

В.І. Лавріненко, д.т.н., с.н.с.

О.А. Девицький, м.н.с.

О.О. Пасічний, к.т.н., с.н.с.

*Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля  
НАН України*

## ЕФЕКТИ, ЩО ВИНИКАЮТЬ В ПРОЦЕСАХ ЕЛЕКТРОШЛІФУВАННЯ, ТА ПОШУК ШЛЯХІВ ЇХ УТВОРЕННЯ ЗА УМОВ НЕЯВНОЇ ПОЛЯРИЗАЦІЇ АБО ЕЛЕКТРИЗАЦІЇ ПРИ ОБРОБЦІ

*Досліджено ефекти, що супроводжують процес електрошліфування кругами з НТМ. Розглянуто кінетику катодних процесів, елементний склад і характеристики катодних плівок. Визначено позитивну роль цих плівок та вплив на зміну перебігу фрикційних процесів у зоні шліфування, а також можливість їх формування внаслідок електрохімічної гетерогенності зв'язки кругів з НТМ та утворення за умов неявної поляризації. Розглянуто вплив електризації в процесі шліфування на фрикційні процеси в зоні контакту інструменту з деталлю.*

**Ключові слова:** електрошліфування, круги з НТМ, кінетика катодних процесів, електризація.

**Вступ. Постановка проблеми.** Однією з найголовніших проблем машинобудівної галузі є використання високопродуктивного процесу шліфування, який, в свою чергу, дозволив би отримати якомога найвищу якість обробленої поверхні. В той же час значну роль відіграє стійкість алмазно-абразивного інструменту. Одним зі шляхів підвищення зносостійкості шліфувального інструменту з надтвердих матеріалів (НТМ) є зміна перебігу контактних процесів інструменту з оброблюваною деталлю.

Оскільки процес шліфування є процесом контактної взаємодії, то нами на початковому етапі і були досліджені особливості фрикційного контакту зв'язок кругів та низки інструментальних матеріалів.

**Мета роботи** – дослідити ефекти, у вигляді формування плівок у зоні контакту інструменту з оброблюваною деталлю, що супроводжують процес шліфування та їх роль в підвищенні зносостійкості алмазно-абразивного інструменту.

**Викладення основного матеріалу.** Встановлено, що із зростанням навантаження у зоні фрикційного контакту, коефіцієнт тертя інструментальних матеріалів по керамічним та металічним

зв'язкам з основами Cu–Sn та Cu–Sn–Sb знижується, по металічним зв'язкам з основою Cu–Al–Zn підвищується, а по полімерним – залишається незмінним. На наш погляд, це пояснюється таким. Зі зростанням навантаження збільшується температура у зоні контакту, що сприяє виникненню оксидних плівок, як на зв'язці, так і на інструментальному матеріалі. А це, в свою чергу, призводить до зниження коефіцієнту тертя. У тих випадках, коли таке окислення не відбувається, наприклад, на керамічних зв'язках чи інструментальній кераміці, або утворюються специфічні плівки, як, наприклад, на зв'язці з основою Cu–Al–Zn – коефіцієнт або є постійним, або навіть зростає. Крім того, виявлено, що у випадку фрикційного контакту без застосування технологічних рідин коефіцієнт тертя значно зростає. Так, при ковзанні інструментальних матеріалів по металевим зв'язкам він підвищується: у 1,3—1,9 раза – на зв'язках з основою Cu–Al–Zn, у 1,6—4,9 раза – з основою Cu–Sn, в 2,4—4,7 раза – з основою Cu–Sn–Sb, а по полімерним зв'язкам – у 1,8—2,9 раза. Зазначимо, що і у даному випадку вказана вище «оксидна» гіпотеза виправдовується, бо відомо [1], що домішки Sb зменшують здатність до окислення, тому найзначніше зростання коефіцієнта тертя ми і спостерігаємо на зв'язці з основою Cu–Sn–Sb.

Для виявлення інших причин, що можуть бути у основі зміни величини коефіцієнту, проведені дослідження за допомогою мікроаналізатора "CamsCan-4DV" особливостей масопереносу, що виникають при фрикційному контакті «зв'язка кругу–інструментальний матеріал». Нижче подані такі особливості для безвольфрамівих твердих сплавів (БВТС), які мають дещо більші, ніж у інших інструментальних матеріалів, коефіцієнти тертя.

