

Н.О. Балицька, к.т.н., доц.
О.І. Прилипко, к.ф.-м.н., доц.
А.М. Шостачук, к.т.н., доц.
Л.Є. Глембоцька, к.т.н.
О.Л. Мельник, к.т.н., доц.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Аналіз кореляцій між фрактальною розмірністю та параметрами шорсткості фрезерованої поверхні

Функціональні властивості виробів залежать від комплексу факторів, при цьому одним із основних факторів є текстура їх поверхонь. Це пояснює значну увагу до визначення та формування таких параметрів текстури механічно обробленої поверхні, які б забезпечували необхідний рівень коефіцієнтів тертя під час ковзання та кочення, змочуваності, контактної жорсткості, зносостійкості за змінних навантажень, корозійної стійкості, маслоємності тощо. У роботі представлено результати дослідження кореляційного зв'язку між параметрами шорсткості і фрактальною розмірністю розподілу елементів площі поверхонь зразків з алюмінієвого сплаву Д16Т після торцевого фрезерування при змінних режимах різання. Було проведено два однофакторні експерименти, в першому змінним фактором була глибина різання, в другому – величина подачі, при цьому швидкість різання залишалася постійною. За допомогою цупового профілографа вимірювалися параметри шорсткості оброблених поверхонь. Визначення фрактальної розмірності Гаусдорфа виконувалося в програмі Gwyddion. Математична обробка результатів експериментального дослідження здійснювалася із застосуванням вибіркового коефіцієнта кореляції Пірсона. Це дозволило встановити наявність кореляційного зв'язку між параметрами шорсткості і фрактальною розмірністю поверхонь зразків зі сплаву Д16Т після торцевого фрезерування при змінних режимах різання. Обговорюються результати проведеного аналізу кореляційного зв'язку між параметрами шорсткості і фрактальною розмірністю поверхонь зразків. Обґрунтована необхідність подальших наукових пошуків для більш глибокого розуміння фізичних явищ, які відповідальні за весь комплекс параметрів текстури фрезерованої поверхні та їх вплив на функціональні властивості поверхонь виробів.

Ключові слова: фрактальний аналіз; текстура поверхні; торцеве фрезерування; режими різання.

Актуальність теми. Експлуатаційні показники поверхонь виробів визначаються фізико-механічними характеристиками матеріалу, станом та текстурою поверхневого шару. Текстурою поверхні зазвичай називають повторювані та випадкові відхилення від номінальної геометричної поверхні, які формують складну тривимірну топографію поверхні. У текстурі поверхні зазвичай вирізняють шорсткість, хвилястість, напрямок нерівностей, дефекти поверхні та відхилення форми в межах обмеженої ділянки поверхні.

Для нормування та кількісної оцінки параметрів мікрогеометрії поверхонь нині найбільшого поширення набув профільний метод (двовірний вимір), за яким текстуру поверхні оцінюють її профілем, а саме параметрами лінії перетину поверхні з нормальною площиною. ДСТУ ISO 4287:2012 [1] визначено шість параметрів оцінки шорсткості поверхні за профільним методом: висотні (R_a – середнє арифметичне відхилення профілю, R_z – висота нерівностей профілю по 10 точках, R_{max} – найбільша висота профілю), крокові (S – середній крок місцевих виступів профілю, S_m – середній крок нерівностей профілю по середній лінії), висотно-кроковий (tr – відносна опорна довжина профілю, де p – значення рівня перерізу профілю).

Відомо, що профільні методи вимірювання і оцінки мікрогеометрії поверхні характеризуються суттєвими обмеженнями, оскільки не беруть до уваги форму мікроелементів, їх відносне розташування тощо [2]. Тому застосування профільного методу оцінювання і контролю мікрогеометрії обмежує можливість її оптимізації для забезпечення конкретної функціональної властивості поверхні, оскільки не дозволяє точно описати необхідну текстуру поверхні при її нормуванні.

В той же час для ефективного використання та наступного розвитку сучасних технологій формування поверхневого профілю виробів застосування лише лінійних характеристик поверхні є недостатнім. Безумовно, більш інформативними є методи описання просторової мікроструктури поверхні, які зумовлюють її особливі фізичні властивості, а отже і функціональні властивості виробів. Це питання частково вирішується в ISO 25178-2:2021 [3], де параметри текстури поверхні визначаються

за допомогою аналізу її поверхневих (площинних або «ареальних») характеристик. Зрозуміло, що профіль, отриманий із тривимірної структури поверхні, не тотожний профілю, отриманому за допомогою профільних методів, через застосування різних математичних засобів фільтрації [2]. В Україні досі не було прийнято відповідного ДСТУ, що, безумовно, стримує ширше застосування такого підходу і негативно впливає на якість виробів різних галузей промисловості та результати наукових досліджень.

