DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-02
УДК 621.923

Ф.В. НОВІКОВ, доктор технічних наук
професор кафедри здорового способу життя, технологій та безпеки життєдіяльності
e-mail: novikovfv@hneu.net ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6996-3356
Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця
проспект Науки, 9-А, м. Харків, 61166, Україна

ДІАГНОСТИКА ТА УМОВИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ НА ОСНОВІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

Метою роботи є створення нового теоретичного підходу до діагностики процесу шліфування на основі відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування та встановлення за цих умов напрямів підвищення його ефективності. Для цього в роботі встановлено аналітичні залежності для визначення енергетичних параметрів процесу шліфування: умовного напруження різання (енергомісткості обробки) і коефіцієнта шліфування (відношення тангенціальної і радіальної складових сили різання), які протилежно пов'язані з умовним кутом зсуву оброблюваного матеріалу. Виходячи із цього, розрахунками доведено, що зменшуючи експериментально встановлену тангенціальну складову сили різання, можна завжди досягти рівності значень умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу, які визначаються умовним напруженням різання і коефіцієнтом шліфування. Виконання цієї умови забезпечує відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування, що є новим в теорії обробки матеріалів різанням. Розрахунками встановлено, що під час алмазно-іскрового шліфування частка енергії тертя приймає фактично нульове значення, оскільки, завдяки дії електричних розрядів в зоні різання, забезпечується висока ріжуча здатність алмазного круга на металевій зв'язці та виключається його тертя із оброблюваним матеріалом. Фактично нульове значення частки енергії тертя отримано і в умовах мікрорізання одиничним алмазним зерном. Все це вказує на достовірність запропонованого в роботі теоретичного підходу до діагностики процесу шліфування.

Також встановлено, що в умовах звичайного абразивного шліфування частка енергії тертя може перевищувати частку енергії «чистого» різання. Це пов'язано із низькою ріжучою здатністю абразивного круга, оскільки значна частина абразивних зерен працює лише в режимі тертя з оброблюваним матеріалом. Показано, що розрахункові значення коефіцієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) мало відрізняються та фактично відповідають значенням відомого відношення товщини мікрозрізу до радіусу вершини абразивного зерна, за якими процес стружкоутворення в зоні різання майже не відбу-вається. В цих випадках важливо застосовувати ефективні методи правлення та імпрегнування шліфувальних кругів, ефективні технологічні середовища для підвищення їх ріжучої здатності. Отже знання реально встановлених значень коефіцієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) на основі запропонованого теоретичного рішення відкриває нові технологічні можливості підвищення ефективності процесу шліфування та створення високопродуктивних технологічних процесів обробки деталей машин.

КЛЮЧОВІ СЛОВА: *сила різання, енергомісткість обробки, коефіцієнт тертя, продуктивність обробки, математична модель*

Як цитувати: Новіков Ф. В. Діагностика та умови підвищення ефективності процесу шліфування на основі енергетичних параметрів. *Машнобудування*. 2025. Вип. 35 С. 13-24. DOI: https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-02

© Новіков Ф.В., 2025

Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

Вступ

Процеси різання матеріалів є основними у технології виготовлення деталей машин. Вони характеризуються високими показниками продуктивності та якості обробки, що пов'язано з відносно низькою енергомісткістю процесу різання порівняно з іншими процесами фізико-технічної обробки. Найбільший ефект досягається в умовах різанням лезовими інструментами [1]. Під час шліфування, особливо високотвердих матеріалів, навпаки, енергомісткість та сили і температура різання збільшуються, а це приводить до появи на оброблюваних поверхнях різних дефектів (припікань, мікротріщин, мікросколів тощо) та зниження якості обробки [2, 3]. Для зменшення силової напруженості процесу шліфування застосовують алмазні круги, в тому числі, на металевих зв'язках, та прогресивні електрофізикохімічні методи їх правлення, ефективні технологічні середовища [4, 5]. Важливого значення набули процеси переривчастого шліфування. які дозволяють отримати подвійний ефект обробки: одно-часно забезпечити високу різальну здатність шліфувального круга та зменшити температуру шліфування [6]. Однак вибір раціональних умов шліфування при цьому здійснюють без проведення достатньо глибокої діагностики процесу, особливо, без встановлення часток енергій різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, оскільки наявність інтенсивного тертя приводить до суттєвого збільшення енергомісткості, сили та температури різання. Тому управління енергією тертя в зоні обробки та забезпечення можливості її зменшення до нуля є важливим кроком підвищення ефективності шліфування. Для цього потрібно вміти науково обґрунтовано підходити до відокремлення частки енергії тертя від загальної енергії, що витрачається під час шліфування, та на цій основі розробляти високопродуктивні й високоякісні технологічні процеси обробки деталей машин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Основними методами дослідження закономірностей процесу шліфування традиційно є експериментальні методи, які дозволяють встановити основні технологічні параметри шліфування в залежності від параметрів режиму шліфування, характеристик шліфувальних кругів та оброблюваних матеріалів. На цій основі створено емпіричні моделі процесів шліфування для розрахунку оптимальних умов обробки. Однак вони не розкри-вають фізичну сутність процесу шліфування, оскільки в них відсутні взаємозв'язки між вхідними і вихідними параметрами. Тому на зміну емпіричним моделям процесів шліфування прийшли математичні (аналітичні) моделі [7, 8]. Їх призначення – встановлення внутрішніх зв'язків (параметрів) між вхідними і вихідними параметрами процесу шліфування на основі таких фізичних величин, як імовірнісна товщина зрізу окремим зерном шліфувального круга; механічне навантаження, що діє на окреме зерно; імовірнісні закони виступу зерен над зв'язкою шліфувального круга; величина зношування ріжучого зерна тощо [9 – 11]. Практичне застосування цих математичних моделей дозволило отримати більш узагальнені рішення порівняно з емпіричними моделями. Але серед наведених фізичних величин, на яких засновано математичні (аналітичні) моделі процесу шліфування, відсутні такі важливі величини, як частки енергій різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування, які є визначальними в забезпеченні суттєвого підвищення показників продуктивності, якості та точності обробки. Тому встановлення цих величин на основі математичного моделювання процесу шліфування та застосування відповідних експериментальних даних є актуальним завданням, що має важливе теоретичне і практичне значення в подальшому розширенні технологічних можливостей процесу шліфування.