При терті БВТС марки КНТ16 (система TiC(N)–Ni–Mo, твердість HRC91) по зразку з металевій зв'язки M2-12E з основою Cu–Sn–Sb (твердість HRB93) на останню здійснюється переніс тільки титану (ймовірно, карбонітриду), причому у невеликій кількості ( $\approx 1,5$  мас.%). Нікель та молібден у спектрі зв'язки не виявлені. Встановлено також, що у спектрі контактної поверхні зразка зі сплаву КНТ16 відсутні елементи, перенесені з поверхні металевій зв'язки, з якою він знаходився у контакті. Таким чином, переносу міді та олова на БВТС не спостерігалось. При використанні достатньо пористих зв'язок, наприклад, керамічних, у цьому випадку, спостерігається вкорінення у пори зв'язки частинок сплаву (реєструється мікроаналізатором титан, нікель, молібден), але і при цьому переважно відбувається вкорінення карбідної фази. Так, відношення титану до нікелю на поверхні тертя

зв'язки K19 дорівнює 4,9, тоді як у глибинних шарах сплаву КНТ16 воно дорівнює 3,2. Як наслідок, це означає, що переніс матеріалу проходить не на оброблюваний матеріал, як це стверджується в роботі, а на зв'язуюче кругу, причому нами встановлено явище переважного переносу з БВТС карбідної фази на зв'язку кругу, а не, як це можливо було би чекати, більш в'язкого нікелю.

#### Вплив електроерозійних процесів на знос контактних поверхонь.

Наведені вище дослідження, свідчать про те, що з точки зору фрикційного контакту для шліфування вказаних вище інструментальних матеріалів бажано застосовувати круги або на полімерних зв'язках, або на металічних (з основами Cu–Sn та Cu–Sn–Sb). Але перші не забезпечують високої продуктивності, а другі не мають достатньої ріжучої здатності.

Відомо [2], що таку здатність можливо забезпечити електроерозійними процесами. Електричні розряди у міжелектродному проміжку (МЕР) можуть формуватися за рахунок як регульованого, так і нерегульованого його пробую. Для досягнення першого, у зоні шліфування збуджуються розряди від джерела імпульсного технологічного струму (електроерозійне шліфування) – генератори ИТТ35 (частота 50 Гц та амплітудна напруга 5–10 В). Характерним при цьому є те, що для переважного впливу розрядом на зв'язку кругів з НТМ застосовують підмикання позитивного полюса джерела струму до кругу, а негативного – до виробу, що піддається обробці. МЕР при цьому може заповнюватися будь-якою технологічною рідиною, частіше на водяній основі.

Процеси електрошліфування є або електрохімічними (ЕХШ) або електроіскровими. Джерелом струму є випрямлячі типу ВУ600/12 з випрямленим постійним струмом напругою від 0 до 12 В. При ЕХШ позитивний полюс джерела струму підмикається до виробу, а негативний до кругу. При електроіскровому шліфуванні підмикання полюсів зворотне, а як технологічна рідина застосовуються слабкі електроліти, наприклад, содовий розчин.

Для більш детального розгляду особливостей поданих вище процесів та оцінки ролі електроерозії у них, цікавим буде їх порівняння з точки зору впливу електроерозії на знос ріжучої поверхні кругу. Нами встановлено, що при глибинному шліфуванні сталі Р6М5 електроіскровий та електроерозійний методи, незважаючи на різні чинники додаткової енергії, що надходить у зону обробки, забезпечують приблизно однакову працездатність кругів з КНБ на зв'язці М2-12Е, але, порівняно з ЕХШ, при їх використанні спостерігається зростання (до 2-х разів) витрат КНБ та питомої

величини з'єму. Причиною підвищеного зносу робочого шару шліфувальних кругів є інтенсивні електроерозійні (електроіскрові) розряди, від термічного впливу яких руйнується зв'язка і, відповідно, послаблюється утримання кубонітових зерен. Порівняння різних методів шліфування свідчить, що при глибинному шліфуванні швидкоріжучої сталі кругами з КНБ на металевій зв'язці більш ефективним є ЕХШ.

