

resistant oxides and chlorides by the method of liquid-phase deposition]. *Porodorazrushaiushchii i metalloobrabatyvaiushchii instrument – tehnika i tehnologiya ego izgotovleniia i primeneniia – Rock-destroying and metal-working tools – engineering and technology of its production and application*. (22<sup>nd</sup> Issue, p. 317–327). ISM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Russian].

3. Poltoratskiy, V.G., Bochechka, O.O., Lavrinenko, V.I., et al. (2021). Formuvannia kombinovanogo bagatokomponentnogo termostabilnogo pokryttia na poverhni zeren shlifporoshkiv abrazyvnogo pryznachennia [Formation of combined multicomponent thermostable wear-resistant coating on the surface of grains of abrasive grinding powders]. *Instrumentalne materialoznavstvo – Tooling Materials Science*. (24<sup>nd</sup> Issue, p. 296–307). INM im. V.N. Bakulia, NAN Ukrainy [in Ukrainian].

УДК 621.923:661.65:621.9.047

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-286-295

**В.И. Лавріненко**, д-р техн. наук<sup>1</sup>;  
**В.Ю. Солод**<sup>2</sup>, **Є.В. Острроверх**<sup>3</sup>, **Л.А. Проц**<sup>4</sup>, кандидати технічних наук

<sup>1</sup>Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,  
вул. Автозаводська, 2, 04074, м. Київ, e-mail: [lavrinen52@gmail.com](mailto:lavrinen52@gmail.com)

<sup>2</sup>Дніпровський державний технічний університет МОН України,  
вул. Дніпробудівська, 2, Дніпропетровська обл., 51918, м. Кам'янське

<sup>3</sup>Національний технічний університет «ХПІ» МОН України, вул. Кирпичова, 2, 61000, м. Харків

<sup>4</sup>Ужгородський національний університет МОН України, пл. Народна, 2, 88000, м. Ужгород

## ОЦІНКА ПИТОМОЇ ЕНЕРГОЄМНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ ІЗ ВВЕДЕННЯМ ДОДАТКОВОЇ ЕНЕРГІЇ В ЗОНУ ОБРОБКИ

В статті розглянутий сучасний підхід до оцінки питомої енергоємності шліфування інструментальних сталей кругами з кубічного нітриду бору. Порівнюються процеси шліфування із введенням додаткової енергії в зону обробки: електрохімічний, електроіскровий та електроерозійний. Звернено увагу на те, що методи шліфування, пов'язані з примусовим ініціюванням електроерозійних розрядів у зоні обробки (електроерозійний та електроіскровий), призводять до надмірного впливу як на оброблювану поверхню, так і на ріжучу поверхню круга, що, як наслідок, призводить до підвищення його зносу і суттєвого зростання питомої енергоємності шліфування. Показано, що саме для досягнення меншої питомої енергоємності обробки під час шліфування сталевих ножів паперорізальних машин, які складаються із загартованої сталі 9ХФ і незагартованої сталі 10, необхідно застосовувати дозоване введення технологічного струму в зону обробки, і при цьому бажано застосовувати шліфувальні круги з кубічного нітриду бору на мідно-олов'яній металічній зв'язці.

**Ключові слова:** питома енергоємність шліфування, інструментальні сталі, круги з кубічного нітриду бору, електрохімічне шліфування, електроіскрове шліфування, електроерозійне шліфування.

### Вступ

Високотверді та високоміцні матеріали, особливо інструментальні, нині широко застосовуються у промисловості. Їх ефективна абразивна обробка є важливою для сучасного

виробництва. При цьому інструментальні сталі є найбільш вразливими до дії теплових впливів під час їх шліфування, що можуть спричинити негативні зміни у їх поверхневому шарі.

Так, дослідженнями [1] встановлено, що електрохімічне шліфування швидкорізальних сталей, які вміщують достатньо велику кількість карбиду ванадію – Р6М5Ф3, А11Р3М3Ф2 та інших, кругами з кубічного нітриду бору (КНБ) при продуктивності 1200 мм<sup>3</sup>/хв забезпечує середню температуру на поверхні, що піддається обробці – 520 К. Для порівняння вкажемо, що алмазно-електрохімічне шліфування приводить до середньої температури – 810 К, електрохімічне шліфування кругами з гексаніту-А – 760 К. При шліфуванні кругами з КНБ із охолодженням без введення у зону обробки технологічного струму середня температура дорівнює 820 К, а при багатопрохідному, кругами з електрокорунду без охолодження – 1070 К. Таким чином, найменшу температуру поверхневого шару забезпечує процес електрохімічного шліфування кругами з КНБ. При цьому структура та поверхневий шар вказаних вище сталей до продуктивностей 1800 мм<sup>3</sup>/хв зостаються аналогічними вихідним, без змін [1].