Постановка проблеми

У роботі [12] наведено математичну (аналітичну) модель визначення параметрів силової напруженості процесу шліфування: тангенціальної і радіальної складових сили різання, умовного напруження різання (енергомісткості обробки) для процесу «чистого» різання без урахування сили тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом. Встановлені аналітичні залежності пов'я-зують параметри силової напруженості процесу шліфування із такою важливою фізичною величиною, як умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу, що може змінюватися в межах 0 - 45°. Тому, якщо підкорити теоретичні рішення експериментально встановленим значенням тангенціальної і ра-діальної складових сили різання, то можна визначити частки енергій різання і тертя в загальному енергетичному балансі процесу шліфування. А це дозволить на основі діагностики процесу шліфування розкрити його фізичну сутність та спрогнозувати подальші дії щодо суттєвого зменшення енергії (сили) тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом, енергомісткості обробки, температури шліфування та, в цілому, підвищити його ефективність [12, 13]. Запропонований підхід є принципово новим, відсутнім в науково-технічній літературі.

Метою роботи є створення нового теоретичного підходу до діагностики процесу шліфування на основі відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування та встановлення за цих умов напрямів підвищення його ефективності.

Виклад основного матеріалу

Для досягнення поставленої мети скористаємося аналітичними залежностями для визначення тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання [13]:

$$P_z = \sigma \cdot S_{сум}; \quad (1)$$

$$P_y = \frac{\sigma}{K_ш} \cdot S_{сум}, \quad (2)$$

де σ – умовне напруження різання, Н/м^2; $S_{сум} = Q / V_{кр}$ – сумарна миттєва площа поперечного перерізу зрізу всіма одночасно працюючими зернами шліфувального круга, м^2; $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ – продуктивність обробки, м^3/с; $V_{дет}$ – швидкість деталі, м/с; B – ширина шліфування, м; t – фактична глибина шліфування, м; $V_{кр}$ – швидкість круга, м/с; $K_ш$ – коефіцієнт абразивного різання (коефіцієнт шліфування).

У роботі [13] також наведено аналітичні залежності для визначення умовного напруження різання σ та коефіцієнта шліфування $K_ш = P_z / P_y$:

$$\sigma = \frac{\sigma_{ст}}{tg\beta}; \quad (3)$$

$$K_ш = tg2\beta, \quad (4)$$

де $\sigma_{ст}$ – межа міцності на стиск оброблюваного матеріалу, Н/м^2; β – умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу.

Залежності (3) і (4) справедливі для умов «чистого» різання, коли в процесі шліфування відсутнє тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Використовуючи експериментально встановлені значення умовного напруження різання $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q$ та коефіцієнта шліфування $K_ш = P_z / P_y$, за залежностями (3) і (4) можна визначити значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2. Параметри P_z, P_y і $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ встановлюються на основі експериментальних даних.

Для умов «чистого» різання розраховані за цими залежностями значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2 будуть приблизно однаковими. За наявності в процесі шліфування тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом значення кутів β_1 і β_2 будуть відрізнятися.

Отже, використовуючи залежності (3) і (4), можна проводити діагностику процесу шліфування за енергетичними параметрами σ і $K_ш = P_z / P_y$. Якщо виявиться, що встановлені значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2

приблизно рівні, можна зробити висновок щодо високої ефективності процесу шліфування. У цьому випадку фактично виконується умова «чистого» різання, що виключає інтенсивне тертя в зоні шліфування та збільшення сили і температури різання, дозволяє підвищити показники якості, точності та продуктивності обробки. Якщо розраховані значення кутів β_1 і β_2 відрізняються, то це свідчить про порушення енергетичного балансу в процесі різання, оскільки значна частина енергії, яка споживається в процесі шліфування, йде на подолання сили тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Для оцінювання запропонованого рішення проведено експериментальні дослід-ження параметрів процесу плоского шліфування за пружною схемою з радіальним зусиллям $P_y = 60$ Н плоского зразка із сталі Р18 ($\sigma_{cm} = 3600$ Н/м^2) абразивним кругом 24А40М36К5 з режимом шліфування: швидкість круга – $V_{кр} = 26$ м/с; швидкість деталі – $V_{дет} = 6$ м/хв; ширина шліфування – B=10 мм.

Результати досліджень наведено у табл. 1. Встановлено, що зі збільшенням часу обробки фактична глибина шліфування t, а, відповідно, і продуктивність обробки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ зменшилися дуже значно – у 12,3 рази.

При цьому тангенціальна складова сили різання P_z, коефіцієнт шліфування $K_ш = P_z / P_y$ та потужність шліфування N зменшилися незначно – менше, ніж у 2 рази. Отже, користуючись лише наведеними експериментальними даними, складно визначити зміни внутрішніх параметрів обробки, які привели до суттєвої зміни продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$. Тому слід скористатися залежностями (3) і (4) для встановлення чинників, що привели до зменшення продуктивності обробки $Q = B \cdot V_{дет} \cdot t$ в 12,3 рази зі збільшенням часу обробки.