Для оцінки можливостей ефективного використання методу алмазно-електроерозійного шліфування проведені порівняльні дослідження працездатності кругів при пружному способі шліфування на стенді, модернізованому для електрообробки. Використовувалися зразки з твердого сплаву ВК8 та сталі 45 розмірами 100x15x7 мм, БВТС марки ТН20 (100x18x6 мм), швидкоріжучої сталі Р6М5 (100x20x8 мм). Режими шліфування:  $v_K = 30$  м/с, частота осциляції столу – 70 подв. хід./хв. Встановлено, що електроерозійне шліфування значно підвищує продуктивність, порівняно з ЕХШ (табл. 1). Характерним є те, що при даному методі, на відміну від пружного ЕХШ, круги на зв'язках з основою Cu–Sn–Sb забезпечують більш високу продуктивність, аніж круги на зв'язках з основою Cu–Al–Zn, але звернемо увагу на підвищений знос кругів. Даний висновок розповсюджується і на обробку інструментів з швидкоріжучих сталей, оскільки у цьому випадку при пружному ЕЕШ продуктивність хоча і підвищується у 2 рази, але значно (до 4 разів) збільшується знос круга, ніж при пружному ЕХШ. Виявлено також, що в усіх випадках характерним для ЕЕШ є наявність підвищеного зносу кругів з НТМ, що вкрай небажано, враховуючи їх досить високу вартість. Величину зносу можливо у значній мірі регулювати за рахунок зміни робочої напруги джерела імпульсного струму. Таким чином, із підвищенням напруги у МЕРП виникають надлишкові електророзряди, що сприяють збільшенню зносу кругів. Хоча зі зменшенням напруги при ЕЕШ знос кругів і знижується, проте при цьому знижується і продуктивність. Виходячи з результатів наведених в таблиці 1, звернемо увагу на те, що для БВТС навіть за умов ЕЕШ продуктивність пружного шліфування є невеликою, а знос кругів – достатньо істотним.

Таблиця 1

*Вплив методів пружного шліфування інструментальних матеріалів на працездатність алмазних кругів (12А2-45<sup>0</sup> 150x10x3x23)*

Характеристика кругу	Метод шліфу- вання	Мате- ріал	$U_p$ , В	$P$ , МПа	$I_T$ , А	$Q$ , мм <sup>3</sup> /хв..	$q_p$ , мг/г
-------------------------	--------------------------	---------------	-----------	-----------	-----------	--------------------------------	--------------

AC6 125/100M M2-12E-100%	EXIII EIII	BK8+ +Cт45	6 30	1,08 1,08	200 6–16	250 1200	0,59 3,50
AC6 125/100 M2-12E-100%	EXIII EIII	BK8+ +Cт45	6 30	1,08 1,08	150 4–6	210 1260	0,52 4,50
AC6 125/100M MO20-2-100%	EXIII EIII	BK8+ +Cт45	6 30	1,08 1,08	200 4–8	220 1610	0,86 6,00
AC6 125/100M MO13E-100%	EXIII EIII	BK8+ +Cт45	6 30	0,75 0,75	90 4–10	350 1030	0,61 4,65
AC6 125/100M M2-12E-100%	EIII	TH20	35	1,47	2	270	2,40
AC6 125/100M MO13E-100%	EIII		35	1,47	2	185	7,36
KP 100/80C M2-12E-100%	EXIII EIII	P6M5	8	0,80	80	368	1,05
			30	0,80	2–10	830	4,70