У сучасному виробництві нарівні із швидкорізальними також досить широко поширені сталеві різальні інструменти, що складаються з загартованого робочого леза та незагартованої державки-підкладки. Типовим їх представником є ножі поліграфічних паперорізальних машин, що поєднують загартовану сталь 9ХФ (твердістю 55–59 HRC) та незагартовану сталь 10 (твердістю 74–77 HRB) у співвідношенні 1:6. У аналогії з швидкорізальними сталями, сталь 9ХФ вміщує тверді та міцні карбіди хрому Cr<sub>23</sub>C<sub>6</sub> (HV ≈ 15 ГПа) та ванадію VC і V<sub>4</sub>C<sub>3</sub> (HV ≈ 28 ГПа), що погіршує її шліфуємість кругами з електрокорунду. Крім того, зернам абразивного матеріалу необхідно здійснювати з'йом матеріалу при безперервному контакті зі сталлю на шляху різання до 35 мм. Це означає, що при таких умовах для забезпечення високопродуктивної, але якісної обробки слід використовувати круги з КНБ і процеси електрошліфування, описані вище.

Наведене вище свідчить про те, що для досягнення умов якісної обробки важливо адекватно оцінювати енергетичні витрати під час різних процесів шліфування, щоб правильно і обґрунтовано вибирати найбільш ефективний процес оброблення інструментальної сталі. Розглянемо, що нині відомо з сучасної наукової літератури про енергетичні витрати при шліфуванні.

#### **Аналіз сучасних досліджень**

Так, в роботі [2] наведено порівняння загальних енергетичних витрат і показано, що вони є приблизно співмірними для звичайного алмазного з охолодженням і алмазно-іскрового шліфування.

В статті [3] показано, що з-за стохастичного характеру топографії абразивного інструменту абразивні процеси важко моделювати і якісно оцінювати. Для вирішення цього нова об'єднувальна модель моделювання визначається через так звану теорію агресивності, що охоплює довільну геометрію і кінематику переміщення заготовки відносно абразивної поверхні. Ключовим параметром є точкова агресивність, що являє собою безрозмірну скалярну величину на основі векторного поля відносної швидкості і векторного поля нормалей до абразивної поверхні (рис. 1).

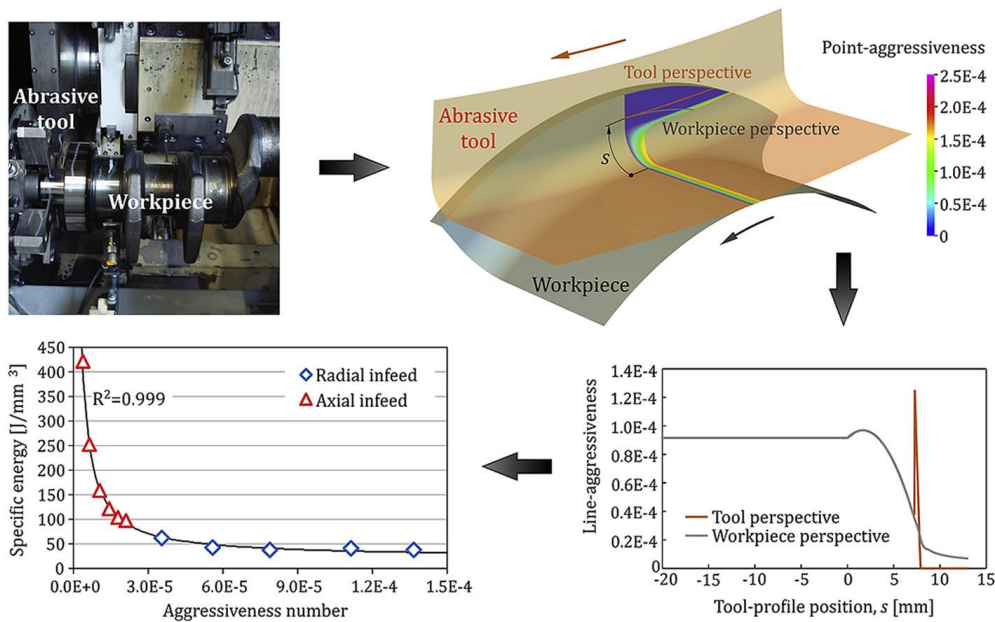


Рис. 1. Наукові принципи визначення числа агресивності [3]