Таблиця 1

Вплив часу обробки на параметри шліфування за пружною схемою плоских зразків із сталі Р18 ($V_{кр} = 26$ м/с; $V_{дет} = 6$ м/хв; B=10 мм; $P_y = 60$ Н)

Table 1

The influence of processing time on the parameters of grinding according to the elastic scheme of flat samples made of steel P18 ($V_{кр} = 26$ m/s; $V_{дет} = 6$ m/min; B=10 mm; $P_y = 60$ N)

Номер експерименту	Час обробки τ, хв	Фактична глибина шліфування t за 5 проходжень, мм	Продуктивність обробки Q, мм^3/хв	Потужність шліфування N, Вт	Тангенціальна складова сили різання P_z, Н	Коефіцієнт шліфування $K_ш$	Умовне напруження різання $\sigma \cdot 10^3$, Н/ мм^2
1	0,1	0,037	2220	840	28,8	0,480	22,7
2	0,5	0,013	780	854	22,4	0,373	65,7
3	1,0	0,008	480	630	21,5	0,358	78,7
4	2,0	0,006	360	522	17,9	0,299	87,0
5	3,0	0,005	300	480	16,4	0,273	96,0
6	5,0	0,003	180	450	15,2	0,253	150,0

Очевидно, основним чинником такого різкого зменшення глибини шліфування є інтенсивне зношування ріжучих зерен та затуплення шліфувального круга. У результаті процес різання з часом обробки фактично переходить до процесу тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом.

У табл. 2 наведено розраховані за залежностями (3) і (4) значення умовних кутів зсуву оброблюваного матеріалу β_1 і β_2, розрахункові значення тангенціальної складової сили різання P_z та коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ (за умов «чистого» різання), коефіцієнта тертя f.

Таблиця 2
Розрахункові значення параметрів шліфування
Table 2
Estimated values of grinding parameters

Номер експе-рименту	Час обробки τ, хв	Умовний кут зсуву оброблювано го матеріалу β_1, град.	Умовний кут зсуву оброблювано го матеріалу β_2, град.	Умова $\beta_1 = \beta_2$, град.	Тангенціальна складова сили різання $P_{z.p}$, Н	Коефіцієнт шліфування $K_{ш.p}$	Коефі-цієнт тертя f
1	0,1	9	12,8	10,8	23,9	0,3984	0,0816
2	0,5	3,1	10,25	5,7	12,28	0,2033	0,1697
3	1,0	2,6	9,85	5,2	10,965	0,1825	0,1755
4	2,0	2,4	8,35	4,5	9,487	0,1588	0,1402
5	3,0	2,2	7,65	4,1	8,528	0,1418	0,1312
6	5,0	1,3	7,1	3,1	6,536	0,1088	0,1442

Як випливає з табл. 2, для всіх проведених експериментів має місце розходження значень кутів β_1 і β_2. Наприклад, для першого експерименту $\beta_1 = 9^o$ і $\beta_2 = 12{,}8^o$. При цьому значення кутів β_1, розрахованих за залежністю (3), менше аналогічних значень кутів β_2, розрахованих за залежністю (4). Це свідчить про те, що у зоні шліфування, поруч із процесом «чистого» різання, відбувається інтенсивне тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Для визначення частки енергії «чистого» різання та частки енергії тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом (у загальному енергетичному балансі процесу шліфування) слід домогтися рівності значень кутів β_1 і β_2 у залежностях (3) і (4). Це досягається зменшенням експериментально встановленої тангенціальної складової сили різання P_z на величину сили тертя. У результаті функція $tg\beta_1$ буде збільшуватися, а функція $tg\beta_2$ – буде зменшуватися, що призведе до досягнення рівності значень кутів β_1 і β_2.

Для здійснення розрахунків необхідно послідовно в однакову кількість разів зменшити значення тангенціальної складової сили різання P_z в залежностях (3) і (4). У результаті встановлено (табл. 2), що для 1-го експерименту зі зменшенням тангенціальної складової сили різання P_z в 0,83 рази кути β_1 і β_2 набувають однакового значення, рівного $10{,}8^o$. Тоді коефіцієнт шліфування $K_{ш.p}$, що відповідає умові «чистого» різання, дорівнює $K_{ш.p} =$ 0,398, тобто приймає значення, яке в 0,83 рази менше експериментально встановленого значення коефіцієнта шліфування $K_{ш} = 0{,}48$, що враховує як умови «чистого» різання, так і умови тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Коефіцієнт тертя f дорівнює різниці експериментально встановленого значення коефіцієнта шліфування $K_{ш} = 0{,}48$ і розрахункового значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.p} = 0{,}3984$, що відповідає умові «чистого» різання, тобто дорівнює значенню f = 0,0816.

Частка енергії «чистого» різання у загальному енергетичному балансі процесу шліфування становить 83%, частка енергії тертя – 17%.

Для 6-го експерименту (табл. 1) кути β_1 і β_2 також приймають різні значення, відповідно, β_1=1,3^o і β_2=7,1^o. Отже, поряд з процесом «чистого» різання, при шліфуванні має місце інтенсивне тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом. Для визначення умов «чистого» різання необхідно в розрахунках забезпечити рівність значень кутів β_1 і β_2. Як і в попередньому випадку, зменшуючи тангенціальну складову сили різання P_z в 0,43 рази, досягнуто однакових значень кутів β_1 = β_2 =3,1^o. Виходячи з цього, коефіцієнт шліфування $K_{ш.p}$, що відповідає умові «чистого» різання, дорівнює $K_{ш.p} = 0{,}1088$, тобто приймає значення, яке в 0,43 рази менше експериментально встановленого

значення коефіцієнта шліфування $K_{ш}$ = 0,253, що враховує як умови чистого різання, так і умови тертя шліфувального круга з оброблюваним матеріалом.

Коефіцієнт тертя f дорівнює різниці експериментально встановленого значення коефіцієнта шліфування $K_{ш} = 0{,}253$ і розрахункового значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р} = 0{,}1088$, що відповідає умові «чистого» різання, тобто коефіцієнт тертя дорівнює f = 0,1442.