Наведене вище вказує на те, що для низки інструментальних матеріалів з точки зору працездатності та зносостійкості кругів небажано застосовувати процес EIII через наявність негативних надлишкових електророзрядів. Аналогічні надлишкові електророзряди формуються і при EXIII, але, якщо у першому випадку зайві електророзряди відносно легко регулюються напругою, то у другому, регулювання є більш складним, оскільки значну роль відіграє анодна та катодна поляризація. Наприклад, із підвищенням напруги при EXIII сталі P6M5 зростає анодна пасивація, а це призводить до зниження струму, і безпосередньо його ерозійної складової, що сприяє підвищенню зносостійкості кругів. Аналогічний ефект спостерігається і при EXIII БВТС. Причина зниження ерозії через утворення на поверхні, що піддається обробці, анодних оксидних плівок полягає у тому, що вони створюють достатньо великий перехідний електроопір, аж до відсутності металевого контакту при малих зусиллях, а це знижує ерозію як при безпосередніх контактах зв'язки круга і матеріалу, так і при замиканні їх через стружку. Як бачимо і в цьому випадку «оксидна» гіпотеза має місце, тому і розглянемо більш детально сутність електрохімічних процесів при EXIII.

Оскільки електрошліфування виконується кругами на різних металевих зв'язках, то певний інтерес викликає дослідження їх впливу, як матеріалу катоду, на процес анодного розчинення. В роботі [3] показано, що стосовно умов електрошліфування, анодна поляризація не призводить до відчутних результатів у електрохімічному розчиненні. Так, наприклад, для забезпечення більшого виходу за струмом необхідно уникати нагріву електроліту і тримати його у межах 293—303 К, а також уникати великих значень густини струму, що зробити у реальних умовах електрошліфування кругами з НТМ

вкрай складно. Застосування зв'язки круга як катода зменшує, порівняно з мідним катодом, анодний вихід у 1,6 раза, підвищення температури електроліту у процесі ЕХШ всього на 20° – у 1,6 раза; використання некорозійноактивних електролітів знижує вихід ще у 1,3—2,7 раза. А це означає, що процеси ЕХШ кругами з НТМ програють, навіть без урахування інших факторів, процесам розмірної електрохімічної обробки з анодного виходу у 3,3—6,9 раза. А якщо врахувати при реальному процесі електрошліфування наявність у МЕР електроерозійних розрядів та інтенсивне газоутворення, то слід визнати, що навіть у найкращому випадку доля виходу за струмом при електрошліфуванні кругами з НТМ не буде перевищувати декілька відсотків. Цей висновок підтверджується і даними. Отже, важливим є врахування електродних процесів, які змінюють стан контактних поверхонь.

Відомо [4], що густина струму у проміжку між плоскими електродами визначається за формулою:

$$j_{ex} = \frac{U - (\Delta\varphi_a + \Delta\varphi_k)}{\delta} \chi, \quad (1)$$

до якої входять показники стаціонарних потенціалів анодів ( $\Delta\varphi_a$ ) та катодів ( $\Delta\varphi_k$ ).

Таблиця 2  
Стаціонарні потенціали системи «швидкорізальна сталь Р6М5 – електроліт» для різних складів електролітів

Електроліт	рН електроліту	Стаціонарний потенціал $\Delta\varphi_a$ , В	Колір аноду
NaNO <sub>3</sub> 5% NaNO <sub>2</sub> 0,5% Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> 3%	6,4	– 0,410	Чорний
NaNO <sub>3</sub> 5% NaNO <sub>2</sub> 0,5% Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> 3%	4,1	– 0,280	Темний
NaNO <sub>3</sub> 5% NaNO <sub>2</sub> 0,5% Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> 3%	10,2	– 0,270	Темний
NaNO <sub>3</sub> 5% NaNO <sub>2</sub> 0,5% Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> 3%	11,2	– 0,240	Темний
NaNO <sub>3</sub> 5% NaNO <sub>2</sub> 0,5%	6,3	– 0,220	Сірий
NaNO <sub>3</sub> 5% NaNO <sub>2</sub> 0,5%	8,6	– 0,210	Чорний

Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> 3%		
-------------------------------------	--	--

Встановлено, що обертання електроду не змінює стаціонарного потенціалу системи «анод (сталь Р6М5)–електроліт», а лише прискорює час його стабілізації. Як свідчить аналіз таблиці 2, більш негативне значення анодного стаціонарного потенціалу спостерігається у електроліті з домішкою Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, а найменш – з Na<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>. При цьому, усі наведені у таблиці 1 домішки до базового електроліту (NaNO<sub>3</sub> – 5 % + NaNO<sub>2</sub> – 0,5 %), за виключенням останньої, сприяють зрушенню величини  $\Delta\phi_a$  у від’ємну область. Встановлено також, що катодна поляризація більш відчутно, ніж анодна, реагує на складові електролітів, матеріал та обертання катодів.

