегровані технології машинобудування» ім. М.Ф.Семка Навчально-наукового інституту механічної інженерії і транспорту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків; тел.: +38 (057) 707-61-43; e-mail: aleksandr1827.64@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4091-6748

Клочко Олександр Олександрович (Klochko Oleksandr) – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інтегровані технології машинобудування ім. М. Ф. Семка Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, вул. Кирпичова, 2, Україна; тел.:+38067-936-36-64, e-mail: ukrstanko21@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2841-9455.