Сучасні оптичні 3D-профілометри дозволяють визначати ареальні параметри текстури поверхні, проте вони є дороговартісними приладами і тому ще не набули широкого розповсюдження.

Для теоретичного дослідження мікрогеометрії поверхонь виробів після лезової обробки особливий інтерес викликають відносно нові, нетривіальні математичні методи аналізу складних систем. До них можна зарахувати фрактальний аналіз самоподібних поверхневих мікроструктур, які формуються внаслідок дії різального інструменту на оброблювану поверхню [4]. Дійсно, інженерні поверхні являють собою фрактальні об'єкти, що охоплюють макрогеометрію, шорсткість і субшорсткість. Тому на додаток до відомих параметрів шорсткості за ДСТУ ISO 4287:2012 та параметрів текстури за ISO 25178-2:2021 варто використовувати фрактальні показники мікрорельєфу поверхні, зокрема розмірність Гаусдорфа D_s , яка є дробовою.

Аналіз останніх досліджень та публікацій, на які спираються автори. Засновником фрактальної геометрії є Бенуа Мандельброт [5], який вперше дав визначення поняття «фрактал». Згідно з [6] фрактал (від лат. fractus – подрібнений, дробовий) – це, у загальному розумінні, структура, що складається з частин, які подібні до цілого.

Видатний внесок у закладення основ і розвиток теорії фрактального аналізу (ФА) зробили Г.Кантор, Д.Пеано, К.Вейерштрас, Ф.Хаусдорф, В.Серпинський, А.С. Безикович та ін.

Відомі роботи колективу авторів С.В. Клименка, Ю.О. Мельничука та Г.В. Встовського [7], в яких досліджено зв'язок фрактальних характеристик структури й властивостей конструкційних матеріалів з їх оброблюваністю різанням, а також структури і властивостей твердих сплавів з працездатністю, оснащених ними різальних інструментів.

На сьогодні відомо про деякі роботи, присвячені розвитку та застосуванню ФА для описання мікрогеометрії поверхонь деталей після лезової обробки. У таких роботах, як правило, параметризується не оброблена поверхня і фрактальна розмірність її площі, а крива профілю поверхні. Таким чином реалізується формальний підхід до опису кривої профілю поверхні. При цьому фрактальна розмірність є додатковим чинником для аналізу впливу режимів різання на мікрогеометрію обробленої поверхні. Так у [8] повідомляється про протилежний вплив подачі, швидкості різання та твердості заготовки на параметр R_a шорсткості та фрактальну розмірність профілю поверхні. У [9] також максимальна фрактальна розмірність відповідає мінімальному значенню параметра шорсткості R_a . У [10] подібні залежності отримано як для сталевих заготовок, так і для заготовок з алюмінієвого сплаву. У всіх згаданих роботах фрактальна розмірність профілю поверхні перебувала в інтервалі від 1,05 до 1,43, тобто ґрунтувалася на аналізі двовимірних зображень поверхні, і не брала до уваги просторову текстуру.

Аналогічним є стан досліджень процесу кінцевого фрезерування різних матеріалів. Авторами робіт [11, 12] отримано принципово різні результати щодо впливу подачі на фрактальну розмірність кривої профілю обробленої поверхні з вуглецевої сталі та алюмінієвого сплаву.

У більшості робіт із фрактальної параметризації площі механічно обробленої поверхні розглядаються процеси точіння або кінцевого фрезерування. На сьогодні відомо лише про кілька подібних робіт, в яких досліджується поверхня після торцевого фрезерування. В [13, 14] визначалися фрактальні характеристики тільки лінії профілю обробленої поверхні ($1 < D < 2$) для аналізу та прогнозування взаємозв'язку між умовами різання та відповідними фрактальними параметрами оброблених поверхонь при торцевому фрезеруванні.

У попередніх роботах авторів цієї статті [2, 15–16] була показана перспектива застосування фрактального аналізу для описання розподілу елементів площі текстури поверхонь зразків зі сталі та алюмінієвого сплаву, сформованих торцевим фрезеруванням. Разом з тим аналіз літератури свідчить про недостатність ґрунтовних та масштабних робіт у цьому напрямі.

Метою статті є дослідження кореляційних зв'язків між фрактальною розмірністю розподілу елементів площі текстури і параметрами шорсткості поверхонь зразків із алюмінієвого сплаву Д16Т, оброблених торцевим фрезеруванням при змінних режимах різання.