Звернемо увагу на те, що у статті [3] цей фундаментальний параметр процесу напряму пов'язаний із типовими вихідними даними процесу, такими як питома енергія, знос абразивного інструменту та шорсткість поверхні. Саме на зв'язок між цими показниками абразивного процесу також зверталася увага і в статті [4]. Теорія агресивності експериментально підтверджується її застосуванням до різних абразивних процесів: шліфування та алмазної правки, де число агресивності корелює із вищезгаданими вихідними даними процесу [3].

В статті [5] розроблена методологія визначення поведінки пластичної деформації на основі високошвидкісної кінозйомки і індукційного попереднього нагріву під час різання. Пластична деформація та підвищення температури в зоні первинного зсуву визначалися технікою кореляції дрібномасштабного цифрового зображення та рівнянням теплоконвекції–провідності відповідно, таким чином перетворюючи механічну обробку на високодинамічний метод випробування матеріалів. Демонструється розм'якшення матеріалу при деформації в первинній зоні зсуву та зниження ефекту термічного розм'якшення в умовах швидкого нагрівання. Це дозволяє поглибити розуміння поведінки матеріалу під час процесу різання [5]; адже в роботі авторами [6] вказано, що зі збільшенням продуктивності обробки температура різання може досягти рівня температури плавлення оброблюваного матеріалу.

Оскільки нами вище було згадано про процеси шліфування із введенням додаткової енергії в зону обробки, то завершимо цей огляд саме на цьому [7]. Розглянемо це на реакційно-зв'язаній кераміці з карбиду кремнію (RB-SiC), яка є одним з кращих кандидатів для виготовлення великих оптичних дзеркал, важко піддається механічній обробці з-за її високої твердості и крихкості. Гібридний процес електроерозійного алмазного шліфування (EDDG) якраз демонструє потенціал для покращення оброблюваності RB-SiC шляхом поєднання електроерозійної обробки (EDM) і алмазного шліфування. Однак цей гібридний процес призводить до пошкоджень, які відрізняються від пошкоджень у звичайних процесах через одночасну дію EDM та алмазного шліфування. У дослідженні [7] було вивчено пошкодження (поверхневі та підповерхневі), спричинені взаємодією між EDM та алмазним шліфуванням під час EDDG RB-SiC. Встановлено, що зони електроерозійної обробки і шліфовки мають відмінну топографію поверхні і різні домінуючі механізми видалення матеріалу (рис. 2).

Збільшення енергії розряду сприяло пластичному видаленню матеріалу та розкладу SiC. Таким чином, було отримано більш тонкий підповерхневий шар пошкодження порівняно з таким у зоні менш термічного впливу [7].

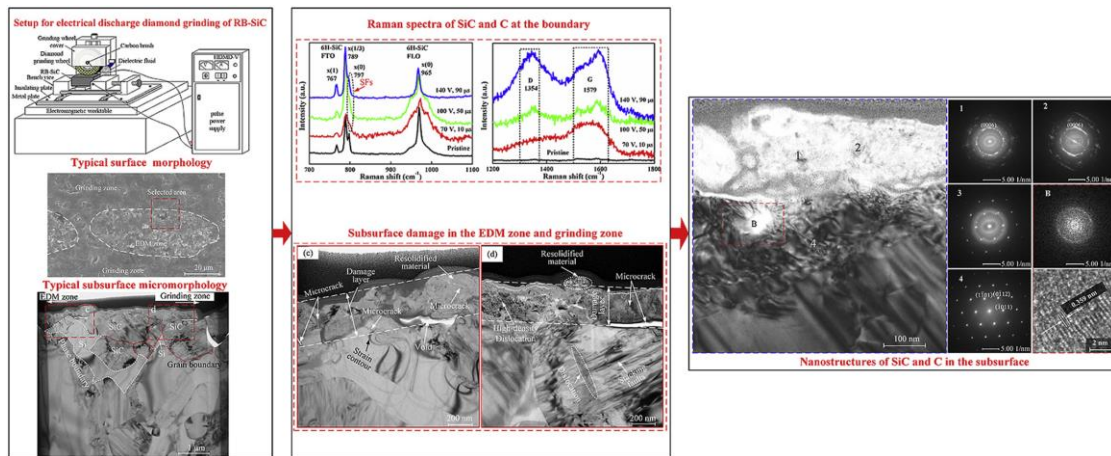


Рис. 2. Особливості впливу EDM на поверхню реакційно-зв'язаної кераміки з карбїду кремнію (RB-SiC) [7]

