

УДК 621.9.01:519.233.5

**Manojit Das, Soumya R. Parimanik,  
Trupti Ranjan Mahapatra\*, Debadutta Mishra,  
Dilip Kumar Sahu**

Department of Production Engineering,  
Veer Surendra University of Technology, Burla, Odisha, India  
\*trmahapatra\_pe@vssut.ac.in

## **Характеристики, моделювання оброблюваності та покращення продуктивності механічної обробки зміцненого графеном алюмінієвого метал-матричного композита за допомогою методів поверхні відгуку на основі центрального композиційного плану та корисності**

*Досліджено оброблюваність алюмінієвого металевого матричного композита (АММК) на основі графену з використанням полікристалічного алмазного інструмента з карбідною вставкою в сухому середовищі та порівнено його з оброблюваністю чистого алюмінію. АММК синтезували у процесі зміцнення частинками графену (0, 0,5, 1, 2 і 3 % (за масою)) за допомогою процесу лиття з перемішуванням і визначали їхню щільність, розтягування, стиснення, мікротвердість та морфологічні властивості. Оптимізацію реакції виконують для мінімізації двох факторів шорсткості поверхні ( $R_a$  і  $R_z$ ), зменшення споживання енергії та вібрації (середнє прискорення). Для планування експериментів реалізовано метод поверхні відгуку на основі центрального композиційного плану (МПВ на основі ЦКП) та подальше регресійне моделювання відгуку вищого порядку фактичних результатів процесу. Характеристика та оброблюваність АММК, що містять більше (1, 2 і 3) % (за масою) графену, вперше досліджено разом з оптимізацією багатьох характеристик ( $R_a$ ,  $R_z$ , енергоспоживання та вібрація). Оптимальна комбінація параметрів процесу, що приводить до одночасної мінімізації всіх відгуків, також отримана за допомогою концепції корисності, порівняно з тими, які отримані за допомогою підходу бажаності в методі поверхні відгуку і перевірені через проведення підтверджувального тесту. Покращення значень шорсткості поверхні (7,85 і 36,26 % для  $R_a$  і  $R_z$  відповідно) і середнє прискорення (18,09 %) спостерігали за допомогою методу корисності в порівнянні з МПВ на основі ЦКП. Також спостерігали покращені вихідні результати порівняно з оброблюваністю чистого алюмінію.*

© MANOJIT DAS, SOUMYA R. PARIMANIK, TRUPTI RANJAN MAHAPATRA, DEBADUTTA MISHRA,  
DILIP KUMAR SAHU, 2023

**Ключові слова:** оброблюваність, графен, алюмінієвий металевий матричний композит, центральний композиційний план, метод корисності, дисперсійний аналіз.

## ВСТУП

Алюмінієві сплави використовують для заміни звичайних матеріалів (таких як чавун і сталь) у різних галузях промисловості, де висувають суворі вимоги щодо зменшення ваги вироблених товарів. Вага алюмінієвого сплаву (з щільністю  $2,7 \text{ г/см}^3$ ) приблизно на 65 % менша, ніж чавуну, разом із високою електро- та теплопровідністю, підвищеною зносостійкістю та механічними властивостями. Проте традиційні Al-сплави не мають всіх цих властивостей, що змушує розробляти алюмінієві металеві матричні композити (АММК) [1, 2]. Для металевого матричного композита (ММК) одним із компонентів є якийсь метал, а титан, алюміній і магній зазвичай використовують у виробництві ММК як другий метал. Однак матеріал для зміцнення, що використовують, зазвичай змінюють відповідно до потреб продукту, оскільки він значно впливає на фізичні якості [3]. Минулі дослідження показують, що використання керамічних зміцнювачів, таких як  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiC}$ ,  $\text{B}_4\text{C}$ ,  $\text{SiC}$ , нітрид кремнію [4] тощо, покращує міцність, твердість і зносостійкість алюмінію та його сплавів. Однак використання для армування частинок мікронного розміру призводить до легкого руйнування на межі розділу слабкої матриці та армування, де ініціюється тріщина. Це обмеження можна подолати, якщо використовувати наночастинки графену як зміцнюючий матеріал. Графен – це алотроп вуглецю, який має одношарову двовимірну кристалічну гексагональну ґратку атомів вуглецю. Завдяки високій міцності на розрив, модулю Юнга, низькій щільності, а також винятковій тепло- та електропровідності графену, він був основним для зміцнення сплавів на основі алюмінію [5–8]. Ці алюмінієво-графенові ММК забезпечують більш універсальні властивості порівняно з іншими алюмінієвими композитами. Щодо цього, графіт є перспективним матеріалом для використання в деяких ММК для зменшення сил різання під час механічної обробки завдяки його властивостям самозмащення. Посилені графеном АММК можна застосовувати в різних високопродуктивних галузях, таких як автомобільна, космічна, авіаційна, електротехнічна та електроніка, накопичувачі енергії, акумуляторна промисловість тощо.

Для виготовлення необхідних ММК застосовують різні технології виробництва в залежності від основного матеріалу матриці. Гібридні АММК можуть виготовляти рідким або твердотільним способом. Реактивна обробка, осадження розпиленням [9], лиття інфільтрацією [10] і лиття з перемішуванням [11–13] є деякими з процесів рідинного способу, які використовують для виробництва АММК. Аналогічно, методи осадження з парової фази, дифузійне з'єднання та порошкова металургія є процесами, прийнятими у випадку твердотільного методу [14–17]. У методі порошкового помелу алюмінієво-графеновий композит готують шляхом додавання частинок графену до алюмінієвого порошку з наступними вторинними процесами, такими як прокатка, екструзія тощо. Лиття також є економічним способом виробництва ММК, оскільки воно може синтезувати велику кількість композита. Процес лиття з перемішуванням [18–20], одностадійний процес лиття [21], метод лиття з інфільтрацією під тиском [22] – це деякі з процесів лиття, які використовували раніше. Однак одним із головних недоліків синтезу зміцненого графеном АММК за допомогою лиття з перемішуванням є подріблення мікроструктури поверхні [18]. Додавання наночастинок графену понад  $0,5 \%^1$  зменшує подріб-

<sup>1</sup> Тут і далі кількість графену наведено в % (за масою).

нення зерна через насичення міжзерної границі, що призводить до зниження міцності композита на розтяг. Цей недолік можна подолати, розробивши ММК за допомогою процесу перемішування тертям (ППТ), що сприяє появі значної пластичної деформації [23]. ППТ – це твердотільний процес виробництва ММК, у якому використовують невитратний інструмент для нагрівання поверхні заготовки (металу) шляхом обертання. Внаслідок тертя і пластичної деформації відбувається зменшення поверхні заготовки, що приводить до рекристалізації на поверхні з утворенням дрібнозернистої мікроструктури. Різні дослідники [24, 25] повідомляли про механічні та трибологічні властивості АММК за допомогою ППТ. Багаторазовий ППТ також використовують для підвищення міцності на розтягування та межі текучості ММК порівняно з одноразовим підходом [26, 27], що приводить до ефективного заповнення мікроотворів, присутніх у чистому алюмінії [28], збільшуючи його міцність на розтяг. Крім того, було досягнуто чудові теплопровідність і міцність на розтяг разом із низькою щільністю порівняно з матеріалами *in situ*.

За певний період часу було розроблено декілька методів для розв'язання задач оптимізації з кількома змінними [29]. Бірн і Тагучі розробили методологію (відому як підхід Тагучі), де залежні відгуки оптимізуються незалежно [30]. Множинний відгук пояснюється розподілом ваг співвідношення сигнал/шум (С/Ш) кожного вихідного відгуку, а потім загальна продуктивність задачі обчислюється шляхом підсумовування зважених співвідношень С/Ш. Для таких задач реалізовано концепцію корисності разом з методом Тагучі [31–33]. Аналіз функції бажаності є ще одним методом знаходження оптимальних параметрів як для одноцільової, так і для багатоцільової оптимізації [34]. У [35] досліджували алюмінієві сплави AS12 і AS17 після тонкої токарної обробки з використанням алмазного різального інструменту (DCGW 11T304 як інструментальна вставка) та за допомогою методу планування експерименту (МПЕ) і виконали мультиоптимізацію впливу швидкості подачі та швидкості різання на сили різання та шорсткість поверхні ( $Ra$ ) під час обробки наногібридного композита ( $nB_4C$ ,  $nB_4C/MoS_2$ , наповнені частинками сплаву Al2219) [36]. У [37] виконали операцію точіння гібридного композита Al7075 і твердого керамічного композита Al7075 за допомогою полікристалічного алмазного (ПКА) інструменту. Досліджено вплив головного кута інструменту в плані, швидкості різання та швидкості подачі на  $Ra$ . Встановлено, що швидкість подачі робить більш значний внесок у відгуки для обох заготовок порівняно з іншими вхідними факторами, коли отримані результати досліджують методом поверхні відгуку (МПВ) і штучною нейронною мережею (ШНМ). У [38] виконано операцію дуплексного точіння сталі AISI1040 за допомогою різального інструменту зі швидкорізальної сталі (ШРС). Розроблено математичну модель з використанням гібридної методики на основі методів Тагучі і поверхні відгуку для оптимізації параметра для операції точіння. Оптимальний параметр, отриманий за методом Тагучі, використовували як центральну точку для МПВ. У [39] виконали операцію сухого точіння Al–Mg<sub>2</sub>Si різальним інструментом зі вставками марки K10U. Експериментальні випробування розроблені за методом планування експерименту Тагучі та проаналізовані за допомогою дисперсійного аналізу (ДА). У [40] виконали сухе точіння металевих матричних композитів Al–4,5 % Cu/TiC. Досліджено вплив глибини різання, швидкості подачі та швидкості різання на шорсткість і силу різання. У [41] було розв'язано багатоцільову оптимізацію за допомогою нейро-нечіткого моделювання. Вони об'єднали як штучну нейронну мережу, так і нечіткий реляційний аналіз, щоб отримати кращі результати шляхом усунення їхніх обмежень. У [42] викорис-

тали метод корисності для багатокритеріальної оптимізації технологічних параметрів твердого точіння сталі марки EN 24. У [43] використовували ШНМ та нечіткі методи для отримання оптимального параметра процесу для електроерозійної обробки АММК.

На основі попередніх досліджень зроблено висновок, що дослідження, пов'язані з точінням армованих наночастинками металевих матричних композитів, є обмеженими, і необхідна глибша інформація щодо механічної обробки та оброблюваності армованих графеном алюмінієвих металевих матричних композитів. Метою цього дослідження є виконання зворотного аналізу та оптимізації експериментальних вхідних параметрів для сухого точіння зміцненого графеном АММК, виготовленого за допомогою процесу лиття з перемішуванням. Для цього проводили експерименти відповідно до методу поверхні відгуку на основі центрального композиційного плану (МПВ на основі ЦКП), а затим здійснювали регресійне моделювання відгуку вищого порядку для значимих вихідних даних процесу ( $Ra$ ,  $Rz$ , споживання електроенергії та середнє прискорення). Вплив вхідних змінних (швидкості різання, швидкості подачі, глибини різання та вмісту графену) на показники продуктивності досліджували за допомогою дисперсійного аналізу, а показники вимірювання продуктивності оптимізували за допомогою підходу бажаності методу поверхні відгуку. Крім того, виконували оптимізацію вихідних відгуків за допомогою методу корисності, а також виконували спеціальні тести для підтвердження того, що використана методика дає кращі результати.

## МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИ

Алюміній, стійкий до корозії, легкий матеріал, у цьому дослідженні було використано як матеріал металевої матриці, який є дешевшим порівняно з іншими металевими матрицями. Крім того, посилені графеном ММК привернули велику увагу завдяки їхній кращій функціональній поведінці разом із кращими механічними та металургійними властивостями [44]. Що стосується методів виробництва ММК, то метод лиття з перемішуванням (який включає виробництво розплаву матеріалу матриці, а потім зміцнення вибраного матеріалу відповідним диспергуванням під час перемішування) є найбільш економічним. Для дослідження оброблюваності алюмінієво-графенового ММК виготовляли циліндричні зразки діаметром 25 мм і довжиною 120 мм з різним (0, 0,5, 1, 2 і 3 %) вмістом графену і використовували їх для операції сухого точіння.

### Підготовка зразка

Зразки для експерименту готували методом лиття з перемішуванням. Різну (0, 0,5, 1, 2 і 3 %) кількість графену змішували з відповідною кількістю алюмінієвого порошку за допомогою мішалки (рис. 1, *a*) і поміщали всередину тигля. Потім суміш порошку графену та алюмінію нагрівали до температури вище 700 °С (температура плавлення алюмінію) всередині печі (див. рис. 1, *b*) у середовищі азоту. Стан майже без домішок був досягнутий підготовкою прес-форми (див. рис. 1, *в*) з надлишковим допуском, щоби компенсувати наслідок усадки. Червоний пісок використовували для приготування форми через його доступність і економічність. В якості дегазуючих агентів використовували аргон, азот і гексахлоретан. Нарешті, розплавлений метал із графеновим армуванням безперервно перемішували механічними засобами (600 об/хв) і поміщали у форму (див. рис. 1, *г*), давали йому затвердіти та розкривали, щоб отримати необхідний зразок (див. рис. 1, *е*).

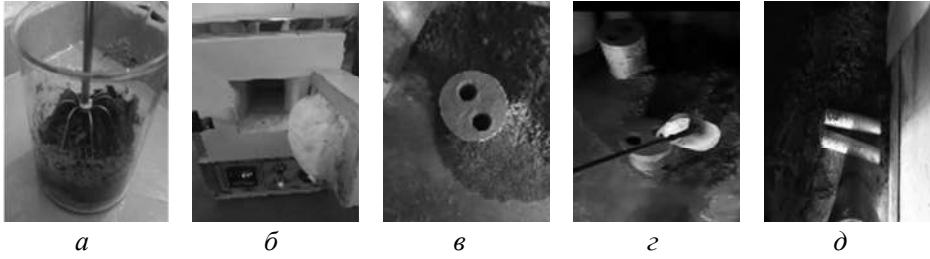
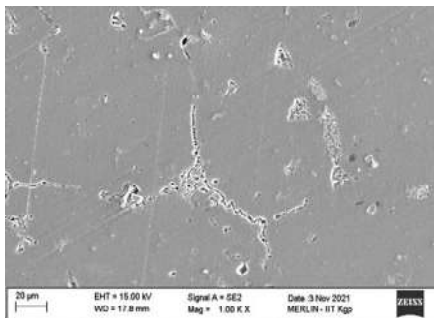


Рис. 1. Етапи підготовки армованих графеном циліндричних зразків АММК: змішування порошку мішалкою (а), плавлення в печі (б) форма для циліндричного зразка (в), лиття (г) та підготовлена відливка (д) зразка.