Викладення основного матеріалу. Досліджувані зразки у вигляді пластин розмірами 35×35 мм товщиною 10 мм з алюмінієвого сплаву Д16Т (після загартування і штучного старіння) були оброблені на вертикально-фрезерному верстаті моделі 6Р12. Хімічний склад та механічні характеристики матеріалу зразків наведені в таблицях 1–2.

Для лезової обробки застосовувалася торцева фреза діаметром 40 мм з механічним кріпленням чотирьох п'ятигранних пластинок з твердого сплаву (ВК8 з NiTi-покриттям). Швидкість різання 130 м/хв (125 об/хв) була постійною, варіюваними параметрами обробки були обрані глибина різання t (1,0...2,5 мм) і подача фрези S (50...400 мм/хв). Фрезерування здійснювалося за симетричною схемою.

Хімічний склад алюмінієвого сплаву ДІ6Т (%)

Fe	Si	Mn	Cr	Ti	Al	Cu	Mg	Zn	Домішки	
до 0,5	до 0,5	0,3...0,9	до 0,1	до 0,15	90,9...94,7	3,8...4,9	1,2...1,8	до 0,25	Ti+Zr до 0,2	інші, кожна до 0,05; разом до 0,15

Таблиця 2

Механічні властивості алюмінієвого сплаву ДІ6Т при $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Межа короткочасної міцності σ_b , МПа	Межа текучості σ_t , МПа	Подовження при розриві, %	Твердість НВ, МПа
412	284	10	105

Вимірювання параметрів шорсткості поверхні проводилося щуповим методом за допомогою профілометра Mitutoyo SurfTest SJ-410.

Вивчалися залежності від глибини різання і подачі таких параметрів шорсткості: середньоарифметичне відхилення профілю R_a , середньоквадратичне відхилення профілю R_q , загальна висота профілю R_t , максимальна глибина місцевих нерівностей R_y , максимальна висота профілю R_z , максимальна висота піку профілю R_p , щільність піків R_s . Застосовувався фільтр профілю $\lambda_c = 2,5$. Базова довжина вимірювання складала 2,5 мм.

Типова профілограма фрезерованої поверхні зразка наведена на рисунку 1. Результати вимірювань параметрів шорсткості оброблених поверхонь зразків зазначені в таблиці 1.

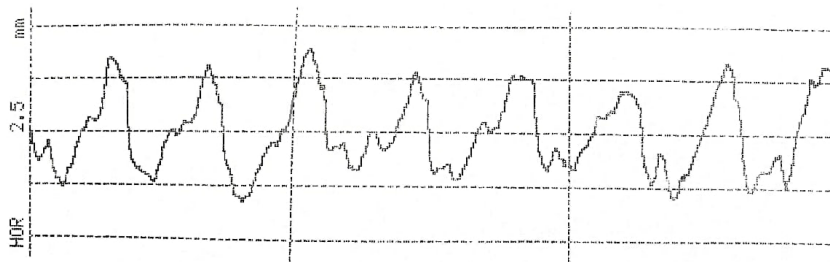


Рис. 1. Профілограма поверхні зразка зі сплаву ДІ6Т після торцевого фрезерування ($t = 1\text{ мм}$, $n = 125\text{ хв}^{-1}$, $S = 100\text{ мм/хв}$)

Для отримання фотографій оброблених поверхонь застосовувався цифровий фотоапарат Sunny P5v04a Raspberry Pi Model B+, який був змонтований безпосередньо на мікроскопі XS-2610 MICROmed. Фотографування поверхні проводилося у відбитому світлі. Однорідність освітлення досліджуваних поверхонь забезпечувалася використанням набору світлодіодів, які рівномірно розміщувалися на кільцевому тримачі навколо зразка. Умови зняття зображення рельєфу поверхні більш детально описані в попередній роботі авторів [15].

На рисунку 2 наведено типову фотографію текстури поверхні зразків. Наведені зображення були оброблені методом монофрактального аналізу розподілу площі поверхні зразків за допомогою обчислювальної програми Gwyddion.

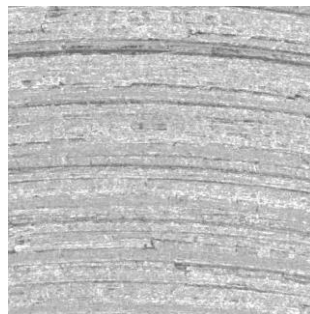


Рис. 2. Фотографія ($5 \times 5\text{ мм}$) текстури поверхні зразка зі сплаву ДІ6Т після торцевого фрезерування ($t = 1\text{ мм}$, $n = 125\text{ хв}^{-1}$, $S = 100\text{ мм/хв}$)

Результати вимірювання шорсткості та ФА фотографій оброблених поверхонь наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