Таким чином, з аналізу наведеного вище виходить, що для оцінки енергоємності процесу абразивної обробки слід враховувати можливе виникнення ефекту термічного розм'якшення, особливо за умов введення додаткової енергії в зону обробки, що власне і було метою даної статті. При цьому авторами статті для оцінки питомої енергоємності був застосований новий методичний підхід, пов'язаний із врахуванням зношування абразивного кругу, що був викладений в статті [4].

### Результати досліджень

З низки інструментальних матеріалів ми зупинилися на більш-менш однорідному матеріалі, а саме – сталі, для якої відоме значення питомої теплоти плавлення, що складає  $\sim 84$  кДж/кг [4]. Цей вибір у нашому випадку визначався тим, що при електричних методах обробки виникають інтенсивні розряди в зоні шліфування, які зазвичай підвищують питому енергоємність обробки і призводять до плавлення як на оброблюваній поверхні, так і на робочій поверхні шліфувального круга. Саме тому для притомного оцінювання питомої енергоємності нами взяті інструментальні сталі.

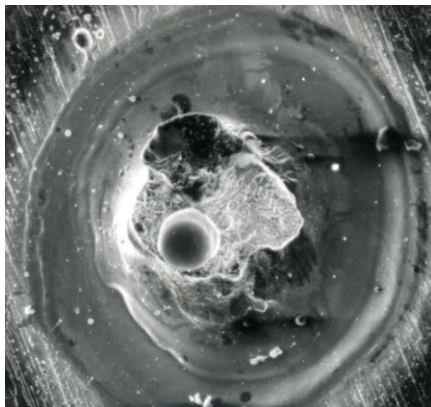
З урахуванням такого методичного підходу по оцінюванню питомої енергоємності нами були порівняні три найбільш поширених [1] процеси шліфування із введенням додаткової електричної енергії в зону шліфування: електрохімічне шліфування (ЕХШ), електроерозійне шліфування (ЕЕШ) та електроіскрове шліфування (ЕІШ). Обробці піддавалася швидкорізальна сталь Р6М5 з продуктивністю  $1200 \text{ мм}^3/\text{хв}$ . кругами з кубічного нітриду бору 12A2-45° 150x10x3x32 КР 100/80 М2-12Е 100. Застосовувалися при електрохімічному і електроіскровому – джерело постійного струму ВУ 300/12 відповідно при прямій і зворотній полярності, а при електроерозійному – джерело імпульсного струму низької частоти ІТТ-35 (табл. 1).

**Таблиця 1.** Порівняння експлуатаційних показників шліфувальних кругів при шліфуванні сталі Р6М5 різними методами

Метод шліфування	Показники процесу шліфування				
	Напруга технологічного струму, В	Технологічний струм, А	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
ЕХШ	5	170	1,50	0,85	75,0
ЕЕШ	28	5	1,42	2,01	167,0
ЕШ	– 5	100	1,65	1,75	169,8

Проведені дослідження засвідчують, що з різних методів електрошліфування найменші знос і питому енергоємність забезпечує електрохімічне шліфування (табл. 1). Методи шліфування, пов'язані з примусовим ініціюванням електроерозійних розрядів у зоні обробки (електроерозійний та електроіскровий), приводять до надмірного впливу як на оброблювану поверхню (рис. 3), так і на ріжучу поверхню круга (рис. 4), що, як наслідок, призводить до підвищення її зносу і суттєвого зростання питомої енергоємності шліфування (табл. 1).

В роботі [4] було вказано, що питома енергоємність шліфування може дорівнювати або до 25 % перевищувати питому теплоту плавлення оброблюваного матеріалу. Для сталі це складає 105 кДж/кг. Як бачимо з табл. 1, питома енергоємність при електрохімічному шліфуванні є помірною і навіть не досягає питомої теплоти плавлення сталі. А значне перевищення питомої теплоти плавлення спостерігається саме для методів електрошліфування із наявністю інтенсивних електроерозійних розрядів в зоні шліфування, коли спостерігаються лунки плавлення (рис. 3 та 4). Саме це відбиває завищений показник питомої енергоємності шліфування для цих методів.