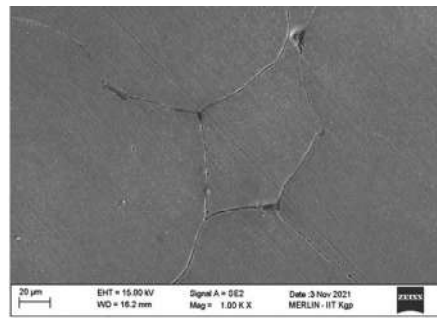
### Мікрофотографії та енергодисперсійний рентгенівський аналіз

Після підготовки зразка кількість алюмінію та вуглецю визначали за допомогою скануючої електронної мікроскопії (СЕМ), а також енергодисперсійного рентгенівського аналізу (ЕДРА), як показано на рис. 2. На рис. 3 показано мікрознімки розроблених ММК, армованих графеном, із 1000-кратним збільшенням для виявлення наявності мікропор. ЕДРА підтверджує, що вміст вуглецю поступово збільшувався, коли до матриці додавали графен. Варто відзначити зменшення мікропор зі збільшенням кількості частинок графену в чистому алюмінієвому сплаві.



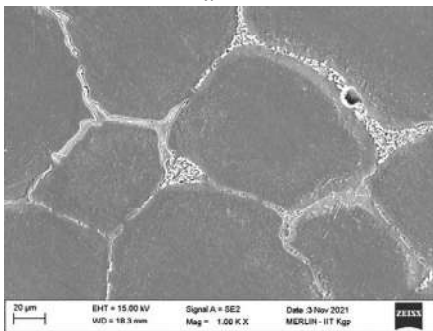
| Elements | wt. % | Atomic % |
|----------|-------|----------|
| Al       | 92.41 | 84.41    |
| C        | 7.59  | 15.59    |

а



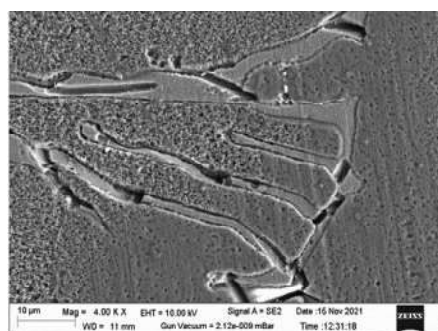
| Elements | wt. % | Atomic % |
|----------|-------|----------|
| Al       | 91.06 | 82.36    |
| C        | 7.90  | 16.06    |
| O        | 1.04  | 1.58     |

б



| Elements | wt. % | Atomic % |
|----------|-------|----------|
| Al       | 90.74 | 81.34    |
| C        | 9.26  | 18.66    |

в



| Elements | wt. % | Atomic % |
|----------|-------|----------|
| Al       | 86.99 | 74.86    |
| C        | 13.01 | 25.14    |

г

Рис. 2. СЕМ-зображення та ЕДР-аналіз Al-ММК, армованого графеном в кількості 0,5 (а), 1 (б), 2 (в) і 3 (г) % (за масою).

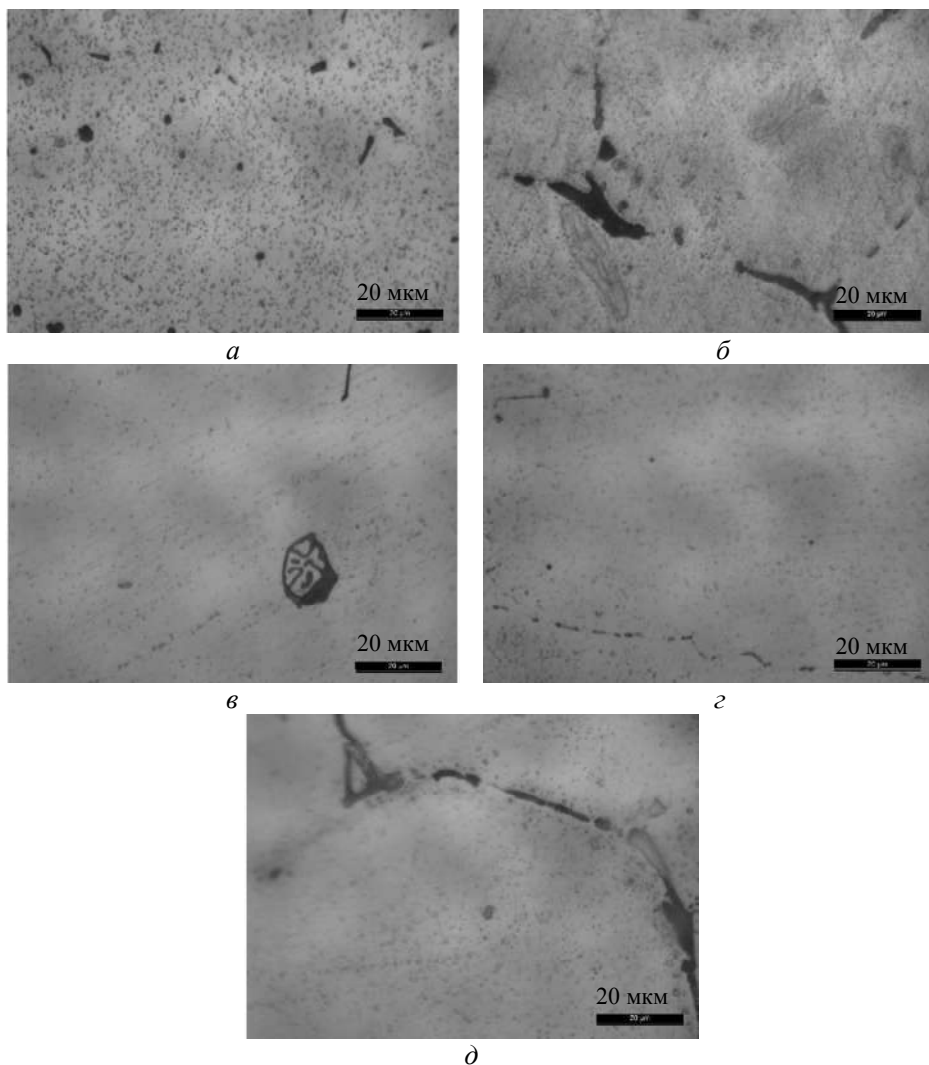


Рис. 3. Мікроснімки АММК, армованого графеном в кількості 0 (а), 0,5 (б), 1 (в), 2 (г) і 3 (д) % ( за масою);  $\times 1000$ .

### Характеристика механічних властивостей

Після синтезу алюмінієво-графенового ММК з необхідним армуванням у окремих зразків перевірили їхню щільність, міцність під час розтягування і стиску та твердість (табл. 1).

*Результати тесту на щільність.* Щільність заготовок з різною кількістю графену наведено в табл. 1. У даному випадку щільність синтезованого ММК менша порівняно з щільністю чистого алюмінію в разі додавання графену. Це можна пояснити тим фактом, що чистий алюміній, який використовували для синтезу, є пористим, і тому під час плавлення і перемішування в присутності графену відбувається атомна дифузія. Також відомо, що ступінь дифузії атомів визначається температурою під час синтезу, кількістю графену, тривалістю та якістю перемішування. Оскільки температуру підтримували на рівні  $\sim 700$  °С протягом  $\sim 2$  год, а перемішування здійснювали за допомогою ультразвукового приладу для досягнення його належного рівня, це привело до більшої атомної дифузії зразків з більшим вмістом графену, а згодом призведе-

ло до зниження щільності. Це може бути результатом пористості алюмінієвого матеріалу та атомної дифузії алюмінію і графену за високих температур.

**Таблиця 1. Різні властивості виготовленого АММК**

|  | Графен, % |         |         |         |         |
|--|-----------|---------|---------|---------|---------|
|  | 0         | 0,5     | 1       | 2       | 3       |
| Щільність, мг/мм <sup>3</sup>                        | 2,70458   | 2,633   | 2,58681 | 2,57685 | 2,57989 |
| Міцність під час розтягування, МПа                   | 420,445   | 139,612 | 137,973 | 132,477 | 141,526 |
| Видовження, %  | 21,12     | 5,54    | 2,84    | 3,68    | 3,24    |
| Зменшення площі, %                                   | 49,158    | 0,635   | 6,437   | 0,16    | 0,635   |
| Міцність під час стиску, МПа                         | 429,516   | 398,07  | 402,394 | 389,581 | 403,228 |
| Твердість за Віккерсом, <i>HV</i>                    | 61,3      | 62,4    | 63,8    | 65,6    | 73,9    |
| Збільшення твердості порівняно з чистим алюмінієм, % | –         | 1,70    | 4       | 7       | 20      |

*Результат випробування на розтягування.* Випробування зразків на розтягування проводили за кімнатної температури в універсальній випробувальній машині (UTM) для вимірювання таких властивостей, як границя міцності під час розтягування, максимальне подовження та зменшення площі. Для випробування на розтягування зразки готували згідно з ASTM B557 так, щоб вони мали діаметр 12,5 мм і довжину 50 мм. Результати випробування на розтягування зображені в табл. 1. У разі введення графену спостерігали зменшення міцності під час розтягування, що видно із залежності напруги від деформації, і меншою порівняно з чистим алюмінієм (рис. 4). Збільшення кількості графену призводить до значного зменшення видовження та зміни площі поперечного перерізу (див. табл. 1), що є чітким свідченням того, що із армуванням графеном матеріал став більш крихким, що й очікувалося. Крім того, на рис. 5 показано зразок після випробування на розтягування. Видно, що деформація зразка із чистого алюмінію характеризується появою шийки, що вказує на пластичну природу матеріалу, а алюмінієво-графеновий ММК зазнав крихкого руйнування.

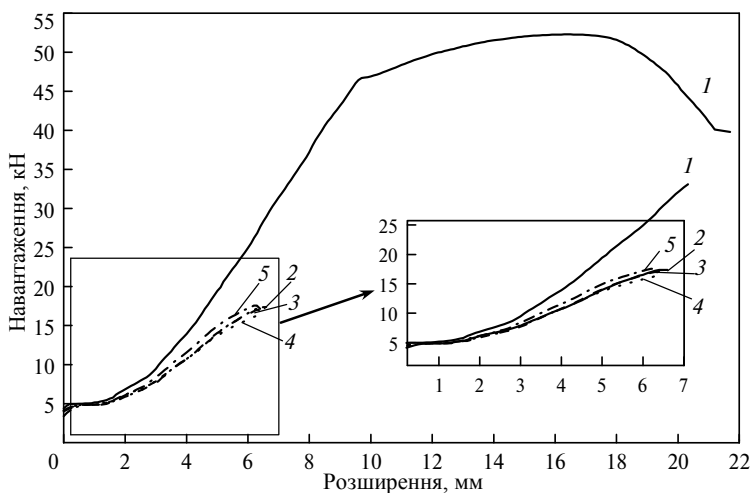


Рис. 4. Крива навантаження–видовження АММК, армованого додаванням 0 (1), 0,5 (2), 1 (3), 2 (4), 3 % (за масою) графену (5).

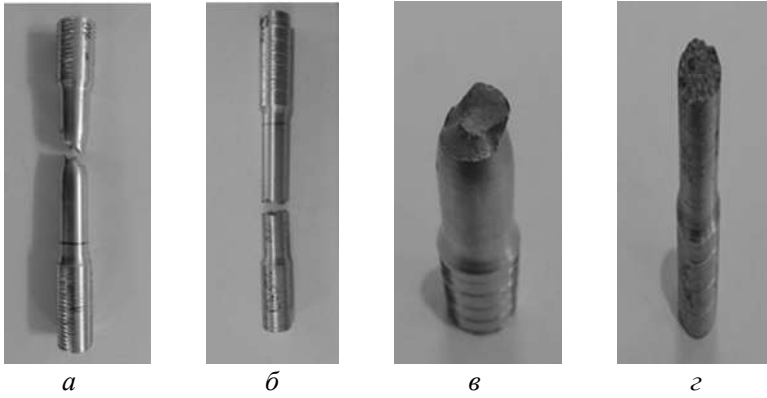


Рис. 5. Зразки, що випробували на розтягування, після їхнього руйнування: *а* – алюмінієвий зразок; *б* – АММК (1 % (за масою) графену); *в* – звуження у формі шийки для алюмінієвого зразка; *г* – крихке руйнування АММК (1 % (за масою) графену).

*Результат тесту на стиск.* Випробування на стиск виконували, щоб з'ясувати міцність на стиск ММК та їхню здатність відновлюватися після застосування певної сили стиску або навіть утримання протягом певного періоду. Із залежності навантаження від стиску, представленої на рис. 6, можна зробити висновок, що тримальна здатність під час стиску для армованих графеном композитів є більшою порівняно з чистим алюмінієм. Для чистого алюмінію не було значного збільшення напруги до зсуву 6 мм, що означає, що в разі прикладення мінімального навантаження чистий алюміній різко стискається. На рис. 6 видно, що АММК, армований графеном (1 %), має найменшу деформацію з найвищою тримальною здатністю до навантаження в умовах стиснення. Проте міцність під час стиску усіх зразків не має істотної різниці і коливається в діапазоні 389–430 МПа (див. табл. 1).

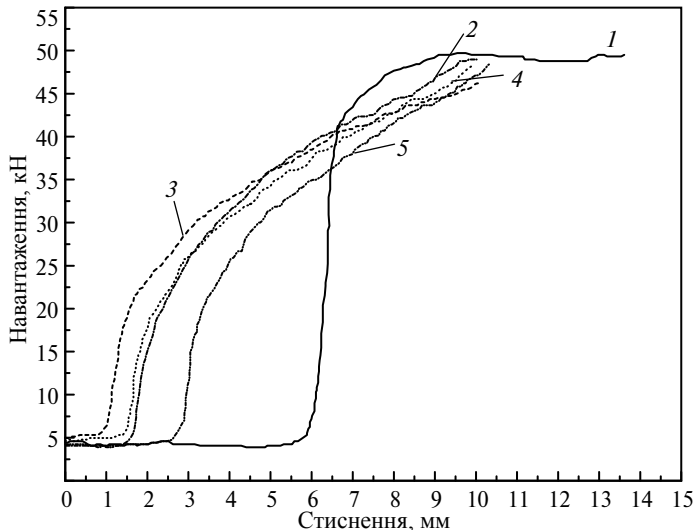


Рис. 6. Крива навантаження–розтягнення за стискаючого навантаження 0 (1), 0,5 (2), 1 (3), 2 (4), 3 (5) % (за масою) графену.