Результати експерименту

	Параметри шорсткості							Фрактальна розмірність
	Ra, мкм	Rq, мкм	Rt, мкм	Ry, мкм	Rz, мкм	Rp, мкм	Pc, 1/см	Ds
t, мм	при глибині різання t (n = 125 хв ⁻¹ , S = 100 мм/хв)							
1,0	11,443	13,663	56,9	55,433	51,167	32,767	9,667	2,663
1,5	8,963	11,180	56,767	55,3	50,067	36,1	11,667	2,717
2,0	9,87	11,913	51,867	50,433	47,633	27,767	14,667	2,737
2,5	8,537	10,787	57,067	53,5	47,433	28,7	15	2,727
S, мм/хв	при подачі S (n = 125 хв ⁻¹ , t = 1,5 мм)							
50	7,04	8,437	42,267	41,767	35,433	23,1	22,333	2,45
100	8,963	11,18	56,767	55,3	50,067	36,1	11,667	2,483
200	17,51	20,29	79,467	77,333	73,467	42,233	7,0	2,53
400	12,557	15,69	72,7	72,7	65,367	40,167	10,333	2,477

Для визначення кореляційних зв'язків між фрактальною розмірністю та параметрами шорсткості фрезерованої поверхні розраховувався вибірковий коефіцієнт кореляції Пірсона r , який зазвичай застосовується для дослідження тісноти стохастичного лінійного зв'язку між двома вибірками випадкових величин. Він є мірою тісноти зв'язку між двома ознаками у припущенні, що між ознаками є лінійний зв'язок. Вибірковий коефіцієнт кореляції r є точковою оцінкою коефіцієнта кореляції генеральної сукупності [17].

Якщо задано дві вибірки випадкових величин X та Y обсягом n , то коефіцієнт кореляції Пірсона r шукають за формулою:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

де x_i – i -й елемент вибірки X ; y_i – i -й елемент вибірки Y ; \bar{x} – середнє значення вибірки X ; \bar{y} – середнє значення вибірки Y .

Якщо $r > 0$, то зв'язок між випадковими величинами X та Y додатній, тобто вони збільшуються або зменшуються одночасно. Якщо ж $r < 0$, то зв'язок між випадковими величинами X та Y від'ємний, тобто зі збільшенням однієї з них інша зменшується або навпаки [17].

Для якісної оцінки коефіцієнтів кореляції застосовуються різні шкали, найчастіше – шкала Чеддока. Залежно від значень коефіцієнта кореляції зв'язок може мати одну з оцінок:

- 0,1...0,3 – слабкий,
- 0,3...0,5 – помітний,
- 0,5...0,7 – помірний,
- 0,7...0,9 – високий,
- 0,9...1,0 – дуже високий.

Функціональну залежність зв'язку між двома вибірками випадкових величин встановлює регресійний аналіз. Вибіркове рівняння лінійної регресії має вид:

$$\bar{y}_x = ax + b. \quad (2)$$

Точкові оцінки параметрів a та b в рівнянні визначалися за допомогою методу найменших квадратів [17].

На рисунках 3–4 представлено графіки лінійної регресії між окремими параметрами шорсткості (середньоарифметичним відхиленням профілю Ra та щільністю піків Pc) і розмірністю Гаусдорфа Ds розподілу елементів площі площі поверхневої текстури фрезерованої поверхні.

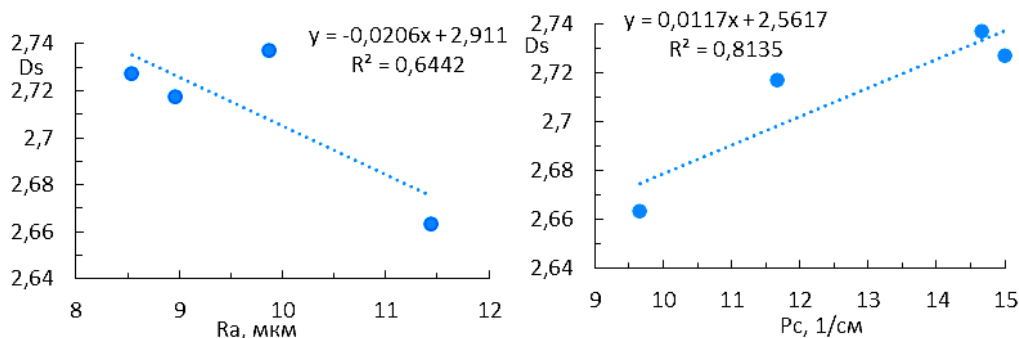


Рис. 3. Графік лінійної регресії між середньоарифметичним відхиленням профілю Ra (а), щільністю піків Pc (б) та розмірністю Гаусдорфа Ds при змінній глибині різання