*Рис. 3. Наявність лунки електроерозійного розряду на поверхні швидкорізальної сталі при електроерозійному шліфуванні*



*Рис. 4. Наявність лунок електроерозійних розрядів на робочій поверхні круга при електроерозійному шліфуванні*

Звернемо увагу, що наведене вище відноситься до шліфування загартованої швидкорізальної сталі (HRC 61–63), але у виробництві ми у багатьох випадках можемо стикатися із необхідністю шліфування менш твердих сталей, і навіть сполучення загартованої та незагартованої сталей. Однією з проблем при цьому є втрата ріжучої здатності робочої поверхні шліфувального круга з кубічного нітриду бору і, як наслідок, виникнення

необхідності поновлення такої здатності. Найбільш ефективним методом поновлення є саме ті методи електрошліфування, які вказані вище.

Одним з найбільш застосовуваних є сполучення загартованої та незагартованої сталей для ножів паперорізальних машин, які складаються із загартованої сталі 9ХФ (HRC 55–59) і незагартованої сталі 10 (HRB 74–77) у співвідношенні 1:6. Звичайним варіантом є шліфування цих ножів абразивними кругами зернистості 16–25 із доведенням кромки дрібнозернистими (6–8) абразивними кругами. Для уникнення подвійного застосування абразивних кругів логічним варіантом є застосування кругів з кубічного нітриду бору із зернистістю КНБ 100/80 на полімерних зв'язках. Нами було перевірено це при шліфуванні з продуктивністю 1200 мм<sup>3</sup>/хв. сполучення 9ХФ/ст.10 кругом 12А2-45° 150х20х3х32 КР 100/80 В1-13 100 з охолодженням мастильно-охолоджувальною рідиною (МОР): NaNO<sub>3</sub> – 5 % за масою, NaNO<sub>2</sub> – 0,2 %. Цей же склад слугував і електролітом при методах обробки із введенням технологічного струму. Випробування засвідчили, що втрати ріжучої здатності такого круга не відбувалося при обробці, але відносні витрати зерен КНБ в крузі внаслідок активного впливу гострої металічної стружки склали 59 мг/г, що є неприпустимим для застосування такого високовартісного шліфувального інструменту.

Тому, надалі досліджувалися круги 12А2-45° 150х20х3х32 КР 100/80 100 на металічній зв'язці М2-12Е при різних методах обробки сполучення сталей 9ХФ/ст.10: з охолодженням МОР, ЕХШ, ЕЕШ та ЕШ. Результати досліджень наведені в табл. 2.

**Таблиця 2.** Порівняння експлуатаційних показників шліфувальних кругів при шліфуванні сполучення сталей 9ХФ/ст.10 різними методами

Метод шліфування	Показники процесу шліфування з продуктивністю 1200 мм <sup>3</sup> /хв				
	Напруга технологічного струму, В	Технологічний струм, А	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
з МОР	–	–	1,25	0,78	57,4
ЕХШ	5	215	1,20	1,40	98,8
ЕЕШ	38	6	0,80	6,40	328,6
ЕШ	– 5	130	1,30	6,02	458,8

Аналіз даних табл. 2 свідчить про те, що власне шліфування з охолодженням є найбільш прийнятним для обробки сполучення сталей 9ХФ/ст.10 з точки зору питомої енергоємності шліфування. Застосування ЕХШ призводить до зростання питомої енергоємності, але це зростання залишається у пристойних (не більш як 25 % відносно питомої теплоти плавлення сталі [4]) межах і складає 17,6 %. Електроерозійне і електроіскрове шліфування мають надзвичайно високі показники питомої енергоємності обробки, що виключає можливість їх ефективного застосування при шліфуванні сполучення сталей 9ХФ/ст.10.

Разом з тим, як свідчать наші дослідження при підвищенні продуктивності шліфування з охолодженням сполучення сталей 9ХФ/ст.10 до 2300 мм<sup>3</sup>/хв, яка є характерною для шліфування ножів паперорізальних машин, ефективна потужність зростає до 2 кВт, відносні витрати зерен КНБ зростають до 1,83 мг/г, тобто майже в 2,4 рази, а питома енергоємність зростає до 112 кДж/кг, що перевищує питому теплоту плавлення сталі на 33 %, а це перевищує оті допустимі 25 %, які ми вказували вище. Як наслідок, спостерігається засалювання робочого шару круга з КНБ і виникає необхідність у поновленні ріжучої здатності круга введенням в зону обробки