Виявлено, що досить великий вплив на швидкість електролітичного виділення водню чинить природа метала-катода. Це підтверджує зокрема аналіз таблиці 3, де для різних катодів наведені стаціонарні або надлишкові потенціали, на величину яких необхідно накласти негативний потенціал, аби забезпечити виділення водню з певною швидкістю. Видно, що у найбільшій мірі це необхідно для алюмінієвих катодів і зв’язки МО13Е, яка містить значну кількість алюмінію. У найменшій – для мідного катоду. Зі зростанням кислотності електроліту перенапряга знижується. Отже, для досягнення ефективної обробки вказаних вище інструментальних матеріалів, необхідно мати такий процес електрошліфування, який би виключав негативну дію як інтенсивних електрохімічних, так і інтенсивних електрофізичних процесів. Тим більше, що, як було наведено, електрохімічних електродних процесів недостатньо за умов електрошліфування кругами з НТМ для досягнення відчутних показників анодного розчинення, але цілком достатньо для поляризації поверхонь аноду і катоду, формування на них плівок і зміни, тим самим, умов електрофізичного контактування електродів. Таким чином, ми, для вказаної вище групи матеріалів, максимально усуваємо негативну дію електроерозійних процесів на оброблювальну поверхню і спрямовуємо їх на досягнення лише позитивного ефекту – усунення контакту зв’язки та обробного матеріалу. За цих умов, механічні процеси різання зернами НТМ і повинні забезпечити підвищення продуктивності обробки без погіршення якості обробленої поверхні.

Таблиця 3

*Вплив матеріалу катоду на його стаціонарні потенціали*

в електролітах

Матеріал катоду	Стационарний потенціал катодів $\Delta\phi_k$ в електролітах	
	NaNO <sub>3</sub> – 5 % NaNO <sub>2</sub> – 0,5 %	NaNO <sub>3</sub> – 5 % NaNO <sub>2</sub> – 0,5 % Cr(NO <sub>3</sub> ) <sub>3</sub> – 0,5 %
	pH 7	pH 4
Алюміній	–0,841	–0,409
Зв'язка MO13E	–0,556	—
Зв'язка M2-12E	–0,353	–0,283
Залізо	–0,265	—
Мідь	–0,093	+0,013

Вплив катодних процесів на зміну характеристик ріжучої поверхні круга. Цілеспрямоване формування електродних плівок є надзвичайно важливим, і сприяють цьому саме процеси електродної поляризації, що формують на поверхні електродів анодні та катодні плівки і, тим самим, змінюють умови електрофізичного контактування електродів. Одним з чинників отримання наведених вище позитивних ефектів і є один з електродних процесів – катодний. Саме тому, нами для умов електрошліфування вивчена кінетика катодних процесів, елементний склад і характеристики катодних плівок. За рахунок введення у електроліт відповідних домішок, зміни рН електроліту, можливо знижувати або підвищувати інтенсивність катодних процесів і, відповідно, регулювати величину зносу кругів при ЕХШ. Віддаючи перевагу катодним процесам над анодними при керуванні впливом на електродні процеси, слід вказати, що ці два процеси безумовно взаємопов'язані. На наш погляд, базовим є вибір акцентів, на що впливати в першу чергу – на анодну чи катодну поляризацію. Змінюючи катодну поляризацію, можливо більш активно впливати на інтенсивність анодних процесів.

Розглянемо позитивну дію катодних плівок. Звернемо увагу, що анодні та катодні плівки, які виникають при електрошліфуванні, чинять значний вплив на працездатність кругів з НТМ, оскільки змінюють умови фрикційного контакту з виробом. Як правило, для умов ЕХШ кругами з НТМ більша увага приділялася вивченню анодних плівок на поверхні обробки, а стан ріжучої поверхні круга–катоду залишався за межами досліджень. Тому, додатково вивчалися склад та характеристики катодних плівок. Зауважимо, що під катодними плівками розуміється змінений поверхневий шар зв'язки круга з урахуванням масопереносу у МЕР [5].