*Результат випробування на твердість.* Випробування на твердість за Віккерсом виконували відповідно до стандарту ASTM E384. Розраховували



середнє значення твердості за даними в трьох точках для кожного типу АММК, а результат було зведено в табл. 1. З результатів випробувань видно, що з армуванням графеном у АММК твердість збільшується порівняно з чистим алюмінієм. Із наведених даних також видно, що зразок із вмістом 3 % графену має найвище значення твердості серед випробуваних матеріалів. Збільшення твердості пояснюється високою концентрацією графену в АММК.

### Верстат і різальний інструмент

На оброблюваність ММК, особливо гібридних ММК, суттєво впливає наявність армуючого матеріалу, оскільки армуючі частинки поведуться як різальна кромка завдяки своїй абразивній природі та призводять до швидкого зносу інструменту, а також до вібрації у верстаті. Отже, оброблюваність і продуктивність обробки ММК з армуванням графеном і без нього час від часу ретельно перевіряли. Токарний верстат з ЧПУ виробництва МТАВ (Індія) було вибрано для виконання операції точіння виготовлених на даний момент алюмінієво-графенових ММК. Пластина DCGT11T304 NS LT05, яку використовували у вищезгаданому токарному верстаті з ЧПУ, є твердосплавною. Для початкового сухого різання планували виконати різання з твердосплавним сплавом, а потім замінити його пластинами ПКА або CBN. Виходячи з огляду літературних даних, це пояснюється тим, що CBN/ПКА є кращими, ніж твердосплавні пластини, і їх можна використовувати на високій швидкості різання. Пластини ПКА, використані в цьому аналізі, виготовлені з алюмінію і мають геометрію інструменту DCMW 11T 302 PD 103 із радіусом при вершині 0,2 мм. Відповідно було обрано специфікацію тримача інструменту SDSCL-121211-F3 і вставку. Паяну частину наконечника ПКА із зображенням твердосплавної основи та СЕМ-зображенням наконечника показано на рис. 7.

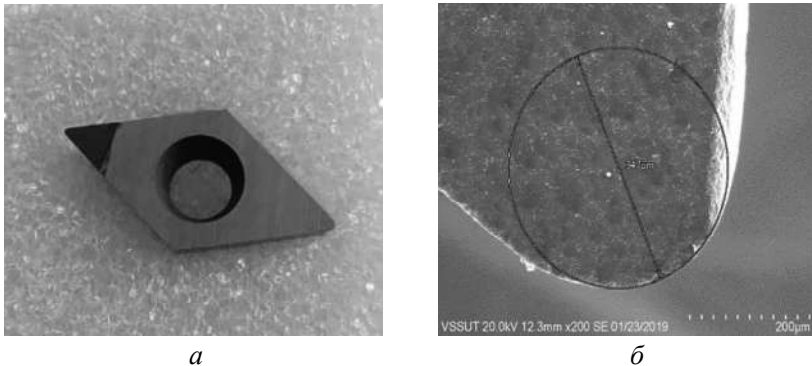


Рис. 7. ПКА-вставка марки DCMW 11T 302 PD 103 (а) і СЕМ-зображення її вершини (б).

### Експериментальний план

Як правило, для токарних операцій глибина різання, подача та швидкість є суттєвими параметрами різання. У цьому дослідженні обробку торця виконували з різною подачею, глибиною різання і числом оборотів за хвилину. Ширина різання коливалася від 0,1 до 0,2 мм. Оскільки радіус вершини вставки становив 0,2 мм, оптимальна глибина різання становила 1/3 радіуса вершини. Однак, за умовами дослідження, використовували максимальну глибину різання – 0,2 мм. Замість швидкості, як одного з контрольованих параметрів, розглядали кількість обертів за хвилину, оскільки швидкість змінювалася залежно від зміни діаметра

під час обробки торця. Крім того, на панелі керування та програмування регулювали обороти, а не швидкість. Оскільки максимальні обороти шпинделя, яких можна досягти за допомогою існуючого токарного верстата з ЧПУ, становлять 3000, для експерименту вибрано діапазон 1000–3000 об/хв. Нарешті, вибирали діапазон подачі 100–200 мм/хв згідно з рекомендаціями постачальника інструменту та літературних джерел. Крім того, кількість графену використовували як контрольований вхідний параметр, який змінюється в межах 1–3 %. Деталі параметрів різання та їхні рівні наведено в табл. 2.

**Таблиця 2. Параметри різання та їхні рівні планування експерименту**

| Параметр                      | Діапазон ранжування |      |      |
|-------------------------------|---------------------|------|------|
| Швидкість різання $S$ , об/хв | 1000                | 2000 | 3000 |
| Швидкість подачі $F$ , мм/хв  | 100                 | 150  | 200  |
| Глибина різання $D$ , мм      | 0,1                 | 0,15 | 0,2  |
| Кількість графену $G$ , %     | 1                   | 2    | 3    |
| Кодована одиниця              | -1                  | 0    | +1   |

Статистичний метод планування експерименту є ефективним методом зменшення кількості експериментів, які необхідно виконати за допомогою відповідного планування для аналізу вихідних реакцій для визначення значущих факторів і отримання об'єктивних висновків щодо основних та взаємодіючих ефектів у процесі. Щодо цього аспекту, метод поверхні відгуку є універсальним і його широко використовують, він реалізує як статистичні, так і математичні процедури для встановлення зв'язку між контрольованими вхідними факторами та вихідними відгуками для моделювання, аналізу та оптимізації процесів. Поверхневі експерименти виконують, щоб підібрати лінійну або квадратичну функцію для отримання моделі першого або другого порядку, що стосуються характеристик продуктивності обробки [45]. Проте ефективність методології методу поверхні відгуку значною мірою визначається вибором відповідного плану експерименту. План Бокса–Бенкена і ЦКП є найпоширенішими планами для поверхонь відгуків. ЦКП демонструє сферичність або здатність обертання, оскільки дисперсія прогнозованого відгуку є однаковою в точках, рівновіддалених від центру плану. Крім того, він використовує  $2k$  факторіальний план і виконує тест на відсутність відповідності з центральними прогонами, щоб відповідати моделі першого порядку. Потім використовують додаткові прогони з використанням осевих точок для об'єднання членів другого порядку. У результаті всі осеві та факторні точки плану потрапляють на сферу, і таким чином можна досягти точних прогнозів по всій області, що цікавить [46]. Очікується зменшення помилок передбачення та покращення оцінки за допомогою поліноміального рівняння. Загалом регресійна модель, розроблена за допомогою методу поверхні відгуку, може бути лінійним (першого порядку) або нелінійним (вищого порядку) поліноміальним рівнянням. Проте було доведено, що квадратичне (2-го порядку) поліноміальне рівняння є близьким до області відгуку і, отже, достатнім для оптимальної області. Тому більшість дослідників використовували квадратне рівняння для розробки моделі [47]. Щоб отримати рівняння найбільш прийнятної моделі для більшої кількості значущих термінів, яке може пояснити відгук кращим способом з меншою похибкою та високим значенням  $R^2$ , рівняння регресії 2-го порядку виражається як

$$y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j + E, \quad (1)$$

де  $y$  – функція відгуку;  $\beta_0$  – відрізок;  $\sum_{i=1}^k \beta_i x_i$  – основний ефект;  $\sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2$  – квадратичний ефект;  $\sum_{i<j} \beta_{ij} x_i x_j$  – ефект взаємодії;  $E$  – помилка.

Крім того, в ЦКП проявляється властивість сферичності або здатності до обертання, оскільки дисперсія прогнозованого відгуку дорівнює відповідним рівновіддаленим точкам від центру проектування. У результаті всі осьові та факторні точки плану потрапляють на сферу, і таким способом можна отримати точні прогнози по всій області, що цікавить. Очікується зменшення помилки передбачення та покращення оцінки за допомогою поліноміального рівняння. У цьому дослідженні ЦКП в МПВ використовували для отримання МПЕ. Загалом виходить 25 комбінацій для операції обробки. Для цілей аналізу використовували статистичне програмне забезпечення Minitab (Minitab Inc., США).

### Параметри вимірювання

Для поточного дослідження розглядали чотири фактори вимірювання продуктивності, а саме два коефіцієнти шорсткості поверхні ( $Ra$  і  $Rz$ ), споживання електроенергії (СЕ) і середнє прискорення. Шорсткість поверхні – це параметр, який визначає, як виготовлений продукт буде взаємодіяти з навколишнім середовищем у реальному часі. Отже, визначення шорсткості поверхонь, які стикаються з навколишнім середовищем, є надзвичайно важливим. У цьому дослідженні розглядали два різних типи факторів шорсткості поверхні: середню шорсткість поверхні  $Ra$  (представлення середнього значення шорсткості) і шорсткість поверхні за десятьма точками висоти  $Rz$  (надає інформацію щодо пор, отворів або будь-яких типів деформацій поверхні).  $Ra$  та  $Rz$  отримані за допомогою поверхневого аналізатора (рис. 8, а) у мікрометрах.

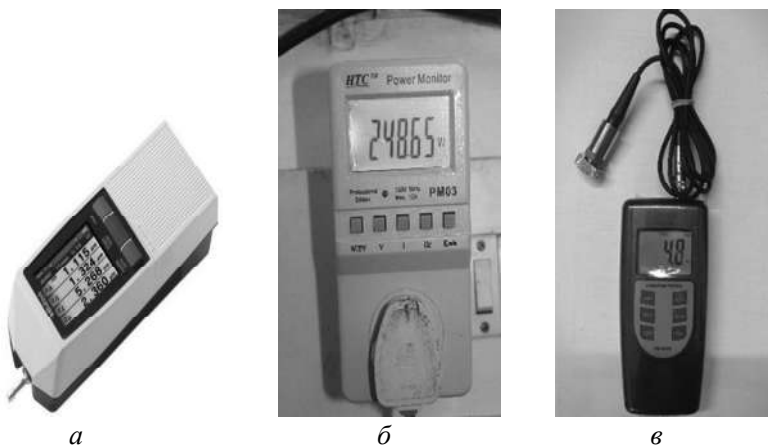


Рис. 8. Аналізатор поверхні (а), вимірювачі потужності (б) та вібрації (в).

СЕ є ще одним вимірювальним параметром, який впливає на токарну операцію. Під час точіння з використанням односточкового різального інструменту розрахунок енергії, що споживає інструмент під час операції, є важливим фактором, який необхідно дослідити. Це допомагає максимізувати продуктив-

ність, визначити термін служби інструменту, а також загальну вартість операції. SE вимірювали за допомогою вимірювача потужності (рис. 8, б) у ва-тах. Під час точіння взаємодія між різальним інструментом і деталлю є динамічною, що призводить до виникнення вібрації під час точіння. Підвищення вібрації призводить до грубої обробки поверхні, надмірного зносу різального інструменту і, нарешті, його поломки. Контроль вібрації зменшує потенційні ризики пошкодження інструменту та верстата. Це також важливо для безпеки обслуговуючого персоналу та навколишнього середовища. У цьому дослідженні віброметр (рис. 8, в) використовували для визначення значень вібрації в термінах середнього прискорення, одиницею вимірювання якого є  $\text{m/c}^2$ .

### РЕЗУЛЬТАТИ ТА ОБГОВОРЕННЯ

Вихідні показники отримано відповідно до матриці ЦКП за МПВ і наведено в табл. 3. Далі їх аналізували за допомогою статистичного програмного забезпечення Minitab. У цьому дослідженні  $Ra$ ,  $Rz$ , SE і середнє прискорення ( $Avg. Acc.$ ) вважали залежними змінними, тоді як  $S$ ,  $F$ ,  $D$  і  $G$  – незалежними змінними.

**Таблиця 3. Виміряна продуктивність під час обробки АММК**

| №  | S, об/хв | F, мм/хв | D, мм | G, % | Ra, мкм | Rz, мкм | SE, Ватт | Avg. Acc., $\text{m/c}^2$ |
|----|----------|----------|-------|------|---------|---------|----------|---------------------------|
| 1  | 1000     | 200      | 0,1   | 3    | 1,243   | 6,075   | 279,37   | 4,731                     |
| 2  | 3000     | 100      | 0,1   | 1    | 0,622   | 11,029  | 464,79   | 2,677                     |
| 3  | 1000     | 100      | 0,2   | 3    | 0,698   | 8,275   | 266,29   | 2,589                     |
| 4  | 1000     | 200      | 0,2   | 3    | 1,504   | 8,933   | 310,88   | 4,955                     |
| 5  | 3000     | 100      | 0,2   | 3    | 0,775   | 15,829  | 385,92   | 3,174                     |
| 6  | 2000     | 150      | 0,1   | 2    | 0,775   | 8,933   | 356,37   | 3,252                     |
| 7  | 3000     | 200      | 0,2   | 1    | 1,694   | 16,194  | 425,38   | 6,632                     |
| 8  | 2000     | 200      | 0,15  | 2    | 1,387   | 10,45   | 377,78   | 5,286                     |
| 9  | 3000     | 200      | 0,1   | 1    | 1,284   | 12,416  | 450,52   | 5,357                     |
| 10 | 3000     | 150      | 0,15  | 2    | 1,045   | 13,607  | 361,73   | 4,321                     |
| 11 | 1000     | 150      | 0,15  | 2    | 0,906   | 6,292   | 285,13   | 3,174                     |
| 12 | 3000     | 200      | 0,2   | 3    | 1,743   | 17,583  | 445,97   | 7,367                     |
| 13 | 2000     | 150      | 0,15  | 3    | 1,024   | 9,965   | 369      | 3,925                     |
| 14 | 2000     | 100      | 0,15  | 2    | 0,632   | 9,563   | 364,38   | 2,671                     |
| 15 | 2000     | 150      | 0,15  | 2    | 1,005   | 9,76    | 361,73   | 3,898                     |
| 16 | 1000     | 100      | 0,1   | 3    | 0,499   | 4,9     | 264,37   | 2,135                     |
| 17 | 2000     | 150      | 0,2   | 2    | 1,07    | 10,696  | 365,29   | 4,101                     |
| 18 | 3000     | 100      | 0,1   | 3    | 0,629   | 12,25   | 431,07   | 2,711                     |
| 19 | 1000     | 100      | 0,1   | 1    | 0,331   | 2,107   | 295,49   | 1,332                     |
| 20 | 1000     | 200      | 0,1   | 1    | 1,236   | 5,785   | 268,62   | 4,54                      |
| 21 | 1000     | 200      | 0,2   | 1    | 1,406   | 8,518   | 326,15   | 4,75                      |
| 22 | 3000     | 100      | 0,2   | 1    | 0,769   | 13,874  | 448,74   | 3,146                     |
| 23 | 1000     | 100      | 0,2   | 1    | 0,665   | 8,021   | 240,76   | 2,158                     |
| 24 | 3000     | 200      | 0,1   | 3    | 1,376   | 13,183  | 412,59   | 6,137                     |
| 25 | 2000     | 150      | 0,15  | 1    | 0,997   | 9,565   | 350,58   | 3,771                     |