технологічного струму. Тому у даному випадку необхідно застосовувати захищений Патентом України [8] спосіб алмазно-абразивного шліфування, що передбачає періодичне включення джерела технологічного струму при збільшенні ефективної потужності шліфування за допустимої межі по питомій енергоємності обробки. Для перевірки цього досліджувалися круги 12A2-45° 150x20x3x32 КР 100/80 100 на 4-х металічних зв'язках, наведених в табл. 3, при шліфуванні сполучення сталей 9ХФ/ст.10 з продуктивністю в 1100 та 2300 мм<sup>3</sup>/хв., причому у двох випадках на зв'язці М1-10 та МО20-2 при продуктивності шліфування в 2300 мм<sup>3</sup>/хв. обробка провадилася у відповідності до Патенту [8], оскільки ефективна потужність шліфування піднімалася до межі можливостей двигуна основного приводу.

**Таблиця 3.** Порівняння експлуатаційних показників шліфувальних кругів з КНБ на різних зв'язках при шліфуванні сполучення сталей 9ХФ/ст.10 із періодичним включенням технологічного струму

Зв'язка робочого шару круга	Продуктивність шліфування, мм <sup>3</sup> /хв	Ефективна потужність шліфування, кВт	Відносні витрати КНБ, мг/г	Питома енергоємність шліфування, кДж/кг
М1-04	1100	0,92	1,75	103,3
М1-10	1100	1,00	1,00	64,2
	2300	> 2,0	1,70	104,4
М2-12Е	1100	0,95	0,95	57,9
МО20-2	1100	0,80	1,23	63,1
	2300	> 2,0	1,26	77,3

Аналіз табл. 3 свідчить про те, що обробка із застосуванням мідно-алюмінієвих зв'язок М1-04 та М1-10 в кубонітовому крузі характеризується підвищеною енергоємністю шліфування. Причому круг на зв'язці М1-04 навіть при продуктивності 1100 мм<sup>3</sup>/хв дає питому енергоємність, що перевищує питому теплоємність плавлення сталі. Круг на зв'язці М1-10 навіть за виключного дозування введення технологічного струму в зону обробки при продуктивності в 2300 мм<sup>3</sup>/хв також значно перевищує питому теплоємність плавлення сталі. Тобто мідно-алюмінієві зв'язки в кубонітових кругах для шліфування ножів паперорізальних машин є непридатними.

Тому на другому етапі нами були перевірені мідно-олов'яні зв'язки (М2-12Е та МО20-2) в кубонітових кругах. При продуктивності 1100 мм<sup>3</sup>/хв експлуатаційні показники кругів на обох зв'язках мають майже однакові показники, але круг на зв'язці МО20-2 має меншу ефективну потужність шліфування та на 25% меншу шорсткість обробленої поверхні. Саме тому надалі при продуктивності 2300 мм<sup>3</sup>/хв досліджувався саме круг на зв'язці МО20-2 з дозуванням введення технологічного струму в зону обробки при продуктивності.

Видно (табл. 3), що хоча ефективна потужність шліфування і піднімається до межі можливостей двигуна основного приводу, але питома енергоємність шліфування залишається такою, що не перевищує питому теплоємність плавлення сталі. А це означає, що саме для шліфування сталевих ножів паперорізальних машин за умов дозованого введення технологічного струму в зону обробки необхідно застосовувати шліфувальні круги з КНБ на мідно-олов'яній металічній зв'язці МО20-2.

## Висновки

Встановлено, що найменші знос і питому енергоємність шліфування інструментальних сталей з різних методів електрошліфування забезпечує електрохімічне шліфування, тоді як методи шліфування, пов'язані з примусовим ініціюванням електроерозійних розрядів у зоні обробки (електроерозійний та електроіскровий) надмірно впливають як на оброблювану поверхню, так і на ріжучу поверхню круга, що, як наслідок, призводить до підвищення її зносу і суттєвого зростання питомої енергоємності шліфування.

Виявлено, що шліфування з охолодженням є найбільш прийнятним для обробки сполучення сталей 9ХФ/ст.10 з точки зору питомої енергоємності шліфування. Застосування електрохімічного шліфування призводить до певного зростання питомої енергоємності, але це зростання залишається у пристойних (не більш як 25 % відносно питомої теплоти плавлення сталі) межах і складає 17,6 %. Електроерозійне і електроіскрове шліфування мають надзвичайно високі показники питомої енергоємності обробки, що виключає можливість їх ефективного застосування при шліфуванні сполучення сталей 9ХФ/ст.10.