Склад катодних плівок. Для того, щоб виявити особливості формування складу катодних плівок проводилися дослідження у спеціальній електрохімічній комірці, яка дозволяла постійно надавати рух електроліту і витримувати стабільну величину МЕР у 0,1 мм. Окрім контактних, усі інші поверхні ізолювалися епоксидним клеєм. Як аноди використовувалися зразки з інструментальних матеріалів: твердого сплаву ТТ8К6, БВТС марки ТН20 та сталі Р6М5. Катодами слугували зразки з металевих зв'язок М2-01, МО13Е, МО20-2 та металополімерної В1-13. Крім того, для встановлення загальних закономірностей застосовували базовий склад електроліту з наданням йому різних рН (4—10).

Встановлено, що катодна плівка вміщує в цілому елементи усіх трьох складових, що знаходяться у МЕР: інструментального матеріалу (W, Ti, Co, Fe, Ni), електроліту (Na) та зв'язки кобальту (Cu, Sn, Al, Zn). Виявлені основні фактори, що впливають на склад катодних плівок: рН-електроліту, складу катода та аноду. Так, наприклад, при обробці твердого сплаву зі збільшенням рН зменшується вміст Со у плівці, а зростає вміст Сu. Крім того, на зв'язці МО13Е із підвищенням рН електроліту збільшується вміст Al у плівці й знижується вміст Zn. Дані щодо впливу рН на елементний склад катодної плівки, що формуються на поверхні зв'язки М2-01 (анод – твердий сплав ТТ8К6), наведені у таблиці 4.

Матеріал аноду чинить вплив на склад катодних плівок, у першу чергу, за рахунок масопереносу елементів аноду. Так, з твердих сплавів переважно переноситься – Со, з БВТС – Ni, із швидкоріжучих сталей – Fe. У таблиці 5 наведені дані щодо зміни плівок на поверхні катода зі зв'язки М2-01 при рН7. Певний вплив чинить на склад плівки і матеріал катода. Крім того, що він безпосередньо впливає на склад плівок, він також впливає і на масопереніс елементів з аноду. Наприклад, плівка на зв'язці М2-01 вміщує 19,2 мас. % Со, а плівка на зв'язці МО13Е вміщує 15,7 мас. % Со. Ймовірно, це пов'язане з більш низьким негативним стаціонарним потенціалом зв'язки МО13Е (табл. 3).

Таблиця 4

Склад катодних плівок у залежності від рН-електроліту

Елемент	Вихідна поверхня, мас. %	Вміст елементів (мас. %) при рН електроліту			
		4	7	8	10
Cu	77,8	59,2	56,3	59,9	68,7
Sn	20,8	17,2	14,6	18,1	18,2

Na	-	2,4	4,5	4,5	2,6
W	-	1,4	3,1	1,8	1,1
Ti	-	0,6	0,5	1,0	0,6
Co	-	17,7	19,2	13,4	7,6

Таблиця 5

Склад катодних плівок у залежності від складу аноду

Елемент	Вміст елементів (мас. %) при матеріалі аноду		
	ТТ8К6	ТН20	Р6М5
Cu	56,3	80,3	58,5
Sn	14,6	17,2	14,2
Na	4,5	-	0,4
Ti	0,5	0,3	-
W	3,1	-	0,7
Co	19,2	-	-
Ni	-	1,1	-
Mo	-	-	1,1

Фрикційні характеристики. Поява плівок на поверхні круга призводить до зміни характеру фрикційного контакту та величини коефіцієнту тертя. Так, при терті зв'язки М2-01 зі сплаву ТН20 у випадку примусового формування на поверхні зв'язки анодних плівок (до круга підводиться «+» від джерела струму) коефіцієнт тертя складає 0,06, а при примусовому формуванні на поверхні зв'язки катодних плівок (до круга підводиться «-») він складає – 0,045 (при відсутності плівок – 0,049). Це вказує на те, що на поверхні круга бажано формувати катодні плівки, якщо виходити з умов отримання більш кращого фрикційного контакту. Отже, катодні плівки на поверхні круга мають більші переваги, порівняно з анодними, і для підвищення зносостійкості зв'язок необхідно слідкувати за наявністю їх на поверхні круга в умовах не тільки електрошліфування, але і без введення струму у зону обробки, що дозволить значно знизити енергоємність обробки.