Частка енергії «чистого» різання у загальному енергетичному балансі процесу шліфування становить 43%, а частка енергії тертя – 57%. Отже, частка енергії тертя перевищує частку енергії «чистого» різання, що пов'язано із низькою ріжучою здатністю абразивного круга, оскільки значна частина абразивних зерен працює лише в режимі тертя з оброблюваним матеріалом. При цьому розрахункові значення коефі-цієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) мало відрізняються. Цим і пояснюється суттєве зменшення продуктивності обробки – у 12,3 рази – з часом обробки (табл. 1) та дозволяє більш повно розкрити фізичну сутність і технологічні можливості процесу шліфування [14].

Проведемо теоретичний аналіз зміни коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ зі збільшенням часу обробки. Для цього встановимо аналітичний зв'язок між коефіцієнтом шліфування $K_{ш.р}$ та відношенням товщини мікрозрізу a_z і радіусу вершини абразивного зерна R (рис. 1).

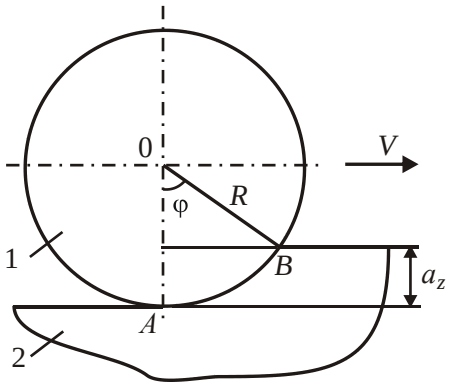

Рис. 1 – Розрахункова схема відношення a_z / R: 1 – абразивне зерно; 2 – оброблюваний матеріал

Fig. 1 – Calculation scheme of the relationship a_z / R: 1 – abrasive grain; 2 – processed material

Якщо прийняти, що тангенціальна складова сили різання $P_{z.p}$ пропорційна товщині мікрозрізу a_z, а радіальна складова сили різання $P_{y.p}$ пропорційна довжині дуги контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом АВ (рис. 1), то параметр $K_{ш.p}$ виразиться:

$$K_{ш.p} = \frac{P_{z.p}}{P_{y.p}} = \frac{a_z}{R \cdot \sin\varphi}, \qquad (5)$$

де $\sin\varphi = \frac{\sqrt{R^2 - (R - a_z)^2}}{R} = \frac{a_z}{R} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot R}{a_z} - 1}$.

Тоді

$$K_{ш.p} = \frac{P_{z.p}}{P_{y.p}} = \sqrt{\frac{a_z}{2 \cdot R - a_z}}. \qquad (6)$$

Оскільки $R >> a_z$, то залежність (6) спроститься:

$$K_{ш.p} = \frac{P_{z.p}}{P_{y.p}} = \sqrt{\frac{a_z}{2 \cdot R}}. \qquad (7)$$

У табл. 3 наведено розрахункові значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.p}$ в залежності від відношення a_z / R.

Таблиця 3

Розрахункові значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$

Table 3

Calculated values of the grinding coefficient $K_{ш.р}$

a_z / R	0,02	0,04	0,08	0,1	0,14	0,2	0,35	0,5
$K_{ш.р}$	0,1	0,14	0,2	0,224	0,264	0,316	0,418	0,5

Як показано в роботі [13], процес тертя абразивного зерна з оброблюваним матеріалом (під час процесу мікрорізання) розпочинається і, відповідно, припиняється за умови досягнення відношення товщини мікрозрізу a_z і радіусу вершини абразивного зерна R значень $a_z / R = 0{,}04 \ldots 0{,}14$.

Згідно табл. 3, зі збільшенням відношення a_z / R значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$ збільшуються. За умови $a_z / R = 0{,}02 \ldots 0{,}08$ коефіцієнт шліфування $K_{ш.р}$ приймає значення, які відповідають значенням коефіцієнта тертя абразивного зерна із оброблюваним матеріалом. Тому за цих умов процес мікрорізання не відбувається, а здійснюється лише процес тертя абразивного зерна із оброблюваним матеріалом. Процес мікрорізання розпочинається з більших значень відношення a_z / R.

Отже, розрахункові значення коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$, які наведено в табл. 3, погодяться з отриманими даними (табл. 2). Як видно, коефіцієнт шліфування $K_{ш.р}$ змінюється в діапазоні 0,398 … 0,1088. Згідно табл. 3, в діапазоні $a_z / R = 0{,}04 \ldots 0{,}14$ має місце пластичне деформування оброблюваного матеріалу фактично без утворення мікростружок. Тому частина значень коефіцієнта шліфування $K_{ш.р}$, починаючи з 0,264, входить до цього діапазону, що вказує майже на припинення знімання оброблюваного матеріалу. У результаті фактична глибина шліфування t приймає дуже малі значення, на рівні 0,006 – 0,003, що приводить до суттєвого зменшення продуктивності обробки.

Цим показано, що зменшення продуктивності обробки Q з часом (табл. 1) пов'язано зі збільшенням умовного напруження різання σ через інтенсивне зношування та затуплення шліфувального абразивного круга. Отже, в процесі шліфування необхідно домагатися зменшення умовного напруження різання σ завдяки підвищенню ріжучої здатності шліфувального круга. В цих випадках важливо застосовувати ефективні методи правлення та імпрегнування шліфувальних кругів, ефективні технологічні середовища, процеси вібраційного та переривчастого шліфування [10, 15].

Цього можна досягти також застосуванням методу алмазно-іскрового шліфування [16, 17], сутність якого полягає в підведенні в зону шліфування електричного струму у формі електричних розрядів для електроерозійного руйнування металевої зв'язки алмазного круга і стружок, що утворюються, та забезпечення високої ріжучої здатності алмазного круга. У результаті під час шліфування фактично виключається процес тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом, забезпечується суттєве зменшення сили і температури різання, підвищення показників якості, точності та продуктивності обробки.