Показано, що обробка із застосуванням мідно-алюмінієвих зв'язок М1-04 та М1-10 в кубонітовому крузі характеризується підвищеною енергоємністю шліфування. Причому круг на зв'язці М1-04 навіть при продуктивності 1100 мм<sup>3</sup>/хв дає питому енергоємність, що перевищує питому теплоємність плавлення сталі. Круг на зв'язці М1-10 навіть за виключного дозування введення технологічного струму в зону обробки при продуктивності в 2300 мм<sup>3</sup>/хв також значно перевищує питому теплоємність плавлення сталі. Тобто, мідно-алюмінієві зв'язки в кубонітових кругах для шліфування ножів паперорізальних машин є непридатними.

Доведено, що саме для шліфування сталевих ножів паперорізальних машин за умов дозованого введення технологічного струму в зону обробки необхідно застосовувати шліфувальні круги з КНБ на мідно-олов'яних металічних зв'язках, оскільки навіть при продуктивності 2300 мм<sup>3</sup>/хв ефективна потужність шліфування хоча і піднімається до межі можливостей двигуна основного приводу, але питома енергоємність шліфування залишається такою, що не перевищує питому теплоємність плавлення сталі.

V. Lavrinenko<sup>1</sup>, V. Solod<sup>2</sup>, Ye. Ostroverkh<sup>3</sup>; L. Prots<sup>4</sup>

<sup>1</sup>V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine

<sup>2</sup>Dniprovsky State Technical University, Ukraine

<sup>3</sup>National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Ukraine

<sup>4</sup>Uzhgorod National University, Ukraine

## ESTIMATION OF THE SPECIFIC ENERGY INTENSITY OF GRINDING OF TOOL STEEL WITH THE INPUT OF ADDITIONAL ENERGY INTO THE PROCESSING ZONE

*The article discusses a modern approach to estimating the specific energy intensity of grinding tool steels with cubic boron nitride wheels. Grinding processes with the introduction of additional energy into the processing zone are compared: electrochemical, electrospark, and electroerosion. Attention is drawn to the fact that grinding methods associated with the forced initiation of electroerosion discharges in the processing zone (electroerosion and electrospark) lead to excessive impact on both the processed surface and the cutting surface of the wheel, which, as a result, leads to an increase in its wear and a significant increase in the specific energy intensity of grinding. It is shown that precisely in order to achieve a lower specific energy intensity of processing during grinding of steel knives of paper-cutting machines, which consist of hardened steel 9ХФ and unhardened steel 10, it is necessary to apply a dosed introduction of technological current to the processing zone, and at the same time it is desirable to use grinding wheels made of cubic boron nitride on copper-tin metal bond.*

**Key words:** *specific energy intensity of grinding, tool steels, cubic boron nitride wheels, electrochemical grinding, electrospark grinding, electroerosion grinding.*

### Література

1. Лаврінченко В.І., Новіков М.В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: енциклопедичний довідник. Київ: ІНМ ім. В.М. Бакуля НАН України, 2013. 456 с.
2. Гуцаленко Ю.Г. Силы и эффективность алмазно-искрового шлифования: предпосылки минимальной смазки. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: матеріали Межд. науч.-техн. конф., 22–24.09.2021 г., г. Одесса. Одеса: ОНПУ, 2021. С. 19–21.
3. DražumeričR., Badger J., Roininen R., Krajnik P. On geometry and kinematics of abrasive processes: The theory of aggressiveness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020. Vol. 154. 103567.
4. Lavrinenko V.I. To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *Journal of Superhard Materials*. 2022. Vol. 44, N 4. P. 285–291.
5. Zhang D., Zhang X.-M., Nie G.-C., Yang Z.-Y., Ding H. Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2021. Vol. 160. 103672.
6. Полянський В.І., Новіков Ф.В. Розроблення і впровадження у виробництво ефективних технологічних процесів механічної обробки складнопрофільної формуючої оснастки для харчової промисловості. *Новые и нетрадиционные технологии в ресурсо- и энергосбережении*: матеріали Межд. науч.-техн. конф., 22–24.09.2021 г., г. Одесса. Одеса: ОНПУ, 2021. С. 141–147.
7. Rao X., Zhang F., Lu Y., Luo X., Chen F. Surface and subsurface damage X. of reaction-bonded silicon carbide induced by electrical discharge diamond grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2020. Vol. 154. 103564.
8. Спосіб алмазно-абразивного шліфування: патент на корисну модель 150123 Україна: МПК (2022.01) B24B 1/00, B24B 7/00; опубл. 02.01.22, Бюл. № 1.