### Моделювання, валідація та аналіз результатів

У цьому дослідженні бралися до уваги чотири залежні та чотири незалежні змінні. Для досягнення кореляції між різними факторами процесу викорис-

товували регресійний аналіз та показники вимірювання ефективності. Загальне рівняння для регресійних моделей розробляли так, як зазначено в рівняннях (2)–(5). Усі отримані рівняння регресії є квадратними. Математичні співвідношення встановлювали за допомогою статистичного програмного забезпечення Minitab19, призначеного для досягнення зв'язку між параметрами процесу та вихідними характеристиками. Математичні моделі для відгуків, отриманих таким способом, наведено нижче.

$$Ra = -0,362 + 0,000018S + 0,00093F + 6,20D - 0,126G + 0,000000S^2 + 0,0000F^2 - 17,0D^2 + 0,0456G^2 + 0,000000S \times F + 0,000133S \times D - 0,000009S \times G + 0,00955F \times D + 0,000040F \times G - 0,110D \times G \quad (2)$$

$$Rz = -4,56 + 0,00268S - 0,0022F + 36,7D + 1,07G + 0,000000S^2 + 0,000106F^2 + 29D^2 + 0,022G^2 + 0,000000S \times F + 0,00035S \times D - 0,000009S \times G + 0,0486F \times D + 0,00420F \times G - 1,32D \times G \quad (3)$$

$$CE = 411 + 0,2413S - 2,72F - 1659D - 46,1G + 0,000030S^2 + 0,00720F^2 + 3103D^2 + 6,7G^2 - 0,000143S \times F - 0,111S \times D - 0,00649 S \times G + 5,28F \times D + 0,100F \times G - 75D \times G \quad (4)$$

$$Avg. Acc. = 0,66 - 0,000254S - 0,0091F + 9,5D - 0,237G + 0,000000S^2 + 0,000091F^2 - 29,4D^2 + 0,098G^2 + 0,000004S \times F + 0,00215S \times D - 0,000003S \times G + 0,0182F \times D + 0,00077F \times G - 0,51D \times G \quad (5)$$

Прийнятність розроблених моделей перевіряли з довірчим інтервалом 95 % і рівнем значимості 5 % за допомогою дисперсійного аналізу. На додаток до коефіцієнта, подальший статистичний аналіз, заснований на  $p$ -значенні, виконували для їхньої кореляції вищого порядку. Отримано  $p$ -значення та відсоток внеску параметрів процесу. Змінні, які мають  $p$ -значення  $< 0,05$ , є найбільш значущими параметрами. Більшість параметрів вищих порядків і членів взаємодії мають  $p$ -значення більше 0,05, тому ці параметри не є настільки значущими.

В табл. 4 представлено результати дисперсійного аналізу для  $Ra$ .  $F$ -значення 68,12 свідчить, що отримана модель є важливою, оскільки значення є достатньо великим. Виходячи з  $p$ -значень, терміни  $S$ ,  $F$  і  $D$  є важливими термінами моделі. Встановлено, що коефіцієнт  $R^2$  для  $Ra$  становить 98,96 %, що вказує на хорошу відповідність, а модель, використана для  $Ra$ , є адекватною та коректною. Серед чотирьох незалежних параметрів швидкість подачі має найбільший внесок (85,354 %), потім глибина різання (8,801 %) і швидкість різання (3,407 %). Те ж саме можна перевірити за допомогою діаграми стандартизованих ефектів Парето (рис. 9). Діаграма Парето показує параметри впливу від найбільших до найменших у порядку спадання. Значущість параметрів моделі визначається еталонним рівнем. Якщо модельний термін вищий, ніж базова лінія, він вважається значущим. З іншого боку, графік нормальної ймовірності зазвичай використовують для визначення викидів із набору даних. Точка викиду – це результат, який знаходиться у верхньому або нижньому екстремумі або на відстані, далекій від цих кінців. Це може бути результатом будь-якого невдалого тесту або неправильного вимірювання. Нормальна ймовірність для  $Ra$  показана на рис. 10,  $a$ . Значення  $AD$  і  $p$ -значення, отримані для цього результату, становлять 0,309 і 0,534 відповідно. Оскільки значення перевищують 0,2, можна з упевненістю сказати, що значення не відрізнятимуться від нормального розподілу. Крім того, відмінна

узгодженість між експериментальними даними та прогнозованими значеннями, отриманими за моделлю регресії, отриманої для  $R_a$ , помічена на рис. 10, б, що дуже добре демонструє ефективність отриманої моделі.

**Таблиця 4. Результат дисперсійного аналізу для  $R_a$**

| Джерело               | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-значення | p-значення | Внесок, % | Значущість |
|-----------------------|----|---------|---------|------------|------------|-----------|------------|
| Модель                | 14 | 3,3885  | 0,24204 | 68,12      | 0          | 98,962    | значущий   |
| Лінійна               | 4  | 3,35372 | 0,83843 | 235,96     | 0          | 97,946    |            |
| <i>S</i>              | 1  | 0,11664 | 0,11664 | 32,83      | 0          | 3,407     | значущий   |
| <i>F</i>              | 1  | 2,92256 | 2,92256 | 822,49     | 0          | 85,354    | значущий   |
| <i>D</i>              | 1  | 0,30135 | 0,30135 | 84,81      | 0          | 8,801     | значущий   |
| <i>G</i>              | 1  | 0,01318 | 0,01318 | 3,71       | 0,083      | 0,385     |            |
| Квадратична           | 4  | 0,02226 | 0,00557 | 1,57       | 0,257      | 0,650     |            |
| <i>S</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,00028 | 0,00028 | 0,08       | 0,783      | 0,008     |            |
| <i>F</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,00506 | 0,00506 | 1,42       | 0,26       | 0,148     |            |
| <i>D</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,00459 | 0,00459 | 1,29       | 0,282      | 0,134     |            |
| <i>G</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,00529 | 0,00529 | 1,49       | 0,251      | 0,154     |            |
| Двостороння взаємодія | 6  | 0,01252 | 0,00209 | 0,59       | 0,734      | 0,366     |            |
| <i>S</i> × <i>F</i>   | 1  | 0,0007  | 0,0007  | 0,2        | 0,666      | 0,020     |            |
| <i>S</i> × <i>D</i>   | 1  | 0,0007  | 0,0007  | 0,2        | 0,666      | 0,020     |            |
| <i>S</i> × <i>G</i>   | 1  | 0,00144 | 0,00144 | 0,41       | 0,538      | 0,042     |            |
| <i>F</i> × <i>D</i>   | 1  | 0,00912 | 0,00912 | 2,57       | 0,14       | 0,266     |            |
| <i>F</i> × <i>G</i>   | 1  | 0,00006 | 0,00006 | 0,02       | 0,896      | 0,002     |            |
| <i>D</i> × <i>G</i>   | 1  | 0,00048 | 0,00048 | 0,14       | 0,72       | 0,014     |            |
| Похибка               | 10 | 0,03553 | 0,00355 |            |            | 1,038     |            |
| Всього                | 24 | 3,42404 |         |            |            | 100,000   |            |
| $R^2$                 |    |         |         |            | 98,96 %    |           |            |

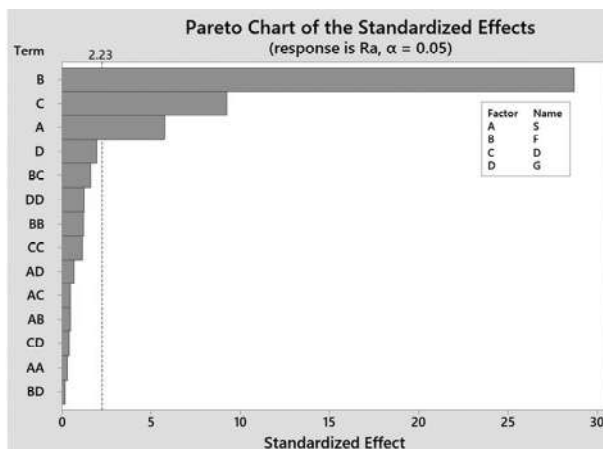


Рис. 9. Діаграма Парето стандартизованих ефектів  $R_a$ .

У табл. 5 представлено результат дисперсійного аналізу для моделі  $R_z$ , де  $F$ -значення, рівне 39,34, вказує на те, що модель є значущою. Для  $R_z$  значущі члени моделі  $S$ ,  $F$ ,  $D$  і  $G$ . Коефіцієнт  $R^2$  для  $R_z$  виявився рівним 98,22 %. Це

означає, що модель, використана для  $Rz$ , є адекватною. Серед чотирьох контрольованих параметрів швидкість різання має найбільший внесок (76,378 %), за нею слідує глибина різання (16,581 %).

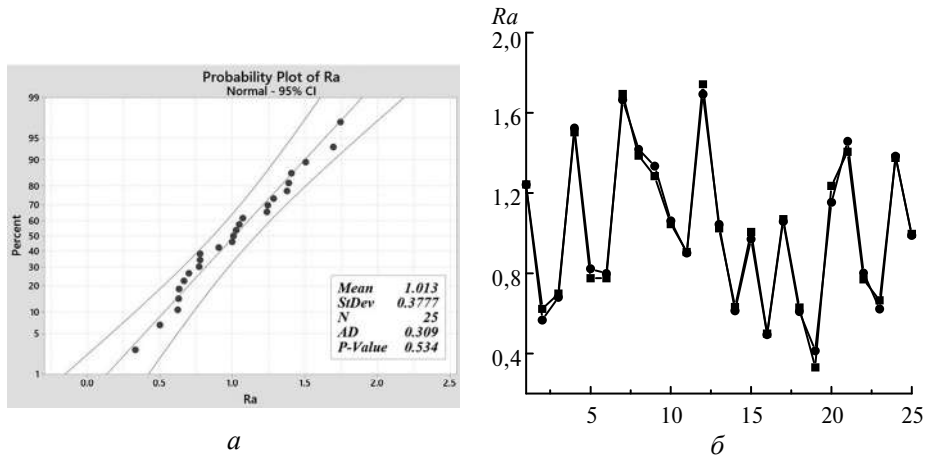


Рис. 10. Графік імовірності (а) та порівняння фактичних (■) і прогнозованих (●) значень  $Ra$  (б).

Таблиця 5. Результат дисперсійного аналізу для  $Rz$

| Джерело               | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-значення | p-значення | Внесок, % | Значущість |
|-----------------------|----|---------|---------|------------|------------|-----------|------------|
| Модель                | 14 | 321,263 | 22,947  | 39,34      | 0          | 98,217    | значущий   |
| Лінійна               | 4  | 318,872 | 79,718  | 136,67     | 0          | 97,486    |            |
| $S$                   | 1  | 249,828 | 249,828 | 428,31     | 0          | 76,378    | значущий   |
| $F$                   | 1  | 9,811   | 9,811   | 16,82      | 0,002      | 2,999     | значущий   |
| $D$                   | 1  | 54,236  | 54,236  | 92,98      | 0          | 16,581    | значущий   |
| $G$                   | 1  | 4,997   | 4,997   | 8,57       | 0,015      | 1,528     | значущий   |
| Квадратична           | 4  | 1,208   | 0,302   | 0,52       | 0,725      | 0,369     |            |
| $S^2$                 | 1  | 0,109   | 0,109   | 0,19       | 0,675      | 0,033     |            |
| $F^2$                 | 1  | 0,177   | 0,177   | 0,3        | 0,593      | 0,054     |            |
| $D^2$                 | 1  | 0,013   | 0,013   | 0,02       | 0,883      | 0,004     |            |
| $G^2$                 | 1  | 0,001   | 0,001   | 0          | 0,963      | 0,000     |            |
| Двостороння взаємодія | 6  | 1,183   | 0,197   | 0,34       | 0,902      | 0,362     |            |
| $S \times F$          | 1  | 0,009   | 0,009   | 0,02       | 0,902      | 0,003     |            |
| $S \times D$          | 1  | 0,005   | 0,005   | 0,01       | 0,929      | 0,002     |            |
| $S \times G$          | 1  | 0,156   | 0,156   | 0,27       | 0,616      | 0,048     |            |
| $F \times D$          | 1  | 0,236   | 0,236   | 0,4        | 0,539      | 0,072     |            |
| $F \times G$          | 1  | 0,706   | 0,706   | 1,21       | 0,297      | 0,216     |            |
| $D \times G$          | 1  | 0,07    | 0,07    | 0,12       | 0,736      | 0,021     |            |
| Похибка               | 10 | 5,833   | 0,583   |            |            | 1,783     |            |
| Всього                | 24 | 327,096 |         |            |            | 100,000   |            |
| $R^2$                 |    |         |         |            | 98,22 %    |           |            |

Діаграма Парето стандартизованого ефекту для середнього прискорення (рис. 11) показує, що швидкість різання, швидкість подачі, глибина різання та кількість графену вносять значний внесок у  $Rz$ . Нормальна ймовірність для  $Rz$  показана на рис. 12, *a*. Отримані значення  $AD$  та  $p$ -значення становлять 0,189 та 0,891 відповідно. Незважаючи на те, що значення  $p$  перевищує 0,2, оскільки значення  $AD$  становить від 0,05 до 0,2, автори не можуть підтвердити, що значення відповідають нормальному розподілу, і це не заперечує та не підтверджує нульову гіпотезу. Отже, для перевірки розподілу потрібна більша кількість даних. Для підтвердження точності розробленої моделі на рис. 12, *б* показано відхилення фактичних значень  $Rz$  від прогнозованих за рівнянням регресії.