У табл. 4 наведено отримані експериментальні значення основних показників алмазно-іскрового шліфування (із щільністю електричного струму $0{,}6 \cdot 10^5$ А/мм^2) зразка із твердого сплаву ВК8 ($\sigma_{ст} = 3600$ Н/м^2), які отримано під час шліфування алмазним кругом на металевій зв'язці 1А1 $300 \times 40 \times 127 \times 5$ АС6 250/200 М2-01 4 за пружною схемою ($P_y = const$; $V_{кр} = 28$ м/с; *Рв* – вага), показаною на рис. 2. Умовне напруження різання визначено за залежністю $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q$. Як видно, у всіх трьох розглянутих випадках (P_y = 40 Н; 60 Н і 80 Н) значення кутів β_1 і β_2 майже співпадають. Це вказує на те, що під час алмазно-іскрового шліфування фактично відсутнє тертя алмазного круга на металевій зв'язці із оброблюваним матеріалом. Отже має місце процес «чистого» різання, що вказує на ефективність застосування на практиці

цього прогресивного методу шліфування.

Таблиця 4
Експериментальні та розрахункові значення параметрів алмазно-іскрового шліфування
Table 4
Experimental and calculated values of diamond spark grinding parameters

Нормальна складова сили різання P_y, Н	Тангенціальна складова сили різання P_z, Н	Коефіцієнт шліфування $K_ш$	Умовне напруження різання $\sigma \cdot 10^3$, Н/ мм^2	Продуктивність обробки Q, мм^3/хв	Умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β_1, град.	Умовний кут зсуву оброблюваного матеріалу β_2, град.
40	9,2	0,23	46	344	5,0	6,5
60	12,6	0,21	39	556	6,0	6,0
80	16,0	0,2	36,6	755	6,2	5,7

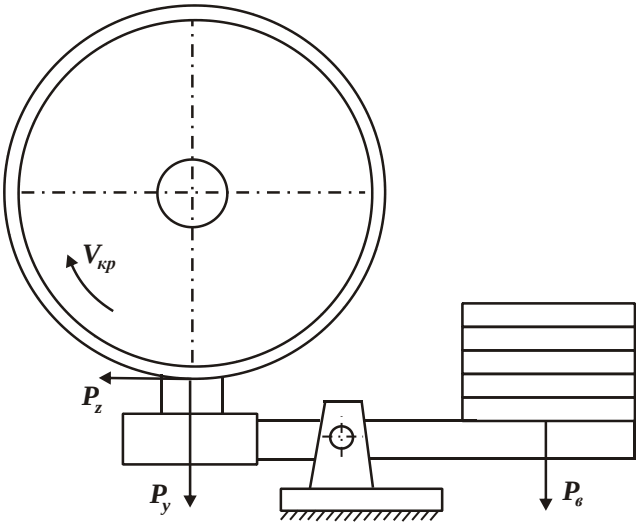

Рис. 2 – Схема пристрою для реалізації процесу алмазно-іскрового шліфування за пружною схемою
Fig. 2 – Diagram of a device for implementing the process of diamond spark grinding according to an elastic scheme

Такими ж високими технологічними показниками характеризується метод алмазного шліфування із безперервним автономним електрохімічним правленням алмазного круга на металевій зв'язці [11, 14]. Він отримав широке практичне застосування, особливо, в умовах шліфування виробів із твердих сплавів. Для оцінювання його технологічних можливостей було проведено експериментальні дослідження продуктивності обробки та тангенціальної P_z і радіальної P_y складових сили різання під час глибинного високопродуктивного круглого зовнішнього шліфування за жорсткою схемою циліндричної фрези (діаметром 160 мм) з ріжучими пластинами з твердого сплаву Т5К10 ($\sigma_{ст} = 4450$ Н/м^2) алмазним кругом на металевій зв'язці 1А1 300х25х5 АС6 200/160 М2-01 4. Умови обробки: $V_{кр} = 35$ м/с; $V_{дет} = 1$ м/хв; $t = 0{,}25$ мм; $B = 25$ мм. У результаті проведення експериментальних досліджень встановлено: $K_ш = 0{,}67$ ($P_z = 110$ Н; $P_y = 164{,}2$ Н). Умовне напруження різання дорівнює $\sigma = P_z \cdot V_{кр} / Q = 36960$ Н/мм^2 (для $Q = 6250$ мм^3/хв). Розрахунками встановлено: $\beta_1 = 7{,}5^o$; $\beta_2 = 16{,}9^o$. Як видно, значення кутів β_1 і β_2 значно відрізняються. Це пов'язано зі значною продуктивністю обробки і значним тертям алмазного круга із оброблюваним матеріалом. Умова $\beta_1 = \beta_2 = 11{,}1^o$ досягається шляхом зменшення

тангенціальної складової сили різання P_z = 110 Н в 0,61 рази, тобто до значення P_z = 67,1 Н. Тоді коефіцієнт шліфування $K_{ш.р}$ = 0,4087, частки енергії «чистого» різання і тертя, відповідно, дорівнюють: 0,61% і 0,39 %. Коефіцієнт тертя $f = 0{,}2613$.

Слід зазначити, що за наведених умов високопродуктивного глибинного шліфування без застосування безперервного автономного електрохімічного або електроерозійного правлення алмазний круг на металевій зв'язці швидко втрачає ріжучу здатність і процес шліфування фактично нездійсненний [9, 18].