Надійшла 18.04.23

### References

1. Lavrinenko, V.I. & Novikov, N.V. (2013). *Nadtverdi abrazivni materialy v mekhanoobrobtsi* [Superhard abrasive materials in machining]. INM im. V.M. Bakulia NAN Ukraine [in Ukrainian].
2. Gutsalenko, Yu.G. (2021). Sily i efektyvnost almazno-iskrovogo shlifovaniya: predposylki minimalnoi smazki [Forces and efficiency of diamond spark grinding: prerequisites for minimum lubrication]. *Novye i traditsionnye tehnologii v resurso- i energosberezenii*. (s. 19–21). ONPU [in Russian].
3. DražumeričR., Badger J., Roininen R., et al. (2020). On geometry and kinematics of abrasive processes: The theory of aggressiveness. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 154. 103567.
4. Lavrinenko, V.I. (2022). To the analysis of the estimate of energy expenditures in the diamond abrasive treatment by wheels from superhard materials. *Journal of Superhard Materials*, 44(4), 285–291.

5. Zhang D., Zhang X.-M., Nie G.-C., et al. (2021). Characterization of material strain and thermal softening effects in the cutting process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 160, 103672.
6. Poljanskyi, V.I. & Novikov, F.V. (2021). Rozroblennja i vprovadzennja u vyrobnitstvo efektyvnyh tehnologichnyh procesiv mehanichnoi obrobky skladnoprofilnoi formujuchoi osnastki dla charchovji promyslovosti [Development and introduction into production of effective technological processes of mechanical processing of complex-profile forming equipment for the food industry] *Novye i traditsionnye tehnologii v resurso- i energosberezenii*. (s. 141–147). ONPU [in Ukrainian].
7. Rao X., Zhang F., Lu Y., et al. (2020). Surface and subsurface damage of reaction-bonded silicon carbide induced by electrical discharge diamond grinding. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 154, 103564.
8. Lavrinenko, V.I., Sytnyk, B.V., Pasichnyi, O.O., et al. (2022). *Utility model patent of Ukraine № 150123. МПК (2022.01) B24B 1/00, B24B 7/00. Sposib almazno-abrazyvnoho shlifuvannia [Diamond abrasive grinding method]*. (Patent Ukrainy na korysnu model № 150123) [in Ukrainian].

УДК 621.791

DOI: 10.33839/2708-731X-24-1-295-305

**В. А. Дутка**, канд. техн. наук; **А. Л. Майстренко**, член-кор. НАН України;  
**С. Д. Заболотний**; **А. М. Степанець**, канд. техн. наук

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України, вул. Автозаводська, 2,  
04074 м. Київ, email: vadutka@ukr.net*

### **ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕПЛОВОГО СТАНУ ІНСТРУМЕНТУ З НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТЕРТЯМ З ПЕРЕМІШУВАННЯМ ЖАРОСТІЙКИХ СПЛАВІВ**

*Розроблено комп'ютерну модель температурного поля при зварюванні тертям з перемішуванням (ЗТП) інструментом із надтвердих матеріалів деталей із жаростійких сплавів. Реалізацію моделі виконано на базі методу скінченних елементів. Проведено обчислення температурного поля в інструменті і зварюваних деталях. Результати обчислень добре узгоджуються з результатами експериментів при ЗТП пластин зі сталі AISI 304. Показано, що за результатами комп'ютерних експериментів можна визначати параметри процесу ЗТП, при яких забезпечується термостійкість інструменту з кибориту при зварюванні пластин з цієї сталі.*

**Ключові слова:** зварювання тертям з перемішуванням, жаростійкі сплави, киборит, моделювання, термостійкість інструменту.

#### **Вступ**

Для якісного з'єднання листових деталей методом зварювання тертям з перемішуванням (ЗТП) [1–4] важливо забезпечити термомеханічну стійкість інструменту в процесі роботи. Матеріал інструменту для процесу ЗТП вибирають міцнішим і твердішим від матеріалу деталей на підставі його міцнісних характеристик. Так, для ЗТП м'яких і легкоплавких матеріалів використовують інструмент зі сталі [3–]; для ЗТП мідних деталей –