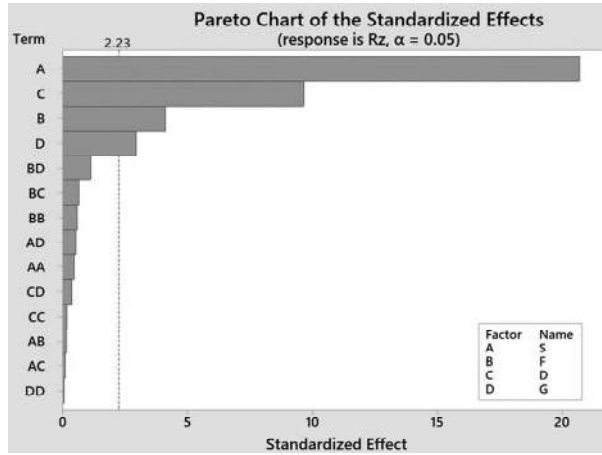
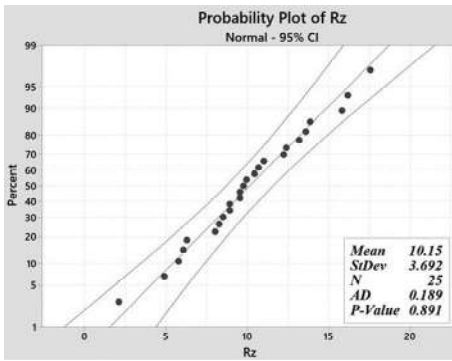
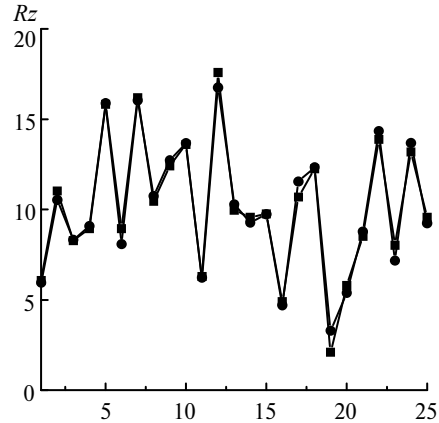


Рис. 11. Діаграма Парето стандартизованих ефектів для  $Rz$ .



*a*



*б*

Рис. 12. Діаграма ймовірності (*a*) та порівняння фактичних (■) і прогнозованих (●) значень  $Rz$  (*б*).

Результати дисперсійного аналізу, отримані для СЕ, представлені в табл. 6.  $F$ -значення 12,88 вказує на те, що запропонована модель є значущою. Для СЕ  $S$  є єдиним значущим терміном, оскільки його  $p$ -значення менше 0,05. Коефіцієнт  $R^2$  для СЕ становить 94,75%, що свідчить про те, що модель, яку використовують для СЕ, є задовільною. Швидкість різання є єдиним домінуючим фактором для СЕ з 85,757 %, і те саме видно з діаграми Парето (рис. 13). Зна-



чення AD і  $p$ -значення, отримані для SE, становлять 0,436 і 0,275 відповідно, як показано на графіку нормальної ймовірності на рис. 14, а. Оскільки значення більше 0,2, можна припустити, що отримані дані розподілені нормально. На рис. 14, б показано відхилення фактичних значень SE від прогнозованих за рівнянням регресії.

**Таблиця 6. Результат дисперсійного аналізу SE**

| Джерело               | DF | Adj SS | Adj MS  | F-значення | $p$ -значення | Внесок, % | Значущість |
|-----------------------|----|--------|---------|------------|---------------|-----------|------------|
| Модель                | 14 | 102086 | 7291,9  | 12,88      | 0             | 94,747    | значущий   |
| Лінійна               | 4  | 94042  | 23510,4 | 41,54      | 0             | 87,281    |            |
| <i>S</i>              | 1  | 92400  | 92399,8 | 163,26     | 0             | 85,757    | значущий   |
| <i>F</i>              | 1  | 1019   | 1019,3  | 1,8        | 0,209         | 0,946     |            |
| <i>D</i>              | 1  | 3      | 3,4     | 0,01       | 0,94          | 0,003     |            |
| <i>G</i>              | 1  | 619    | 619,2   | 1,09       | 0,32          | 0,574     |            |
| Квадратична           | 4  | 2641   | 660,3   | 1,17       | 0,382         | 2,451     |            |
| <i>S</i> <sup>2</sup> | 1  | 2238   | 2237,6  | 3,95       | 0,075         | 2,077     |            |
| <i>F</i> <sup>2</sup> | 1  | 826    | 825,9   | 1,46       | 0,255         | 0,767     |            |
| <i>D</i> <sup>2</sup> | 1  | 153    | 153,3   | 0,27       | 0,614         | 0,142     |            |
| <i>G</i> <sup>2</sup> | 1  | 115    | 115     | 0,2        | 0,662         | 0,107     |            |
| Двостороння взаємодія | 6  | 5403   | 900,5   | 1,59       | 0,246         | 5,015     |            |
| <i>S</i> × <i>F</i>   | 1  | 815    | 814,7   | 1,44       | 0,258         | 0,756     |            |
| <i>S</i> × <i>D</i>   | 1  | 497    | 497,2   | 0,88       | 0,371         | 0,461     |            |
| <i>S</i> × <i>G</i>   | 1  | 673    | 673     | 1,19       | 0,301         | 0,625     |            |
| <i>F</i> × <i>D</i>   | 1  | 2790   | 2790,2  | 4,93       | 0,051         | 2,589     |            |
| <i>F</i> × <i>G</i>   | 1  | 403    | 402,7   | 0,71       | 0,419         | 0,374     |            |
| <i>D</i> × <i>G</i>   | 1  | 225    | 225,4   | 0,4        | 0,542         | 0,209     |            |
| Похибка               | 10 | 5660   | 566     |            |               | 5,253     |            |
| Всього                | 24 | 107746 |         |            |               | 100       |            |
| $R^2$                 |    |        |         |            |               | 94,75 %   |            |

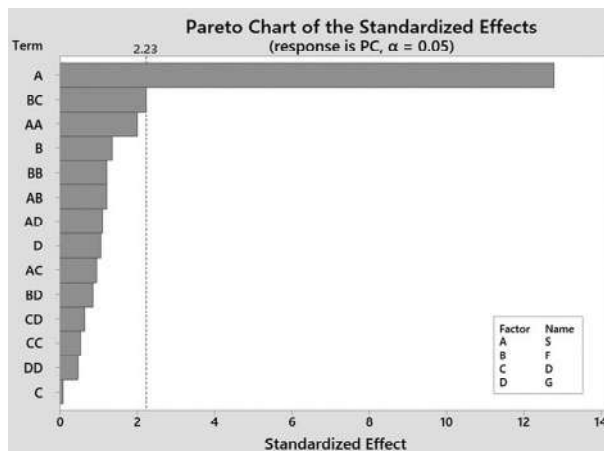


Рис. 13. Діаграма Парето стандартизованих ефектів для SE.

Табл. 7 показує результат дисперсійного аналізу для *Avg. Acc.*  $F$ -значення 41,94 вказує на значиму модель для вібрації. Отримані  $p$ -значення припускають, що *S*, *F*, *D*, *G* і *S*×*F* є значущими. Коефіцієнт  $R^2$  для середнього прискорення становить 0,9475.

рення (98,33 %) свідчить про те, що отримана модель є адекватною та надійною. Швидкість подачі є домінуючим фактором для середнього прискорення з 77,98 % вкладом, за яким слідує швидкість різання (13,159 %), і те ж саме чітко видно з діаграми Парето для середнього прискорення на рис. 15. Нормальна ймовірність середнього прискорення показана на рис. 16, *a*, отримані значення AD і *p*-значення становлять 0,269 і 0,650 відповідно. Оскільки значення перевищують 0,2, можна з упевненістю сказати, що експериментально отримані значення не відрізнятимуться від нормального розподілу. Щоб продемонструвати ефективність отриманої моделі для середнього прискорення, відхилення фактичних значень середнього прискорення від прогнозованих значень за допомогою рівняння регресії показано на рис. 16, *б*.

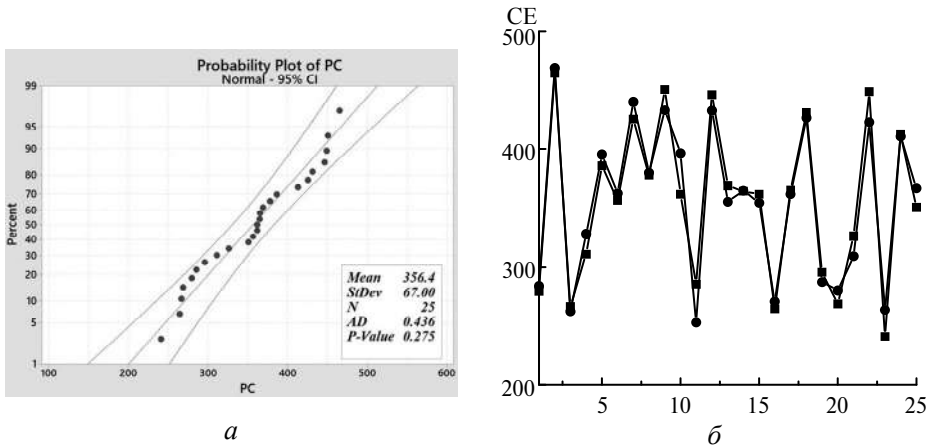


Рис. 14. Діаграма ймовірності (*a*) та порівняння фактичних (■) і прогнозованих (●) значень CE (*б*).

**Таблиця 7. Результат дисперсійного аналізу для середнього прискорення**

| Джерело               | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-значення | p-значення | Внесок, % | Значущість |
|-----------------------|----|---------|---------|------------|------------|-----------|------------|
| Модель                | 14 | 51,6813 | 3,6915  | 41,94      | 0          | 98,325    |            |
| Лінійна               | 4  | 50,5318 | 12,6329 | 143,52     | 0          | 96,138    |            |
| <i>S</i>              | 1  | 6,9167  | 6,9167  | 78,58      | 0          | 13,159    | значущий   |
| <i>F</i>              | 1  | 40,9875 | 40,9875 | 465,63     | 0          | 77,980    | значущий   |
| <i>D</i>              | 1  | 2       | 2       | 22,72      | 0,001      | 3,805     | значущий   |
| <i>G</i>              | 1  | 0,6276  | 0,6276  | 7,13       | 0,023      | 1,194     | значущий   |
| Квадратична           | 4  | 0,3256  | 0,0814  | 0,92       | 0,487      | 0,619     |            |
| <i>S</i> <sup>2</sup> | 1  | 0       | 0       | 0          | 0,99       | 0,000     |            |
| <i>F</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,133   | 0,133   | 1,51       | 0,247      | 0,253     |            |
| <i>D</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,0137  | 0,0137  | 0,16       | 0,701      | 0,026     |            |
| <i>G</i> <sup>2</sup> | 1  | 0,0245  | 0,0245  | 0,28       | 0,609      | 0,047     |            |
| Двостороння взаємодія | 6  | 0,824   | 0,1373  | 1,56       | 0,255      | 1,568     |            |
| <i>S</i> × <i>F</i>   | 1  | 0,5712  | 0,5712  | 6,49       | 0,029      | 1,087     | значущий   |
| <i>S</i> × <i>D</i>   | 1  | 0,1855  | 0,1855  | 2,11       | 0,177      | 0,353     |            |
| <i>S</i> × <i>G</i>   | 1  | 0,0002  | 0,0002  | 0          | 0,965      | 0,000     |            |

**Таблиця 7. (Продовження)**

|              |    |         |        |      |         |       |
|--------------|----|---------|--------|------|---------|-------|
| $F \times D$ | 1  | 0,033   | 0,033  | 0,38 | 0,554   | 0,063 |
| $F \times G$ | 1  | 0,0236  | 0,0236 | 0,27 | 0,616   | 0,045 |
| $D \times G$ | 1  | 0,0105  | 0,0105 | 0,12 | 0,738   | 0,020 |
| Похибка      | 10 | 0,8802  | 0,088  |      |         | 1,675 |
| Всього       | 24 | 52,5616 |        |      |         | 100   |
| $R^2$        |    |         |        |      | 98,33 % |       |

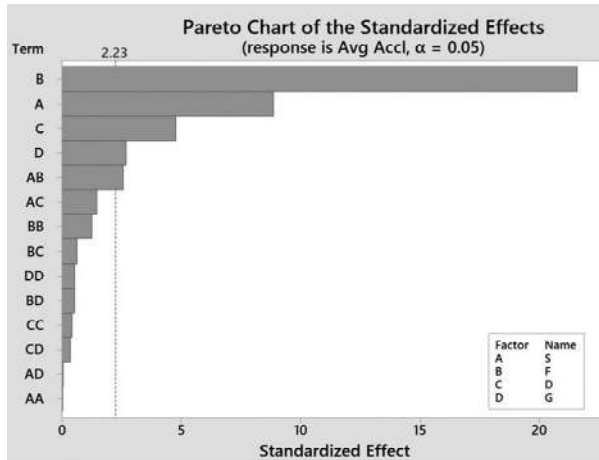
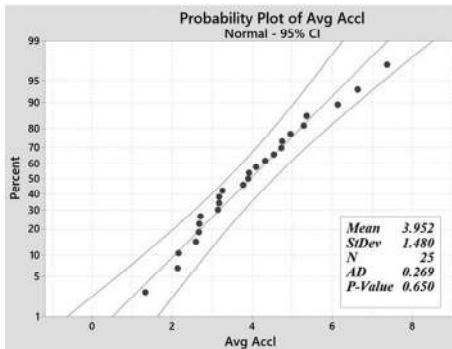
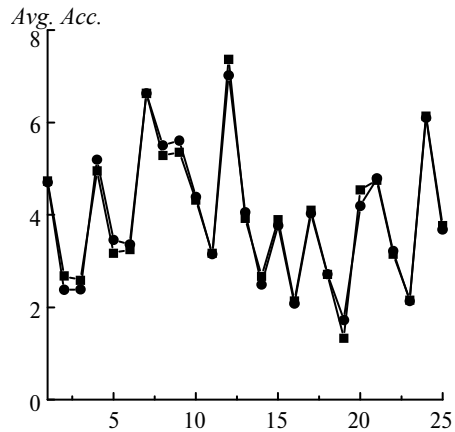


Рис. 15. Діаграма Парето стандартизованих ефектів для середнього прискорення.



*a*



*б*

Рис. 16. Діаграма ймовірності (*a*) та порівняння фактичних ( $\blacksquare$ ) і прогнозованих ( $\bullet$ ) значень середнього прискорення (*б*).

Результат дисперсійного аналізу представлено на рис. 17. З аналізу видно, що швидкість різання є суттєвою для кожного відгукку. Швидкість подачі та глибина різання є важливими для відгукків, за винятком SE. Кількість графену є значущою для  $R_z$  і середнього прискорення. Термін взаємодії ( $S \times F$ ) значущий лише для середнього прискорення. Швидкість подачі має найвищий внесок для  $R_a$  (85,3541 %) і середнього прискорення (77,97993 %). Так само швидкість різання має найбільший внесок для  $R_z$  (76,37758 %) і SE (85,75724 %).