Для перевірки достовірності наведеного в роботі теоретичного рішення визначено значення кутів β_1 і β_2 для умов мікрорізання одиничним алмазним зерном АС50 твердого сплаву Т15К6 ($\sigma_{ст} = 3900$ Н/м^2) із товщиною мікрозрізу $a_z = 8$ мкм і $V_{кр} = 35$ м/с, які отримано професором Узуняном М. Д. і наведено у роботі [16]. У результаті проведених експериментальних досліджень встановлено: $K_{ш} = 0{,}48$; σ = 20000 Н/мм^2. Відповідно, розрахунками визначено: $\beta_1 = 11^o$; $\beta_2 = 12{,}8^o$. Отже, значення кутів β_1 і β_2 незначно відрізняються, тобто в процесі мікрорізання має місце лише незначне тертя алмазного зерна з оброблюваним матеріалом. Також встановлено, що умова $\beta_1 = \beta_2 = 12^o$ виконується при зменшенні тангенціальної складової сили різання P_z в 0,93 рази, тобто при зменшенні коефіцієнта шліфування до значення $K_{ш.р} = 0{,}446$ та збільшенні умовного напруження різання σ до значення 18600 Н/мм^2. При цьому коефіцієнт тертя набуває невеликого значення $f = 0{,}034$, тобто процес мікрорізання одиничним алмазним зерном фактично здійснюється в умовах «чистого» різання. Це повністю підтверджує достовірність наведеного в роботі теоретичного рішення щодо розподілу часток енергій «чистого» різання і тертя в процесі шліфування. Отже знання встановлених значень коефіцієнта тертя і коефіцієнта шліфування («чистого» різання) на основі запропонованого теоретичного рішення відкриває принципово нові технологічні можливості для визначення параметрів шліфування [19], підвищення ефективності процесу шліфування та створення високопродуктивних технологічних процесів обробки деталей машин.

Висновки

У роботі наведено новий теоретичний підхід до діагностики процесу шліфування на основі відокремлення частки енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом від загального енергетичного балансу процесу шліфування та встановлення за цих умов напрямів підвищення його ефективності. Сутність підходу зводиться до встановлення однакових розрахункових значень умовного кута зсуву оброблюваного матеріалу від зміни умовного напруження різання (енергомісткості обробки) і коефіцієнта шліфування (відношення тангенціальної і радіальної складових сили різання) через зменшення експериментально встановленої тангенціальної складової сили різання. На конкретних прикладах обґрунтовано достовірність запропонованого підходу та надано практичні рекомендації щодо зменшення енергії тертя шліфувального круга із оброблюваним матеріалом в процесі шліфування та підвищення його ефективності.

Конфлікт інтересів

Автор повідомляє про відсутність конфлікта інтересів. Крім того, автор повністю дотримувався етичних норм, включаючи плагіат, фальсифікацію даних та подвійну публікацію.

Список використаної літератури

1. Основи теорії різання матеріалів : підручник [для вищих навчальних закладів] / М. П. Мазур, Ю. М. Внуков, А. І. Грабченко та ін. – 3-тє вид. переробл. та доповн. – Львів : Новий Світ-2000, 2020. – 471 с. – Режим доступу : https://ns2000.com.ua/wp-content/uploads/2019/11/Osnovy-teorii-rizan.mater.pdf (дата звернення 20.11 2025)
2. Salata M. The Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Grinding Temperature in the Single-Pass Grinding Process of Solid Carbide End Mill Flutes / M. Salata // Advances in Science and Technology Research Journal. – 2022. – № 16(1). – Pp. 190–202. – DOI: 10.12913/22998624/143483 .
3. Стрельчук Р. М. Регулювання тепловими процесами під час електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. – Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 2(10). – С. 41-49. DOI: 10.20998/2079–004X.2024.2(10).05
4. Лавриненко В. І. Інструменти із надтвердих матеріалів в технологіях абразивної і фізико-технічної обробки : монографія / В. І. Лавриненко, В. Ю. Солод. – Кам'янське : ДДТУ, 2016. – 529 с. – Режим доступу : https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/1/1/1-1-b3.pdf (дата звернення 20.11 2025)
5. Increasing the Continuous Operation Time of the Diamond Cutting Disk When Using Various Cooling Media / T. Chumachenko, A. Bespalova, O. Dashkovska, O. Knush, T. Nikolaieva // Advanced Manufacturing Processes V. Selected Papers from the 6th Grabchenko's. International Conference on Advanced. Manufacturing Processes (InterPartner-2024), September 10-13 2024. – Odessa, 2025. – Pp. 266–279. DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_24
6. Influence of the geometric characteristics of the discontinuous profile working surfaces of abrasive wheels for precision and temperature when grinding / O. Yakimov et al. // Cutting & Tools in Technological System. – 2021. – no 94. – Pp. 115–125. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.13
7. Stachurski W. Determination of Mathematical Formulae for the Cutting Force F C during the Turning of C45 Steel / Stachurski, W., Midera, S. Kruszynski, B. // Mechanics and Mechanical Engineering. – 2012. – № 16 (2). – Pp. 73-79. – URL: http://kdm.p.lodz.pl/journal-mechanics-and-mechanical-engng/artykuly# (Last accessed 20 November 2025)
8. Discontinuous Generating Gear Grinding Optimization / Larshin V., Babiychuk O., Lysyi O., Uminsky S. // Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2022. – Pp. 263-272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_26 https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorld=57217107788
9. Гуцаленко Ю. Г. Алмазно-іскрове шліфування матеріалів високої функціональності : монографія. / Ю. Г. Гуцаленко. – Харків : Курсор, 2018. – 290 с. – Режим доступу : https://web.kpi.kharkov.ua/cutting/wp-content/uploads/sites/143/2020/12/Gutsalenko_Almazno-iskrovoe_2018.pdf (дата звернення 20.11 2025)
10. Mitsyk A. Wave Nature of the Abrasive Granules Action on the Surface of Parts During Vibration Processing / A. Mitsyk, V. Fedorovich, A. Grabchenko // Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner. Lecture Notes in Mechanical Engineering. – 2023. – Pp. 176–189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_17
11. Пижов І. М. Удосконалення процесу алмазного шліфування надтвердих матеріалів за рахунок управління контактними напруженнями [Електронний ресурс] : монографія / І. М. Пижов, В. О. Федорович, І. В. Волошкіна ; Нац. техн. ун-т "Харків. політехн. ін-т". – Харків, 2022. – 148 с. – Режим доступу : http://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/57208. (дата звернення 20.11 2025)
12. Новіков Ф. В. Теоретико-імовірнісний підхід у теорії шліфування [Електронний ресурс] : монографія / Ф. В. Новіков, Г. В. Новіков. – Дніпро : ЛІРА, 2023. – 484 с. – URI: http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/30087 (дата звернення 20.11 2025)
13. Justification of Technological Possibilities for Reducing Surface Roughness During Abrasive Processing / F. Novikov et al. // Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV. – 2021. – Pp. 463-471. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_46
14. Інтегровані процеси обробки матеріалів різанням : підручник / А. І. Грабченко [та ін.] ; ред.: А. І. Грабченко, В. О. Залога. – Суми : Університетська книга, 2017. – 451 с. – URI: https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27607 (дата звернення 20.11 2025)
15. The use of intermittent wheels, impregnated by the contact method to reduce the thermal stress of the grinding process / V. Tonkonogyi et al. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2019. – Vol. 708, Issue 1. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012034 .
16. Узунян М. Д. Алмазно-іскрове шліфування твердих сплавів / М. Д. Узунян. – Харків : НТУ "ХПІ", 2003. – 359 с. – URI : https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/7396 (дата звернення 20.11 2025)
17. Стрельчук Р. М. Формування поверхні в умовах електроерозійного шліфування зі змінною полярністю електродів / Р. М. Стрельчук // Машинобудування : зб. наук. пр. / Укр. інж.-пед. акад. – Харків : УІПА, 2021. – Вип. 28. – С. 26–36. DOI: https://doi.org/10.32820/2079-1747-2021-28-26-36 (дата звернення 30.10 2025)
18. Дослідження впливу зернистості алмазних кругів на показники шліфування / М. І. Гасанов, О. В. Руднєв, О. В. Котляр, О. В. Тітаренко, Д. В. Куліна // Вісник Національного технічного університету «ХПІ».