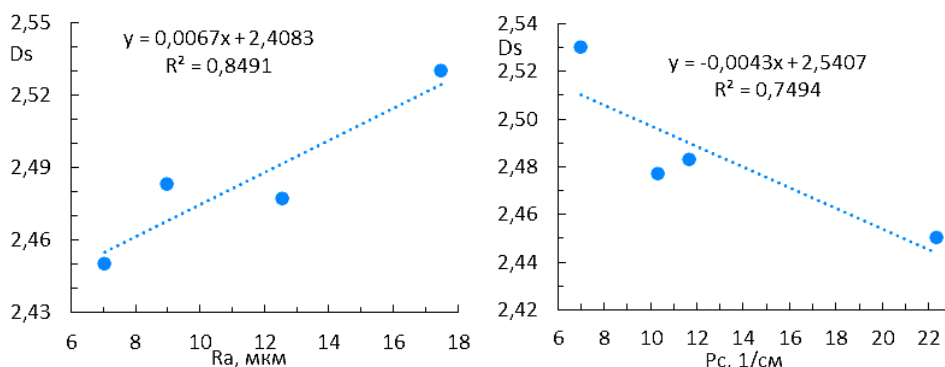


Рис. 4. Графік лінійної регресії між середньоарифметичним відхиленням профілю Ra (а), щільністю піків Pc (б) та розмірністю Гаусдорфа Ds при змінній подачі

У таблицях 4–5 наведено результати визначення кореляційного зв'язку між параметрами шорсткості і фрактальною розмірністю розподілу елементів площі поверхневої текстури зразків зі сплаву Д16Т після торцевого фрезерування при змінних режимах різання.

Таблиця 4

Коефіцієнт кореляції між параметрами шорсткості і розмірністю Гаусдорфа Ds розподілу елементів площі поверхневої текстури зразків при змінній глибині різання

Параметри шорсткості	Ra, мкм	Rq, мкм	Rt, мкм	Ry, мкм	Rz, мкм	Rp, мкм	Pc, 1/см
Ds	-0,803	-0,843	-0,516	-0,701	-0,869	-0,459	0,901

Таблиця 5

Коефіцієнт кореляції між параметрами шорсткості і розмірністю Гаусдорфа Ds розподілу елементів площі поверхневої текстури зразків при змінній величині подачі

Параметри шорсткості	Ra, мкм	Rq, мкм	Rt, мкм	Ry, мкм	Rz, мкм	Rp, мкм	Pc, 1/см
Ds	0,921	0,905	0,843	0,812	0,859	0,815	-0,866

Отримані результати свідчать про існування високого зворотного та дуже високого прямого кореляційного зв'язку між параметрами амплітуди кривої профілю за середнім значенням ординат (середньоарифметичне відхилення профілю Ra і середньоквадратичне відхилення профілю Rq) і розмірністю Гаусдорфа Ds поверхонь зразків зі сплаву Д16Т після торцевого фрезерування при змінних режимах різання. Вибірковий коефіцієнт кореляції Пірсона для параметрів Ra і Rq при зміні глибини різання становить -0,803 і -0,843, при зміні подачі – 0,921 і 0,905 відповідно. Тобто при збільшенні глибини різання спостерігається зменшення параметрів Ra і Rq, але при цьому фрактальна розмірність зростає. При зростанні величини подачі має місце протилежна залежність.

Також спостерігається високий (зміна подачі) та помірний (зміна глибини різання) кореляційний зв'язок між параметрами амплітуди кривої профілю (загальна висота профілю Rt, максимальна глибина місцевих нерівностей Ry, максимальна висота профілю Rz, максимальна висота піку профілю Rp) і

розмірністю Гаусдорфа D_s при зміні режимів різання. Вибірковий коефіцієнт кореляції Пірсона за абсолютним значенням при зміні подачі для зазначених параметрів більший ніж при зміні глибини різання. Виняток становить лише параметр R_z . Характер кореляційного зв'язку такий самий, як і для R_a та R_q .

Параметр щільності піків P_c дуже сильно (при зміні t) та сильно (при зміні S) корелює із фрактальною розмірністю D_s розподілу елементів площі поверхні. Характер кореляцій D_s із P_c протилежний до всіх інших параметрів. При зростанні глибини різання щільність піків зростає, але при цьому фрактальна розмірність зменшується.

Отже для отриманих результатів (табл. 4–5) спостерігається протилежний характер кореляцій. Це свідчить про наявність протилежних фізичних або геометричних властивостей параметрів текстури поверхні.