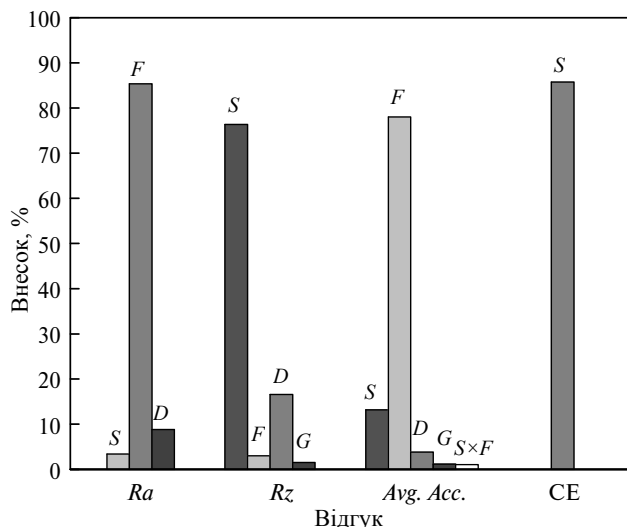


Рис. 17. Внесок значущих термінів кожного відгуку.

### Вплив параметрів процесу

Поверхневий графік – це тривимірне зображення зв'язку між двома входними параметрами та відгуком. Незалежні змінні беруться по осях  $x$  і  $y$ , а по осі  $z$  береться залежна змінна. Відгуки представлені за допомогою гладкої поверхні. Цей тривимірний графік надає більше інформації завдяки доданому виміру. На поверхневому графіку легше аналізувати дані з тривимірного ракурсу. Графік будували за допомогою відкладення відгуку на осі  $z$  і двох параметрів процесу на осях  $x$  і  $y$ . У цьому аналізі фактор, що має найбільший відсотковий внесок, відкладали на вісь абсцис, а інші фактори – на вісь  $y$ . У цьому дослідженні є чотири входні змінні. Для представлення відгуків на поверхневому графіку брали лише дві змінні по осях  $x$  і  $y$ , а решту двоє входних даних зберігали постійними. Значення середнього рівня змінних приймали як утримувані значення під час побудови графіка. Для  $Ra$  і середнього прискорення швидкість подачі є найбільш значущим фактором, а для  $Rz$  і  $SE$  швидкість різання є найбільш значущим. Тому вони взяті по осі абсцис для аналізу їхнього впливу на бажані відгуки. У той час як два фактори враховували для побудови графіка, інші два входні параметри залишали фіксованими на їхньому середньому рівні.

Спостерігали, що обидва параметри шорсткості ( $Ra$  і  $Rz$ ) демонструють плавний приріст зі збільшенням контрольованого значення параметра. З попередніх досліджень видно, що збільшення швидкості подачі зменшує гладкість поверхні [39, 40]. Подібний результат також спостерігали для  $Ra$  (рис. 18,  $a-e$ ). Однак збільшення шорсткості зі збільшенням швидкості різання спостерігали для  $Rz$  (рис. 19,  $a-e$ ). Загалом, зі збільшенням швидкості різання очікується зменшення шорсткості [37]. Збільшення шорсткості може бути результатом збільшення крихкості через додавання графену. На рис. 20,  $a-e$  представлено поверхневий графік для  $SE$ . З підвищенням значень параметрів спостерігали різке зростання  $SE$ . Коли швидкість різання збільшується, виділяється більше тепла через високу швидкість різання. Збільшення виділення тепла може призвести до збільшення  $SE$  під час роботи. Для середнього прискорення (рис. 21,  $a-e$ ) графік має гладку криву зі збільшенням кожного параметра процесу. Висока швидкість подачі передбачає збільшення контакту між

інструментом і деталлю. Більший контакт між двома поверхнями призводить до збільшення вібрації між ними, отже, збільшення середнього прискорення.

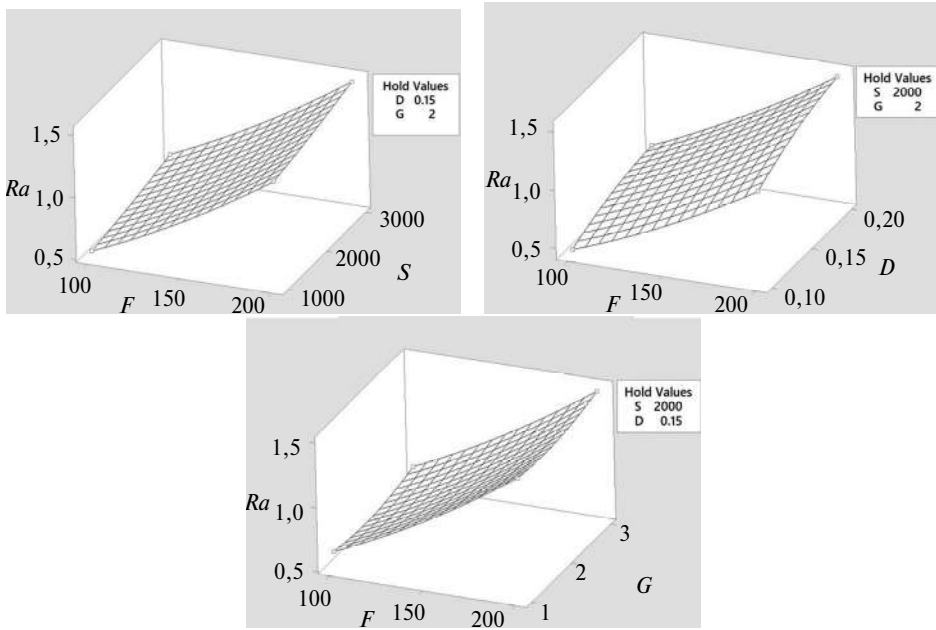


Рис. 18. Тривимірні графіки поверхні для  $Ra$ .

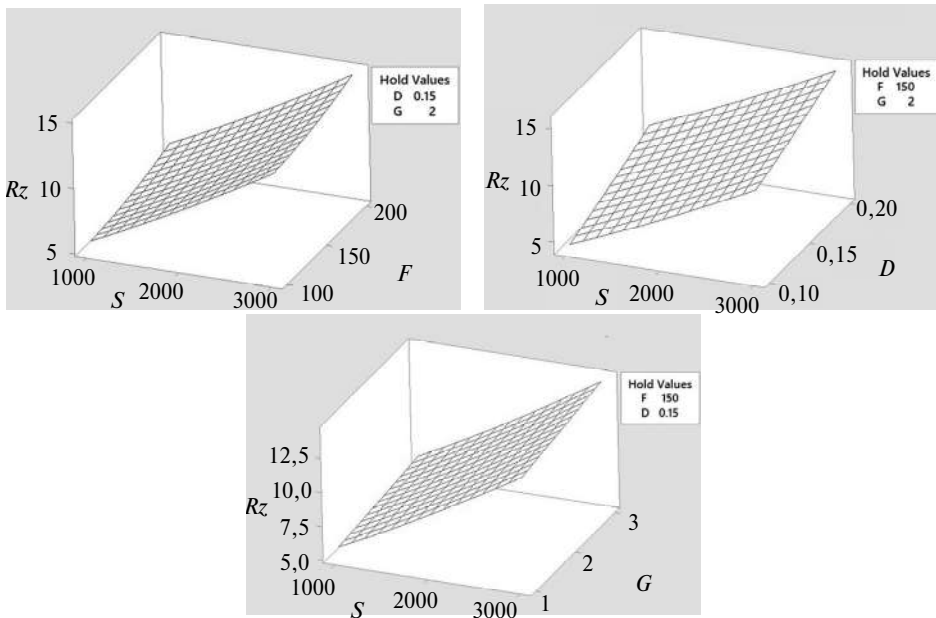


Рис. 19. Тривимірні графіки поверхні для  $Rz$ .

### БАГАТОЦІЛЬОВА ОПТИМІЗАЦІЯ

Ця робота спрямована на мінімізацію параметрів ефективності ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $SE$  і середнього прискорення) одночасно в процесі операції сухого точіння, оскільки зміна одного об'єкта може вплинути на продуктивність іншого об'єкта.

Цього можна досягти за допомогою багатоцільової оптимізації. У наступному розділі прийнято два методи оптимізації, а саме КП і метод корисності, і порівняно їхні результати.

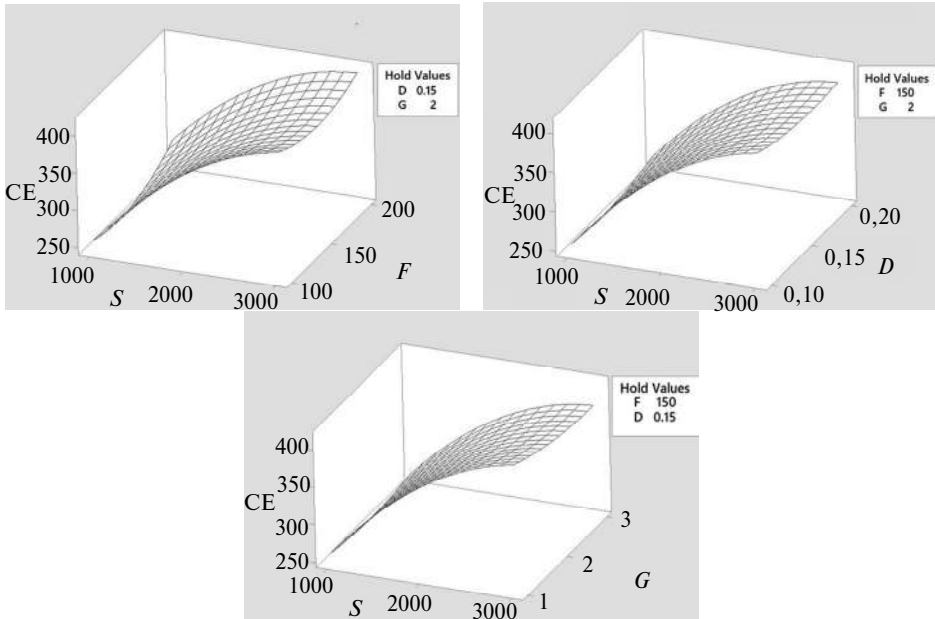


Рис. 20. Тривимірні графіки поверхні для СЕ.

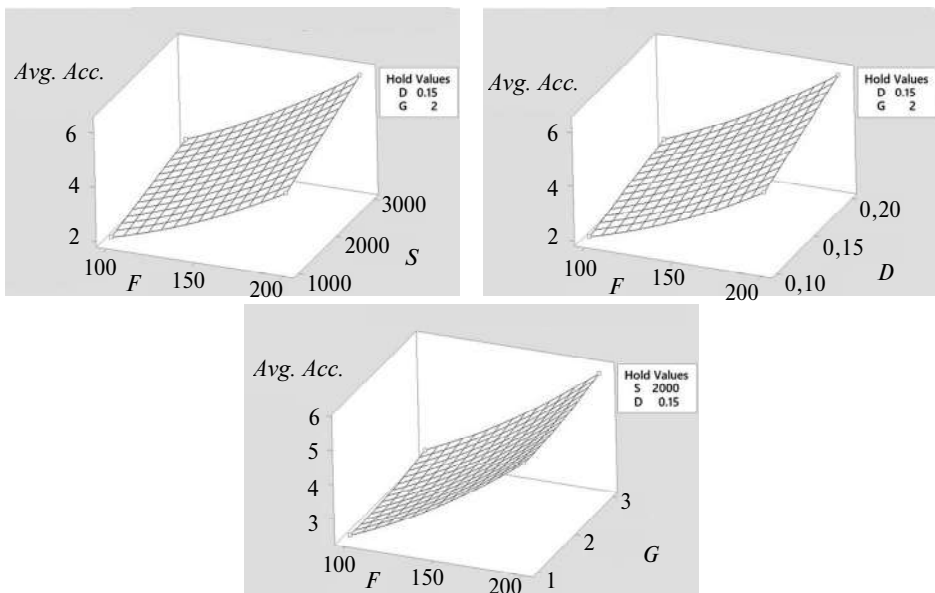


Рис. 21. Тривимірна поверхня для середнього прискорення.

### Багатоцільова оптимізація з використанням МПВ (підхід бажаності)

Діаграма оптимізації досягається для отримання оптимального параметра керування та відповідних вихідних значень за допомогою пакета програм для обробки статистичних даних Minitab. Мета полягає в мініміза-

ції всіх вихідних параметрів ( $Ra$ ,  $Rz$ ,  $CE$  і середнього прискорення) одночасно, а відповідне оптимальне налаштування параметра для вищезгаданих відгуків показано на рис. 22. У цьому аналізі складові значення бажаності є рівними 0,9010, близькими до одиниці, що свідчать про те, що модель була оптимальною. Оптимальне налаштування:  $S = 1000$  об./хв,  $F = 100$  мм/хв,  $D = 0,1$  мм і  $G = 2$  % графену. Прогнозовані відгуки:  $Ra = 0,4076$  мкм,  $Rz = 3,9736$  мкм,  $CE = 272,1911$  Вт і середнє прискорення –  $1,8036$  м/с<sup>2</sup>.

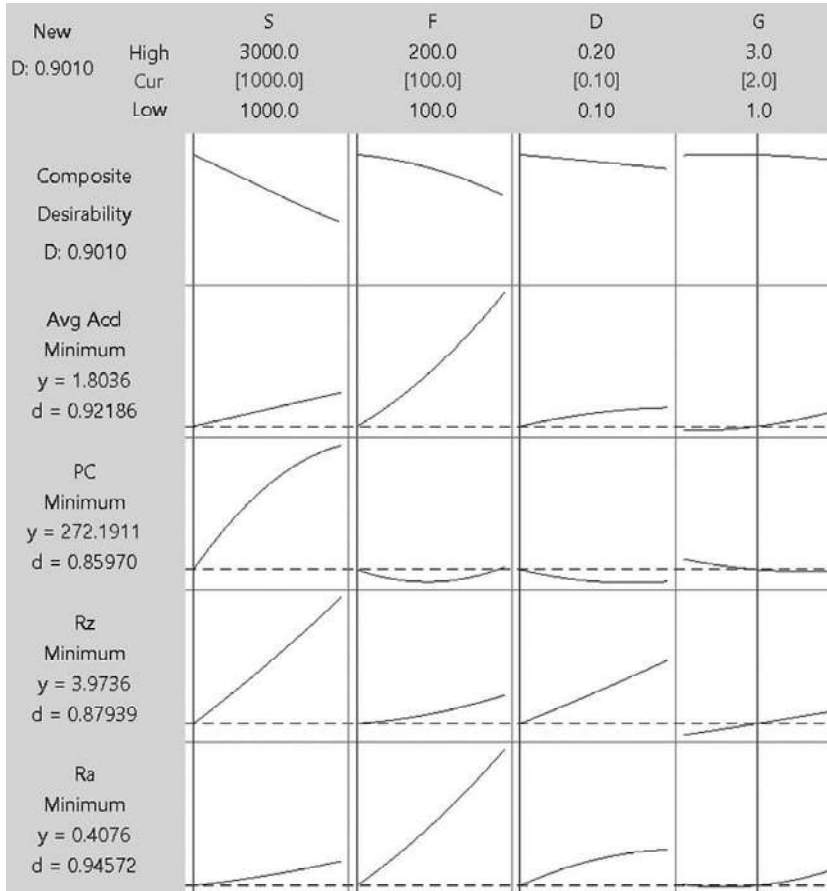


Рис. 22. Діаграма бажаності з використанням МПВ.