Серія: Технології в машинобудуванні : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». – Харків : НТУ «ХПІ», 2025. – № 1 (11). – С. 117–127. DOI: 10.20998/2079-004X.2025.1(11).14

19. Полянський В. І. Закономірності формування і зниження температури різання при механічній обробці / В. І. Полянський // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наук. пр. – Маріуполь : ДВНЗ «Приазов. держ. техн. ун-т», 2019. – Вип. 39. – С. 119–126. (Технічні науки). DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.39.2019

Стаття надійшла для редакції 19.10.2025 Стаття рекомендована до друку 20.11.2025

F.V. NOVIKOV, Doctor of Technical Sciences
Professor of the Department of Healthy Lifestyle, Technologies and Life Safety
e-mail: novikovfv@hneu.net ORCID: 0000-0001-6996-3356

Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics,
9-A Nauky Avenue, Kharkiv 61166, Ukraine

DIAGNOSTICS AND CONDITIONS FOR INCREASING THE EFFICIENCY OF THE GRINDING PROCESS BASED ON ENERGY PARAMETERS

The aim of the work is to create a new theoretical approach to the diagnostics of the grinding process based on the separation of the share of friction energy of the grinding wheel with the processed material from the total energy balance of the grinding process and to establish under these conditions the directions for increasing its efficiency. For this purpose, the work establishes analytical dependencies for determining the energy parameters of the grinding process: the conditional cutting stress (processing energy intensity) and the grinding coefficient (the ratio of the tangential and radial components of the cutting force), which are inversely related to the conditional shear angle of the processed material. Based on this, calculations have proven that by reducing the experimentally established tangential component of the cutting force, it is always possible to achieve equality of the values of the conditional shear angle of the processed material, which are determined by the conditional cutting stress and the grinding coefficient. Fulfillment of this condition ensures separation of the friction energy fraction of the grinding wheel with the processed material from the total energy balance of the grinding process, which is new in the theory of material processing by cutting. Calculations have established that during diamond spark grinding the friction energy fraction takes on a virtually zero value, since, due to the action of electric discharges in the cutting zone, a high cutting ability of the diamond wheel on the metal bond is ensured and its friction with the processed material is eliminated. A virtually zero value of the friction energy fraction was also obtained under the conditions of microcutting with a single diamond grain. All this indicates the reliability of the theoretical approach to the diagnostics of the grinding process proposed in the work.

It was also established that under the conditions of conventional abrasive grinding, the share of friction energy can exceed the share of "clean" cutting energy. This is due to the low cutting ability of the abrasive wheel, since a significant part of the abrasive grains work only in the friction mode with the processed material. It is shown that the calculated values of the friction coefficient and the grinding coefficient ("clean" cutting) differ little and actually correspond to the values of the known ratio of the micro-cut thickness to the radius of the abrasive grain tip, at which the chip formation process in the cutting zone almost does not occur. In these cases, it is important to use effective methods of dressing and impregnation of grinding wheels, effective technological environments to increase their cutting ability. Therefore, knowledge of the actually established values of the friction coefficient and the grinding coefficient ("clean" cutting) based on the proposed theoretical solution opens up new technological possibilities for increasing the efficiency of the grinding process and creating high-performance technological processes for processing machine parts.

KEYWORDS: *cutting force, processing energy intensity, friction coefficient, processing productivity, mathematical model*

In cites: Novikov F.V. (2025) Diagnostics and conditions for increasing the efficiency of the grinding process based on energy parameters. *Engineering*, (35), 13-24. https://doi.org/10.26565/2079-1747-2025-36-02 (in Ukraine)

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest. In addition, the author fully complied with ethical standards, including plagiarism, data falsification, and double publication.