Для пояснення фізичних причин отриманих результатів вимагаються подальші більш глибокі експериментальні дослідження, що і стане предметом подальших досліджень авторів.

Одним із можливих напрямів подальших досліджень може бути мультифрактальний аналіз, який оперує більшою кількістю фрактальних показників і може надати більше кількісної інформації щодо описання поверхневої текстури зразків при змінних режимах різання.

Для більш глибокого розуміння, фізичних явищ, які відповідальні за весь комплекс параметрів текстури фрезерованої поверхні, їх зв'язок із фрактальними параметрами та їх вплив на функціональні властивості поверхонь виробів, потрібні подальші ґрунтовні експериментальні дослідження.

Висновки та перспективи подальших досліджень. Математична обробка результатів наведеного експериментального дослідження із застосуванням вибіркового коефіцієнта кореляції Пірсона встановила наявність тісного зв'язку між параметрами шорсткості (профільний метод) і розмірністю Гаусдорфа розподілу елементів площі поверхневої текстури зразків зі сплаву Д16Т після торцевого фрезерування при змінних режимах різання.

Аналіз отриманих результатів дозволив встановити такі зв'язки параметрів шорсткості за профільним методом із фрактальною розмірністю D_s при зміні глибини різання і величини подачі:

- параметри амплітуди кривої профілю за середнім значенням ординат (середньоарифметичне відхилення профілю R_a і середньоквадратичне відхилення профілю R_q) і D_s корелюють з коефіцієнтами кореляції вище 0,803 (за абсолютним значенням) в обох досліджуваних випадках;
- параметри амплітуди кривої профілю (загальна висота профілю R_t , максимальна глибина місцевих нерівностей R_u , максимальна висота профілю R_z , максимальна висота піку профілю R_p) і D_s корелюють з коефіцієнтами кореляції вище за 0,812 (за абсолютним значенням) при зміні подачі;
- параметри щільності піків P_c і D_s корелюють з коефіцієнтами кореляції вище за 0,866 (за абсолютним значенням) в обох досліджуваних випадках;
- спостерігається протилежний характер кореляцій між параметрами шорсткості і фрактальною розмірністю при зміні глибини різання і величини подачі.

Для пояснення фізичних причин отриманих результатів вимагаються подальші більш глибокі експериментальні дослідження, що і стане предметом подальших досліджень авторів. Одним із можливих напрямів подальших досліджень може бути мультифрактальний аналіз, який оперує більшою кількістю фрактальних показників і може надати більше кількісної інформації щодо описання поверхневої текстури зразків при змінних режимах різання.

Список використаної літератури:

1. ДСТУ ISO 4287:2012. Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури.
2. *Балицька Н.О.* Мультифрактальний аналіз текстури механічно обробленої поверхні / *Н.О. Балицька, П.П. Москвін, П.П. Мельничук* // Сучасні питання виробництва та ремонту в промисловості і на транспорті : матеріали 23-го Міжнародного наук.-тех. семінару, 15–16 березня. – Київ : АТМ України, 2023. – С. 3–5.
3. ISO 25178-2:2021. Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
4. Мультифрактальні параметри поверхневого мікрорельєфу, сформованого торцевим фрезеруванням / *П.П. Москвін, Н.О. Балицька, В.Б. Крижанівський, П.П. Мельничук* // Інженерія поверхні та реновація виробів : матеріали 22-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 15–16 червня. – Київ : АТМ України, 2022. – С. 90–93.
5. *Mandelbrot B.B.* The fractal geometry of nature / *B.B. Mandelbrot*. – San Francisco : Freeman, 1982. – 462 с.
6. *Benoît B.* Mandelbrot Fractals: Form, chance, and dimension / *B. Mandelbrot Benoît*. – San-Francisco : Freeman. – 1977. – 346 с.
7. *Клименко С.А.* Фрактальна параметризація структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту / *С.А. Клименко, Ю.О. Мельничук, Г.В. Встовський*. – Київ : ІНМ ім. В.М. Бакуля, 2009. – 171 с.
8. Development of fractal dimension and characteristic roughness models for turned surface of carbon steels / *X.Zuo, H.Zhu, Y.Zhou and other*. – Fractals. – 2016. – № 24 (4). DOI: 10.1142/S0218348X16500420.