Формування катодних плівок за умов неявної поляризації. У випадку, коли ми не маємо прямого процесу електрохімічного шліфування, який сприяє утворенню описаних вище плівок, можна формувати плівки на крузі за рахунок підключення додаткового електроду, що призводить до певного ускладнення обладнання. Тому нами була звернена увага на використання ефектів неявної поляризації, одним з яких є ефект електрохімічної гетерогенності поверхні зв'язки. Цей напрямок заслуговує на увагу саме для кругів на зв'язках, які мають мідну матрицю та метали або неметали, у вигляді

включень, що відрізняються за своїми фізико-хімічними властивостями від металевої матриці. Це призводить до появи корозійних мікроелементів та посиленню електрохімічної гетерогенності поверхні зв'язки. Як приклад, це можливо проілюструвати на зв'язках, що мають основу Cu–Al–Zn з базовими елементами, які значно відрізняються між собою за значеннями стаціонарних електродних потенціалів (табл. 3). Це пов'язано з тим, що поверхня таких зв'язок є хімічно неоднорідною і на ній утворюються мікроскопічні гальванічні елементи: Cu–Al та Cu–Zn. Оскільки ці метали знаходяться у водяному середовищі (наприклад, за умов шліфування з охолодженням, а при шліфуванні без охолодження за рахунок використання дії ефекту водопоглинання), то елемент є замкненим і виникає локальний струм, що прискорює анодне розчинення. Алюміній спрямовує йони у розчин, де вони поєднуються з йонами гідроксилу:  $Al - 3e^- \rightarrow Al^{3+}$ ,  $Al^{3+} + 3OH^- \rightarrow Al(OH)_3$ , і швидко піддається корозії. У цілому, корозія Al, Zn та інших металів, що знаходяться у ряду напруг зліва від водню, зводиться по суті до витискування йонів водню з розчину і переходу самого металу в розчин у вигляді йонів. У контакті з менш активним металом цей процес різко прискорюється. Як наслідок, формуються умови виникнення на поверхні зв'язки плівок, близьких до катодних.

Для реалізації цього, ріжуча поверхня круга на деякий час занурюється у електроліт із утворенням локальної безструмової комірки з проміжком 0,1 мм, у якої “катодом” є поверхня круга, а “анодом” – матеріал, що піддається обробці (твердий сплав). Нами було вивчено 4 варіанти поведінки матеріалів зв'язок при витримці протягом 3 годин у такій безструмовій комірці. Оскільки, як вказано нами вище, найбільш пристосованими для цього є зв'язки з основою Cu–Al–Zn, то експерименти провадилися на зв'язці МО13Е у середовищах з різним рН – 4, 7 та 11, а також для порівняння була використана зв'язка

M2-01. За технологічну рідину слугував базовий склад електроліту. Встановлено, що із зростанням рН розчину вміст Al та Zn на поверхні знижується, а Cu, відповідно, зростає. Ці тенденції аналогічні тим, що проходять у електрохімічній комірці. Виявлено, що при цьому необхідно застосовувати електроліт з рН 11 та витримку не менше 3 годин. У такому випадку, вміст Al (22,4 мас. %) на поверхні робочого шару знижується на 4,3 мас. %, майже як і у електрохімічній комірці (на 5,7 мас. %), що дозволяє формувати на поверхні плівки, близькі до електрохімічних. У випадку зв'язок з основою Cu–Sn такі процеси не відбуваються і на такій зв'язці плівка не з'являється навіть при

витримці у 21 годину. Це засвідчив і аналіз поверхні на мікроаналізаторі “CamsCan-4DW”: відповідно (вихідний стан та при витримці 21 год., мас. %) Cu – 78,1 та 78,0, Sn – 21,5 та 21,0. Вміст Cu–Sn практично не змінився, хоча у спектрі поверхні, що витримувалася 21 годину у воді, все ж з’явилися певні сліди твердого сплаву, що піддався слабкому розчиненню. За таких умов на зв’язку MO13E надходить більше W, а такі елементи, як Ti та Co, майже не рееструються. Таким чином, можливий пошук умов формування на поверхні круга зі зв’язками з основою Cu–Al–Zn таких плівкових утворень, які були би близькими до катодних.