### Оптимізація мультівідгуків за допомогою методу корисності

Для задачі з кількома відгуками використовували метод оптимізації корисності за допомогою надання вихідним даним різних вагових коефіцієнтів відповідно до їхнього пріоритету. Оскільки є чотири різні вихідні параметри зі спільною цільовою функцією (мінімізація), бажано перетворити їх в один фактор, щоб знайти найкращу комбінацію параметрів. Метод корисності використовували за допомогою дотримання кроків, описаних у [48].

Індивідуальний вихід у методі корисності обчислюється як

$$U = \left\{ 9 / \left( \log \frac{X^*}{X} \right) \right\} \log \frac{X_k}{X}, \quad (6)$$

де  $X^*$ ,  $X$  і  $X_k$  – найбільш прийнятне, найгірш прийнятне і відповідне вихідне значення для окремої операції відповідно.

Оскільки дане дослідження стосується операції сухого точіння, то на основі ретельного вивчення літератури всім параметрам процесу було надано однакову вагу (25 %). Тому вираз для загальної корисності буде наступним:

$$\text{Загальна корисність} = 0,25U_{Ra} + 0,25U_{Rz} + 0,25U_{CE} + 0,25U_{Avg. Acc.}, \quad (7)$$

де  $U_{Ra}$ ,  $U_{Rz}$ ,  $U_{CE}$  і  $U_{Avg. Acc.}$  – відповідні індивідуально розраховані значення корисності вихідних відгуків кожного набору параметрів. Значення функції корисності для всіх чотирьох відгуків узагальнено та представлено в табл. 8. Оптимальними параметрами процесу є найвище загальне значення корисності. Виявлено, що відгук під номером 19 має найвище загальне значення корисності 8,299349565, тому відповідне налаштування параметра вважається оптимальним для багатоцільової оптимізації. Отже,  $S = 1000$  об/хв,  $F = 100$  мм/хв,  $D = 0,1$  мм і  $G = 1$  % графену є оптимальним параметром, отриманим за допомогою методу корисності. Значення відгуку для оптимального налаштування становлять 0,331 мкм для  $Ra$ , 2,107 мкм для  $Rz$ , 295,49 Вт для  $CE$  і 1,332 м/с середнє прискорення. Помічено, що всі відгуки, крім  $CE$ , є мінімальними значеннями, отриманими в результаті експерименту. Це бажане спостереження, оскільки метою цієї оптимізації є мінімізація всіх відгуків одночасно.

**Таблиця 8. Оптимізація мультывідгуків із корисністю та загальними значеннями корисності**

| Номер | $U_{Ra}$ | $U_{Rz}$ | $U_{CE}$ | $U_{Avg. Acc.}$ | Загальна корисність |
|-------|----------|----------|----------|-----------------|---------------------|
| 1     | 1,83159  | 4,508131 | 6,964946 | 2,3304673       | 3,908783623         |
| 2     | 5,582445 | 1,978462 | 0        | 5,3269425       | 3,221962421         |
| 3     | 4,957906 | 3,197128 | 7,621027 | 5,5028301       | 5,319722767         |
| 4     | 0,798989 | 2,872562 | 5,502722 | 2,0870374       | 2,815327591         |
| 5     | 4,390985 | 0,445781 | 2,544297 | 4,4308209       | 2,952970876         |
| 6     | 4,390985 | 2,872562 | 3,634235 | 4,3030688       | 3,800212756         |
| 7     | 0,154484 | 0,349077 | 1,212288 | 0,5530733       | 0,567230822         |
| 8     | 1,237736 | 2,207214 | 2,835976 | 1,7467626       | 2,00692228          |
| 9     | 1,655775 | 1,475971 | 0,426658 | 1,6765535       | 1,308739302         |
| 10    | 2,771607 | 1,087415 | 3,429978 | 2,8074794       | 2,524120023         |
| 11    | 3,54488  | 4,359252 | 6,685716 | 4,4308209       | 4,75516717          |
| 12    | 0        | 0        | 0,565543 | 0               | 0,14138586          |
| 13    | 2,881587 | 2,408805 | 3,15772  | 3,3132795       | 2,940347874         |
| 14    | 5,496037 | 2,583477 | 3,330108 | 5,3387499       | 4,187093227         |
| 15    | 2,983054 | 2,49698  | 3,429978 | 3,3496027       | 3,064903649         |
| 16    | 6,776132 | 5,419924 | 7,720036 | 6,5173983       | 6,608372391         |
| 17    | 2,643525 | 2,108513 | 3,295981 | 3,0824581       | 2,782619416         |
| 18    | 5,521815 | 1,533067 | 1,030484 | 5,26053         | 3,336474092         |
| 19    | 9        | 9        | 6,197398 | 9               | 8,299349565         |
| 20    | 1,862186 | 4,71562  | 7,501829 | 2,5473181       | 4,156738391         |
| 21    | 1,164025 | 3,074355 | 4,846651 | 2,3093765       | 2,848601839         |
| 22    | 4,433091 | 1,004985 | 0,480823 | 4,4774478       | 2,599086684         |
| 23    | 5,220293 | 3,329374 | 9        | 6,4610133       | 6,002670148         |
| 24    | 1,280873 | 1,221699 | 1,629988 | 0,96126         | 1,273455105         |
| 25    | 3,026352 | 2,58259  | 3,858359 | 3,5239028       | 3,247800818         |



## Підтверджувальний експеримент

Виявлені рівні оптимальних регулювальних факторів в результаті реалізації підходу бажаності в МПВ на основі ЦКП і методу корисності додатково підтверджуються підтверджувальним експериментом. Результати підтверджувального тестування для МПВ на основі ЦКП відображені в табл. 9. З результатів чітко видно, що експериментальні значення відгуків були покращені, а також близькі до відповідних прогнозованих значень для оптимального налаштування параметра. Відхилення між прогнозованими та експериментальними результатами становить 12,41, 27,75, 0,56 і 12,79 % для  $Ra$ ,  $Rz$ ,  $PC$  і середнього прискорення відповідно. Крім того, у табл. 10 показано порівняння експериментально отриманих значень, що відповідають оптимальному налаштуванню параметра, досягнутому за допомогою МПВ на основі ЦКП і методу корисності. З таблиці видно, що метод корисності забезпечує кращий результат для всіх відгуків порівняно з МПВ на основі ЦКП у оптимізації з кількома відгукими, за винятком  $SE$ . Покращення на 7,85, 36,26 і 18,09 % для  $Ra$ ,  $Rz$  і  $Avg. Acc.$  досягали за допомогою методу корисності, тоді як покращення  $SE$  (8,4 %) можна досягти за допомогою МПВ на основі ЦКП.

**Таблиця 9. Тест підтвердження для оптимізації множинного відгуку МПВ на основі ЦКП**

| Параметри             | Швидкість різання, об/хв | Швидкість подачі, мм/хв   | Глибина різання, мм | Графен, % |
|-----------------------|--------------------------|---------------------------|---------------------|-----------|
| Оптимальне значення   | 1000                     | 100                       | 0,1                 | 2         |
| Відгук                | Прогнозоване значення    | Експериментальне значення | Відхилення, %       |           |
| $Ra$ , мкм            | 0,3989                   | 0,357                     | 12,41               |           |
| $Rz$ , мкм            | 3,6996                   | 2,871                     | 27,75               |           |
| $SE$ , Ватт           | 276,4441                 | 270,68                    | 0,56                |           |
| $Avg. Acc.$ , $m/c^2$ | 1,749                    | 1,573                     | 12,79               |           |

**Таблиця 10. Порівняння експериментальних значень МПВ на основі ЦКП і методу корисності**

| Відгук                | Експериментальне оптимізоване значення |                  | Покращення, % |
|-----------------------|--|------------------|---------------|
|                       | МПВ на основі ЦКП                      | метод корисності |               |
| $Ra$ , мкм            | 0,357                                  | 0,331            | 7,85          |
| $Rz$ , мкм            | 2,871                                  | 2,107            | 36,26         |
| $SE$ , Ватт           | 270,68                                 | 295,49           | -8,4          |
| $Avg. Acc.$ , $m/c^2$ | 1,573                                  | 1,332            | 18,09         |

Проведене порівняння отриманих експериментальних значень оптимальних параметрів МПВ на основі ЦКП та методу корисності з експериментальним значенням чистого алюмінію та з додаванням графену) наведено в табл. 11, де видно, що значення відгуку підвищуються завдяки армуванню графеном порівняно з показниками чистого алюмінію. Отже, можна з упевненістю

сказати, що підготовлений графеновий армований АММК є відповідною заміною алюмінію в практичному застосуванні.

**Таблиця 11. Порівняння експериментальних значень МПВ на основі ЦКП і методу корисності з експериментальним значенням чистого алюмінію**

| Параметри               | Чистий алюміній | Центральний композиційний план |               | Метод корисності |               |
|-------------------------|-----------------|--------------------------------|---------------|------------------|---------------|
|                         |                 | експериментальне               | відхилення, % | експериментальне | відхилення, % |
| Швидкість різання       | 1000            | 1000                           |               | 1000             |               |
| Швидкість подачі, мм/хв | 100             | 100                            |               | 100              |               |
| Глибина різання, мм     | 0,1             | 0,1                            |               | 0,1              |               |
| Графен, %               | 0               | 2                              |               | 1                |               |
| $Ra$ , мкм              | 0,686           | 0,357                          | 47,96         | 0,331            | 51,75         |
| $Rz$ , мкм              | 3,119           | 2,871                          | 7,95          | 2,107            | 32,45         |
| СЕ, Ватт                | 305,89          | 270,68                         | 11,51         | 295,49           | 3,40          |
| $Avg, Acc., м/с^2$      | 2,377           | 1,573                          | 33,82         | 1,332            | 43,96         |

## ВИСНОВКИ

Досліджено оброблюваність сухим точінням АММК, диспергованого частинками графену. В процесі лиття з перемішуванням синтезували необхідні матеріали заготовки з характерними фізичними, механічними та морфологічними властивостями. Підвищення процентного вмісту вуглецю спостерігали за допомогою енергодисперсійного рентгенівського аналізу в процесі додавання графену до металевої матриці. Реалізовано оптимізацію параметрів процесу для отримання мінімальних  $Ra$ ,  $Rz$ , споживання енергії та вібрації, статистичний метод МПВ на основі ЦКП та концепцію корисності. Проведено моделювання відгуку виходів процесу та визнано прийнятним з довірчим інтервалом 95 %. Розроблені таким способом рівняння регресії вищого порядку далі використовували для оптимізації відгуку, а набір оптимальних умов обрентувували шляхом виконання підтверджуючих тестів.

Щільність синтезованого металевого матричного композита менша в порівнянні з чистим алюмінієм у разі додавання графену. Це може бути результатом пористості чистого алюмінієвого матеріалу та атомної дифузії алюмінію та графену за високих температур.

Чистий алюміній має найвищу міцність на розтягування та стиск порівняно з композитами, зміцненими графеном, завдяки збільшенню крихкості композита зі збільшенням відсотка вуглецю.

У результаті дисперсійного аналізу значення коефіцієнта кореляції  $R^2$  для відгуків наближаються до 1, що свідчить про те, що прогнозована модель є придатною та значущою.

Швидкість різання є важливою для кожного відгуку. Швидкість подачі та глибина різання виявилися значущими для всіх відгуків, за винятком СЕ. Масовий відсоток графену є значущим для  $Rz$  і середнього прискорення. Термін взаємодії ( $S \times F$ ) значущий лише для середнього прискорення.

Швидкість подачі має найвищий внесок для  $Ra$  (85,3541 %) і середнього прискорення (77,97993 %). Так само швидкість різання має найбільший відсоток внеску для  $Rz$  (76,37758 %) і СЕ (85,75724 %).

Оптимальними вхідними параметрами у МПВ на основі ЦКП є швидкість різання – 1000 об/хв, швидкість подачі – 100 мм/хв, глибина різання – 0,1 мм і кількість графену – 2 % зі зведеними значеннями бажаності 0,9010.

Для методу корисності комбінація параметрів, що має найвище загальне значення корисності, вважається оптимальною. У даному випадку швидкість різання, що дорівнювала 1000 об/хв, швидкість подачі – 100 мм/хв, глибина різання – 0,1 мм і кількість графену – 1 %, є оптимальними налаштуваннями, оскільки відповідне загальне значення корисності становить 8,299349565.

Під час порівняння оптимізації МПВ на основі ЦКП та оптимізації методу корисності було виявлено, що метод корисності забезпечує кращий результат порівняно з МПВ на основі ЦКП щодо шорсткості поверхні, а також моніторингу вібрації (середнє прискорення). Проте МПВ на основі ЦКП демонструє кращі результати у випадку СЕ порівняно з корисності.

Покращення значень шорсткості поверхні (51,75 і 32,45 % для  $R_a$  і  $R_z$  відповідно) і вібраційних характеристик (43,96 %) було досягнуто завдяки включенню графену в АММК і використанню концепції корисності.

### ПОДЯКИ

Автори висловлюють вдячність за підтримку, надану TEQIP III, VSSUT, Бурла, Одіша (VSSUT/TEQIP/86/2020 від 20/01/2020 та VSSUT/TEQIP/82/2020 від 20.01.2020) для проведення дослідницької роботи.

### ЗАЯВА ПРО РОЗКРИТТЯ ІНФОРМАЦІЇ

Автори не повідомили про потенційний конфлікт інтересів.