9. Mukhopadhyay A. Optimization of fractal dimension of turned AISI 1040 steel surface considering different cutting conditions: fractal dimension of turned steel surface / A.Mukhopadhyay, M.Barman, P.Sahoo // *IJSEIMS*. – 2019. – № 7 (2). – P. 19–33.
10. Fractal geometry of metal surfaces obtained by turning / G.Petropoulos, W.Bouzid, C.Pandazaras, D.Dramalis // *Materials Technology*. – 2006. – № 21 (3), pp. 163–169.
11. Surface quality evaluation in meso-scale end-milling operation based on fractal theory and the Taguchi method / H.Mao, L.Jiao, J.Yi and other // *Int J Adv Manuf Technol*. – 2017. – № 91 (1–4). – P. 657–665.
12. Estimation of fractal dimension and surface roughness based on material characteristics and cutting conditions in the end milling of carbon steels / X.Zuo, H.Zhu, Y.Zhou, J.Yang // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*. – 2017. – № 231 (8). – P. 1423–1437.
13. Prediction of surface roughness profiles for milled surfaces using an artificial neural network and fractal geometry approach / I.A. El-sonbaty, U.A. Khashaba, A.I. Selmy, A.I. Ali // *J. Materials Processing Technology* – 2008. – № 200. – P. 271–278.
14. Gan B. Prediction of Surface Roughness Profiles for Milling Process with Fractal Parameters Based on LS-SVM / B.Gan, Y.J. Huang, G.X. Zheng // *In Advanced Materials Research*. – 2010. – Vol. 97–101, pp. 1186–1193. DOI: 10.4028/www.scientific.net/amr.97-101.1186.
15. Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling // P.Moskvin, N.Balytska, P.Melnichuk and other // *EEJET*. – 2017. – № 2 (1–86). – P. 9–15. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.96403.
16. Мультифрактальні параметри поверхневого мікрорельєфу, сформованого торцевим фрезеруванням / П.П. Москвін, Н.О. Балицька, В.Б. Крижанівський, П.П. Мельничук // *Інженерія поверхні та реновація виробів : матеріали 22-ї Міжнародної науково-технічної конференції, 15–16 червня*. – Київ : АТМ України, 2022. – С. 90–93.
17. Перегуда О.В. Статистична обробка даних : навч. посіб. / О.В. Перегуда, О.А. Капустян, О.Б. Курилко. – Електронне видання, 2022. – 103 с.

References:

1. DSTU ISO 4287:2012. *Tekhnichni vymohy do heometrii vyrobiv (GPS). Struktura poverkhni. Profilnyi metod. Terminy, vyznachennia poniat i parametry struktury*.
2. Balytska, N.O., Moskvin, P.P. and Melnychuk, P.P. (2023), «Мультифрактальний аналіз текстур механічно обробленої поверхні», *Suchasni pytannia vyrobnytstva ta remontu v promyslovosti i na transporti*, materialy 23-ho Mizhnarodnoho naukovo-tekhnicnoho seminaru, 15–16 bereznia, АТМ України, Kyiv, pp. 3–5.
3. ISO 25178-2:2021. *Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters*.
4. Moskvin, P.P., Balytska, N.O., Kryzhanivskiy, V.B. and Melnychuk, P.P. (2022), «Мультифрактальні параметри поверхневого мікрорельєфу, сформованого торцевим фрезеруванням», *Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv*, materialy 22-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii, 15–16 chervnia, АТМ України, Kyiv, pp. 90–93.
5. Mandelbrot, B.B. (1982), *The fractal geometry of nature*, Freeman, San Francisco, 462 p.
6. Benoît, V. Mandelbrot (1977), *Fractals: Form, chance, and dimension*, Freeman, San-Francisco, 346 p.
7. Klymenko, S.A., Melniichuk, Yu.O. and Vstovskyi, H.V. (2009), «Фрактальні параметризації структури матеріалів, їх оброблюваність різанням та зносостійкість різального інструменту», *INM im. V.M. Bakulia*, Kyiv, 171 p.
8. Zuo, X., Zhu, H., Zhou, Y. et al. (2016), «Development of fractal dimension and characteristic roughness models for turned surface of carbon steels», *Fractals*, No. 24 (4), doi: 10.1142/S0218348X16500420.
9. Mukhopadhyay, A., Barman, M. and Sahoo, P. (2019), «Optimization of fractal dimension of turned AISI 1040 steel surface considering different cutting conditions: fractal dimension of turned steel surface», *IJSEIMS*, No. 7 (2), pp. 19–33.
10. Petropoulos, G., Bouzid, W., Pandazaras, C. and Dramalis, D. (2006), «Fractal geometry of metal surfaces obtained by turning», *Materials Technology*, No. 21 (3), pp. 163–169.
11. Mao, H., Jiao, L., Yi, J. et al. (2017), «Surface quality evaluation in meso-scale end-milling operation based on fractal theory and the Taguchi method», *Int J Adv Manuf Technol*, No. 91 (1–4), pp. 657–665.
12. Zuo, X., Zhu, H., Zhou, Y. and Yang, J. (2017), «Estimation of fractal dimension and surface roughness based on material characteristics and cutting conditions in the end milling of carbon steels», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, No. 231 (8), pp. 1423–1437.
13. El-sonbaty, I.A., Khashaba, U.A., Selmy, A.I. and Ali, A.I. (2008), «Prediction of surface roughness profiles for milled surfaces using an artificial neural network and fractal geometry approach», *J. Materials Processing Technology*, No. 200, pp. 271–278.
14. Gan, B., Huang, Y.J. and Zheng, G.X. (2010), «Prediction of Surface Roughness Profiles for Milling Process with Fractal Parameters Based on LS-SVM», *In Advanced Materials Research*, Vol. 97–101, pp. 1186–1193, doi: 10.4028/www.scientific.net/amr.97-101.1186.
15. Moskvin, P., Balytska, N., Melnychuk, P. et al. «Special features in the application of fractal analysis for examining the surface microrelief formed at face milling», *EEJET*, No. 2 (1–86), pp. 9–15, doi: 10.15587/1729-4061.2017.96403.
16. Moskvin, P.P., Balytska, N.O., Kryzhanivskiy, V.B. and Melnychuk, P.P. (2022), «Мультифрактальні параметри поверхневого мікрорельєфу, сформованого торцевим фрезеруванням», *Inzheneriia poverkhni ta renovatsiia vyrobiv*, materialy 22-yi Mizhnarodnoi naukovo-tekhnicnoi konferentsii, 15–16 chervnia, АТМ України, Kyiv, pp. 90–93.
17. Perehuda, O.V., Kapustian, O.A. and Kurylko, O.B. (2022), *Statystychna obrobka danykh*, навч. посіб., Електронне видання, 103 p.