References

1. Mazur, MP, Vnukov, YuM, Hrabchenko, AI et al 2020, *Osnovy teorii rizannia materialiv* [Fundamentals of material cutting theory], Novyi Svit-2000, Lviv, 471 p.
2. Salata, M 2022, 'The Analysis of the Influence of Technological Parameters on the Grinding Temperature in the Single-Pass Grinding Process of Solid Carbide End Mill Flutes', *Advances in Science and Technology Research Journal*, no 16(1), Pp. 190–202. DOI: 10.12913/22998624/143483 .
3. Strelchuk, RM 2024, 'Rehuliuvannia teplovymy protsesamy pid chas elektroeroziinoho shlifuvannia zi zmin-noiu poliarnistiu elektrodiv [Regulation by thermal processes during electroerosion grinding with variable electrode polarity.], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 2(10), Pp. 41-49. DOI: 10.20998/2079–004X.2024.2(10).05
4. Lavrynenko, VI & Solod, VYu 2016, *Instrumenty iz nadtverdykh materialiv v tekhnolohiiakh abrazyvnoi i fizyko-tekhnichnoi obrobky* [Tools made of superhard materials in abrasive and physical and technical processing technologies], DDTU, Kamianske.
5. Chumachenko, T, Bespalova, A, Dashkovska, O, Knush, O & Nikolaieva , T 2025, 'Increasing the Continuous Operation Time of the Diamond Cutting Disk When Using Various Cooling Media', *Advanced Manufacturing Processes V. Selected Papers from the 6th Grabchenko's. International Conference on Advanced. Manufacturing Processes (InterPartner-2024), September 10-13 2024*, Pp. 266–279. DOI : https://doi.org/10.1007/978-3-031-82746-4_24
6. Yakimov, O et al 2021, 'Influence of the geometric characteristics of the discontinuous profile working surfaces of abrasive wheels for precision and temperature when grinding', *Cutting & Tools in Technological System*, no 94, Pp. 115–125. DOI: https://doi.org/10.20998/2078-7405.2021.94.13
7. Stachurski, W, Midera, S & Kruszynski, B 2012, 'Determination of Mathematical Formulae for the Cutting Force F C during the Turning of C45 Steel', *Mechanics and Mechanical Engineering*, no 16 (2), Pp. 73-79.
8. Larshin, V, Babiychuk, O, Lysyi, O & Uminsky, S 2022, 'Discontinuous Generating Gear Grinding Optimization', *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Pp. 263-272. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-06025-0_26 https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorld=57217107788
9. Hutsalenko, YuH 2018, *Almazno-iskrove shlifuvannia materialiv vysokoi funktsionalnosti* [Diamond spark grinding of high-performance materials], Kursor, Kharkiv
10. Mitsyk, A, Fedorovich, V & Grabchenko, A 2023, 'Wave Nature of the Abrasive Granules Action on the Surface of Parts During Vibration Processing', *Advanced Manufacturing Processes IV. InterPartner. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Pp. 176–189. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-031-16651-8_17
11. Pyzhov, IM, Fedorovych, VO & Voloshkina, IV 2022, *Udoskonalennia protsesu almaznoho shlifuvannia nadtverdykh materialiv za rakhunok uprav-linnia kontaktnymy napruzhenniamy* [Improving the process of diamond grinding of superhard materials by controlling contact stresses], Kharkiv
12. Novikov, FV & Novikov, HV 2023, *Teoretyko-imovirnisnyi pidkhid u teorii shlifuvannia* [Theoretical-improbable approach in grinding theory], LIRA, Dnipro, viewed < http://repository.hneu.edu.ua/handle/123456789/30087>
13. Novikov, F et al 2021, 'Justification of Technological Possibilities for Reducing Surface Roughness During Abrasive Processing', *Advances in Design, Simulation and Manufacturing IV*, Pp. 463-471. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-77719-7_46
14. Hrabchenko, AI et al 2017, *Intehrovani protsesy obrobky materialiv rizanniam* [Integrated processes for processing materials in various], Universytetska knyha, Sumy, viewed <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/27607>
15. Tonkonogyi, V et al 2019, 'The use of intermittent wheels, impregnated by the contact method to reduce the thermal stress of the grinding process' *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Vol. 708, Isue 1. DOI: 10.1088/1757-899X/708/1/012034 .
16. Uzunian, MD 2003, *Almazno-iskrove shlifuvannia tverdykh splaviv* [Diamond spark grinding of hard alloys], NTU "KhPI", Kharkiv, viewed <https://repository.kpi.kharkov.ua/handle/KhPI-Press/7396>
17. Strelchuk, RM 'Formuvannia poverkhni v umovakh elektroeroziinoho shlifuvannia zi zminnoiu poliarnis-tiu elektrodiv' [Surface formation under conditions of electroerosion grinding with variable electrode polarity], *Mashynobuduvannia*, iss. 28, Pp. 26–36, viewed <https://jmash.uipa.edu.ua/index.php/jMASH/article/view/276/200>
18. Hasanov, MI, Rudniev, OV, Kotliar, OV, Titarenko, OV & Kulina, DV 2025, 'Doslidzhennia vplyvu zernystosti almaznykh kruhiv na pokaznyky shlifuvannia' [Study of the influence of diamond grain size on grinding performance], *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Seriia: Tekhnolohii v mashynobuduvanni*, no 1 (11), Pp. 117–127. DOI: 10.20998/2079-004X.2025.1(11).14
19. Polianskyi, VI 2019, 'Zakonomirnosti formuvannia i znyzhennia temperatury rizannia pry mekhanichnii obrobtsi' [Patterns of formation and reduction of cutting temperature during machining], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu*, iss. 39, Pp. 119–126. DOI: https://doi.org/10.31498/2225-6733.39.2019

The article was received by the editors 10/30/2025 The article is recommended for printing 11/20/2025