### ЗАЯВА ПРО НАЯВНІСТЬ ДАНИХ

Дані, які підтверджують висновки цього дослідження, доступні в рукописі та можуть бути отримані від відповідного автора за запитом.

Manojit Das, Soumya R. Parimanik, Trupti Ranjan Mahapatra,  
Debadutta Mishra, Dilip Kumar Sahu  
Department of Production Engineering,  
Veer Surendra University of Technology, Burla, Odisha, India  
Characteristics, machinability modeling, and machining  
performance improvement of graphene reinforced Al-MMC  
using CRSM and Utility method

*The present experimental research examines the machinability of graphene-based aluminium metal matrix composite (AMMC) using a polycrystalline diamond (PCD) carbide-insert tool under a dry environment and compared it with that of pure aluminium. The AMMCs are synthesized by reinforcing 0, 0.5, 1, 2, and 3 wt % of graphene particles via the stir casting process and are characterized for their density, tensile, compression, micro-hardness, and morphological properties. Response optimization is performed to minimize the two surface roughness factors ( $R_a$  and  $R_z$ ), power consumption and vibration (average acceleration). The central composite design-based response surface methodology (CRSM) is implemented for planification of the experimentation and subsequent higher-order regression response modelling of the actual process outputs is obtained. The characterization and machinability of AMMCs incorporating higher (1, 2, and 3) wt % of graphene is first time investigated alongside multi-performance ( $R_a$ ,  $R_z$ , power consumption, and vibration) optimization. The optimal combination of the process parameters resulting in simultaneous minimization of all the responses is also acquired using the Utility concept, compared to those obtained using the desirability approach in RSM and validated by conducting the confirmatory test. Improvement in surface roughness values (7.85 % and 36.26 % for  $R_a$  and  $R_z$ , respectively) and average acceleration (18.09 %) are*

observed via the Utility method in comparison to the CRSM. Enhanced output results in comparison to pure aluminium are also observed.

**Keywords:** machinability, graphene, AMMC, CRSM, Utility method, ANOVA.

1. Kumar P.L., Lombardi A., Byczynski G., Murty S.V.S.N., Murty B.S., Bichler L. Recent advances in aluminium matrix composites reinforced with graphene-based nanomaterial: A critical review. *Prog. Mater. Sci.* 2022. Vol. 128. art. 100948.
2. Sharma S., Singh J., Gupta M.K., Mia M., Dwivedi S.P., Saxena A., Chattopadhyaya S., Singh R., Pimenov D.Yu., Korkmaz M.E. Investigation on mechanical, tribological and microstructural properties of Al–Mg–Si–T6/SiC/muscovite-hybrid metal-matrix composites for high strength applications. *J. Mater. Res. Technol.* 2021. Vol. 12. P. 1564–1581.
3. Sekhar K.C., Surakasi R., Roy D., Rosy P.J., Sreeja T.K., Raja S., Chowdary V.L. Mechanical behavior of aluminum and graphene nanopowder-based composites. *Int. J. Chem. Eng.* 2022. Vol. 2022. art. 2224482.
4. Anbuhezhiyan G., Mohan B., Senthilkumar N., Pugazhenti R. Synthesis and characterization of silicon nitride reinforced Al–Mg–Zn alloy composites. *Met. Mater. Int.* 2021. Vol. 27, no. 8. P. 3058–3069.
5. Su H., Gao W., Feng Z., Lu Z. Processing, microstructure and tensile properties of nano-sized Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> particle reinforced aluminum matrix composites. *Mater. Des. (1980–2015)*. 2012. Vol. 36. P. 590–596.
6. Khanna V., Kumar V., Bansal S.A. Mechanical properties of aluminium-graphene/carbon nanotubes (CNTs) metal matrix composites: Advancement, opportunities and perspective. *Mater. Res. Bull.* 2021. Vol. 138. art. 111224.
7. Behera R.K., Samal B.P., Panigrahi S.C., Muduli K.K. Microstructural and mechanical analysis of sintered powdered aluminium composites. *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 2020. art. e1893475.
8. Yadav R., Dwivedi V.K., Islam A., Dwivedi S.P. Analysis of mechanical properties of Al-based metal matrix composite reinforced with ES and RHA. *World J. Eng.* 2021. Vol. 18, no. 6. P. 930–937.
9. Patil I.S., Anarghya A., Rao S.S., Herbert M.A. Experimental investigation of tensile fractography and wear properties of Al–12.5Si alloy reinforced with ZrO<sub>2</sub> using spray deposition method. *Mater. Today Commun.* 2022. Vol. 30. art. 103217.
10. Pandian V., Kannan S. Processing and preparation of aerospace-grade aluminium hybrid metal matrix composite in a modified stir casting furnace integrated with mechanical super-sonic vibration squeeze infiltration method. *Mater. Today Commun.* 2021. Vol. 26. art. 101732.
11. Srivastava A.K., Sharma B., Saju B.R., Shukla A., Saxena A., Maurya N.K. Effect of Graphene nanoparticles on microstructural and mechanical properties of aluminium based nanocomposites fabricated by stir casting. *World J. Eng.* 2020. Vol. 17, no. 6. P. 859–866.
12. Jagannath K., Sharma S., Mohan N., Kini A., Prabhu P. Characteristic study for low melting point MMC using stir casting technique. *World J. Eng.* 2014. Vol. 10, no. 6. P. 529–534.
13. Kumar S., Kumar K., Maurya M. Parametric optimization of friction stir processing on micro-hardness of Al/B<sub>4</sub>C composite. *Int. J. Mater. Res.* 2021. Vol. 112, no. 11. P. 898–909.
14. Bodunrin M.O., Alaneme K.K., Chown L.H. Aluminium matrix hybrid composites: a review of reinforcement philosophies; mechanical, corrosion and tribological characteristics. *J. Mater. Res. Technol.* 2015. Vol. 4, no. 4. P. 434–445.
15. Surappa M.K. Aluminium matrix composites: Challenges and opportunities. *Sadhana*. 2003. Vol. 28, no. 1. P. 319–334.
16. Panneerselvam T., Kandavel T.K., Arun K.S., Dineshkumar V. Tribological study on hybrid reinforced aluminium-based metal matrix composites. *Int. J. Surf. Sci. Eng.* 2018. Vol. 12, nos. 5–6. P. 449–466.
17. Venkatesan S., Xavier A.M. Tensile behavior of aluminum alloy (AA7050) metal matrix composite reinforced with graphene fabricated by stir and squeeze cast processes. *Sci. Technol. Mater.* 2018. Vol. 30, no. 2. P. 74–85.
18. Alipour M., Eslami-Farsani R. Synthesis and characterization of graphene nanoplatelets reinforced AA7068 matrix nanocomposites produced by liquid metallurgy route. *Mater. Sci. Eng. A*. 2017. Vol. 706. P. 71–82.
19. Mirjavadi S.S., Alipour M., Hamouda A.M.S., Kord S., Koppad P.G., Abuzin Yu.A., Keshavamurthy R. Effect of hot extrusion and T6 heat treatment on microstructure and mechanical

- properties of Al–10Zn–3.5Mg–2.5Cu nanocomposite reinforced with graphene nanoplatelets. *J. Manuf. Process.* 2018. Vol. 36. P. 264–271.
20. Butola R., Yuvaraj N., Singh R.P., Tyagi L., Khan F. Evaluation of microhardness and wear properties of Al 6063 composite reinforced with yttrium oxide using stir casting process. *World J. Eng.* 2021. Vol. 19, no. 3. P. 361–367.
  21. Yolshina L.A., Muradymov R.V., Korsun I.V., Yakovlev G.A., Smirnov S.V. Novel aluminum-graphene and aluminum-graphite metallic composite materials: Synthesis and properties. *J. Alloys Compd.* 2016. Vol. 663. P. 449–459.
  22. Etemadi R., Wang B., Pillai K.M., Niroumand B., Omrani E., Rohatgi P. Pressure infiltration processes to synthesize metal matrix composites – A review of metal matrix composites, the technology and process simulation. *Mater. Manuf. Process.* 2018. Vol. 33, no. 12. P. 1261–1290.
  23. Jeon C.-H., Jeong Y.-H., Seo J.-J., Tien H.N., Hong S.-T., Yum Y.-J., Hur S.-H., Lee K.-J. Material properties of graphene/aluminum metal matrix composites fabricated by friction stir processing. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2014. Vol. 15, no. 6. P. 1235–1239.
  24. Maurya R., Kumar B., Ariharan S., Ramkumar J., Balani K. Effect of carbonaceous reinforcements on the mechanical and tribological properties of friction stir processed Al6061 alloy. *Mater. Des.* 2016. Vol. 98. P. 155–166.
  25. Khodabakhshi F., Nosko M., Gerlich A.P. Effects of graphene nano-platelets (GNPs) on the microstructural characteristics and textural development of an Al-Mg alloy during friction-stir processing. *Surf. Coat. Technol.* 2018. Vol. 335. P. 288–305.
  26. Khodabakhshi F., Arab S.M., Švec P., Gerlich A.P. Fabrication of a new Al-Mg/graphene nanocomposite by multi-pass friction-stir processing: Dispersion, microstructure, stability, and strengthening. *Mater. Charact.* 2017. Vol. 132. P. 92–107.
  27. Sharma A., Sharma V.M., Sahoo B., Pal S.K., Paul J. Effect of multiple micro channel reinforcement filling strategy on Al6061-graphene nanocomposite fabricated through friction stir processing. *J. Manuf. Process.* 2019. Vol. 37. P. 53–70.
  28. Dixit S., Mahata A., Mahapatra D.R., Kailas S.V., Chattopadhyay K. Multi-layer graphene reinforced aluminum – Manufacturing of high strength composite by friction stir alloying. *Compos. Part B Eng.* 2018. Vol. 136. P. 63–71.
  29. Das A., Patel S.K., Biswal B.B., Das S.R. Machinability investigation and cost estimation during finish dry hard turning of AISI 4340 steel with untreated and cryo treated cermet inserts. *J. Superhard Mater.* 2019. Vol. 41, no. 4. P. 247–264.
  30. Logothetis N., Haigh A. Characterizing and optimizing multi-response processes by the taguchi method. 1988.
  31. Ferreira J., Coppini N., Neto F. Characteristics of carbon-carbon composite turning. *J. Mater. Process. Technol.* 2001. Vol. 109. P. 65–71.
  32. Sehijpal S., Shan H., Kumar P. Parametric optimization of magnetic-field-assisted abrasive flow machining by the Taguchi method. *Qual. Reliab. Eng. Int.* 2002. Vol. 18. P. 273–283.
  33. Kumar M., Singh H. Experimental investigation on surface integrity in machining of Inconel X750 with WEDM using Taguchi technique. *Int. J. Process Manag. Benchmarking.* 2018. Vol. 8, no. 4. P. 516–530.
  34. Naik D.K., Maity K. Application of desirability function based response surface methodology (DKII) for investigating the plasma arc cutting process of sailhard steel. *World J. Eng.* 2018. Vol. 15, no. 4. P. 505–512.
  35. Horváth R., Drégelyi-Kiss Á. Analysis of surface roughness of aluminum alloys fine turned: United phenomenological models and multi-performance optimization. *Measurement.* 2015. Vol. 65. P. 181–192.
  36. Kumar N.G.S., Shankar G.S.S., Basavarajappa S., Suresh R. Some studies on mechanical and machining characteristics of Al2219/n-B<sub>4</sub>C/MoS<sub>2</sub> nano-hybrid metal matrix composites. *Measurement.* 2017. Vol. 107. P. 1–11.
  37. Kumar R., Chauhan S. Study on surface roughness measurement for turning of Al 7075/10/SiCp and Al 7075 hybrid composites by using response surface methodology (KII) and artificial neural networking (ANN). *Measurement.* 2015. Vol. 65. P. 166–180.
  38. Yadav R.N. A hybrid approach of Taguchi-response surface methodology for modeling and optimization of duplex turning process. *Measurement.* 2017. Vol. 100. P. 131–138.
  39. Razavykia A., Farahany S., Yusof N.M. Evaluation of cutting force and surface roughness in the dry turning of Al–Mg<sub>2</sub>Si *in-situ* metal matrix composite inoculated with bismuth using DOE approach. *Measurement.* 2015. Vol. 76. P. 170–182.

40. Kumar A., Mahapatra M.M., Jha P.K. Effect of machining parameters on cutting force and surface roughness of *in situ* Al–4.5%Cu/TiC metal matrix composites. *Measurement*. 2014. Vol. 48. P. 325–332.
41. Dixit A., Roy S., Kumar K. Strategic process optimisation for tribological behaviour of silica gel reinforced aluminium composite material by neuro-grey modelling. *Int. J. Process Manag. Benchmarking*. 2016. Vol. 6, no. 4. P. 544–560.
42. Sahoo A.K., Panda A., Nayak B.B., Kumar R., Das R.K., Nayak R.K. Machinability model and multi-response optimisation of process parameters through regression and utility concept. *Int. J. Process Manag. Benchmarking*. 2021. Vol. 11, no. 3. art. 390.
43. Ramaswamy G.A., Krishna A., Gautham M., Sudharshan S.S., Gokulachandran J. Optimisation and prediction of machining parameters in EDM for Al–ZrO<sub>2</sub> using soft computing techniques with Taguchi method. *Int. J. Process Manag. Benchmarking*. 2021. Vol. 11, no. 6. P. 864–890.
44. Xiang S., Wang X., Gupta M., Wu K., Hu X., Zheng M. Graphene nanoplatelets induced heterogeneous bimodal structural magnesium matrix composites with enhanced mechanical properties. *Sci. Rep.* 2016. Vol. 6, no. 1. art. 38824.
45. Box G.E.P., Draper N.R. Empirical model-building and response surfaces. Oxford, England: John Wiley & Sons, 1987. 669 p.
46. Kuar A.S., Dhara S.K., Mitra S. Multi-response optimisation of Nd:YAG laser micro-machining of die steel using Response Surface Methodology. *Int. J. Manuf. Technol. Manag.* 2010. Vol. 21, nos. 1–2. P. 17–29.
47. Patel G.C.M., Lokare D., Chate G.R., Parappagoudar M.B., Nikhil R., Gupta K. Analysis and optimization of surface quality while machining high strength aluminium alloy. *Measurement*. 2020. Vol. 152. art. 107337.
48. Das B., Parimanik S.R., Mahapatra T.R., Mishra D. Machinability assessment of NiTiInol shape memory alloy in electrochemical machining. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 2022. Vol. 24, nos. 3–4. P. 280–313.

Надійшла до редакції 24.11.22

Після доопрацювання 14.12.22

Прийнята до опублікування 17.12.22