Балицька Наталія Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-1363-8110>.

Наукові інтереси:

- забезпечення експлуатаційних характеристик виробів формуванням періодичної текстури поверхонь;
- дослідження процесів механічної обробки важкооброблюваних матеріалів;
- проектування різальних інструментів.

Прилипка Олександр Іванович – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0003-0783-1942>.

Наукові інтереси:

- математичне моделювання;
- багатофакторне оцінювання і прийняття рішень;
- теоретико-алгебраїчні дослідження систем диференціальних рівнянь.

Шостачук Андрій Миколайович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-4924-1222>.

Наукові інтереси:

- дослідження процесів механічної обробки матеріалів;
- стійкість висотних споруд;
- дискретна математика.

Глембоцька Лариса Євгенівна – кандидат технічних наук, доцент кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7234-4246>.

Наукові інтереси:

- дослідження процесів механічної обробки важкооброблюваних матеріалів;
- проектування різальних інструментів.

Мельник Олександр Леонідович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри механічної інженерії Державного університету «Житомирська політехніка».

<https://orcid.org/0000-0002-7081-7513>.

Наукові інтереси:

- композиційні матеріали;
- комп'ютерне імітаційне моделювання конструкцій та процесів у машинобудуванні;
- адитивні технології;
- дослідження процесів механічної обробки матеріалів.

Balytska N.O., Prylypko O.I., Shostachuk A.M., Hlembotska L.Ye., Melnyk O.L.

Analysis of correlations between the fractal dimension and parameters of milled surface roughness

The functional properties of products depend on a number of factors, with one of the main factors being the texture of their surfaces. This explains the considerable attention paid to the determination and formation of such parameters of the machined surface texture that would provide the required level of sliding and rolling friction coefficients, wettability, contact stiffness, wear resistance under variable loads, corrosion resistance, oil capacity, etc. This paper presents the results of a study of the correlation between the roughness parameters and the fractal dimension of the distribution of surface area elements of D16T aluminum alloy samples after face milling under variable cutting conditions. Two one-factor experiments were conducted, in the first, the depth of cut was a variable factor, in the second, the feed rate was a variable factor, while the cutting speed remained constant. The roughness parameters of the machined surfaces were measured using a stylus profilograph. The determination of the fractal Hausdorff dimension was performed in the Gwyddion software. Mathematical processing of the experimental study results was carried out using Pearson's sample correlation coefficient. This made it possible to establish the existence of a correlation between the parameters of roughness and the fractal dimension of the surfaces of D16T alloy samples after face milling under variable cutting conditions. The results of the analysis of the correlation between the parameters of roughness and the fractal dimension of the surfaces of samples are discussed. The necessity of further scientific research for a deeper understanding of the physical phenomena responsible for the whole range of milled surface texture parameters and their influence on the functional properties of product surfaces is substantiated.

Keywords: fractal analysis; surface texture; face milling; cutting modes.

Стаття надійшла до редакції 03.04.2023.