Вплив електризації в процесах алмазно-абразивної обробки на перебіг фрикційних процесів в зоні шліфування. При шліфуванні має місце електризація тертям або трибоелектризація, яку необхідно в багатьох випадках більш правильно називати контактною електризацією. Різниця потенціалів, при контактній електризації, визначається різницею робіт виходу контактуючих матеріалів.

Величину розділених в процесі електризації зарядів можна вважати з більшою вірогідністю пропорційною величині ефективної поверхні контакту та заряду, який перенесений на одиницю ефективної поверхні контакту. Зарядження частинок викликано головним чином їх розділенням, а їх зарядження є симетричним по розподіленню зарядів. Процес зарядження частинок обумовлений контактними явищами на поверхні та пов’язаний з розділенням поверхонь сусідніх частинок або, навпаки, з виникненням контакту. Суттєво, що процес зарядження, який спостерігається, не викликається тертям. Перехід заряджених носіїв, електронів або іонів, при безпосередньому контакті двох різноманітних речовин залежить від їх властивостей та структури [6].

Для визначення процесів електризації при шліфуванні та можливості її ефективного застосування за рахунок зміни перебігу фрикційних процесів в зоні обробки нами досліджено напруженість електростатичного поля, яка виникає при обробці, за допомогою вимірювача параметрів електростатичного поля ИПЭП-1.

Визначено початкове значення напруженості на шліфувальному диску АСМ 40/28–В1–13–100 та зразках після тертя, після чого було розраховано саму зміну напруженості за формулою:

$$\Delta E = E - E_0, \quad (2)$$

де  $E_0$  – початкове значення напруженості на шліфувальному диску (зразку);  $E$  – напруженість на шліфувальному диску (зразку) після тертя.

Матеріали, які піддавалися обробці, були поділені на групи: кераміка, полімерні матеріали, нікель, сталі, тверді вольфрамові та

безвольфрамові сплави, матеріали з вмістом алюмінію, матеріали з вмістом міді. Після розрахунку значень зміни напруженості для кожної серії дослідів, було визначено абсолютну величину середнього значення зміни (приросту, спаду) напруженості при терті матеріалів по шліфувальному диску (табл. 6).

Таблиця 6  
Середнє значення зміни напруженості на шліфувальному диску

№ з/п	Група матеріалів	Оброблюваний матеріал	$ \Delta E_{сер} $ , кВ/м
1	Кераміка	Кераміка	0,20
		ВО13	0,13
2	Полімерні матеріали	Текстоліт	0,29
		ТО2	0,13
3	Нікель	Нікель	0,30
4	Сталі	Сталь	0,36
		Швидкорізальна сталь	0,37
		X12M	0,17
5	Тверді вольфрамові та безвольфрамові сплави	TН20	0,27
		BK6	0,43
		BK8	0,27
		BK15	0,39
		T5K10	0,30
6	Матеріали з вмістом алюмінію	T15K6	0,40
		Алюміній	0,38
7	Матеріали з вмістом міді	M1-04	0,40
		Мідь	0,51
		Латунь	0,43
		M2-01	0,50

З даних таблиці видно, що найбільшу зміну напруженості на шліфувальному диску ми маємо після абразивного контакту із зразками з міді або мідьвміщуючими матеріалами (0,43—0,51 кВ/м). Певною мірою це можна пояснити високою електропровідністю міді та накопиченням після шліфування цих зразків найбільшої кількості зарядів одного знаку. Крім того, абсолютні середні значення зміни напруженості на шліфувальному диску при шліфуванні для матеріалів з вмістом алюмінію та матеріалів з вмістом міді – приблизно однакові. Це пояснюється їх високою провідною здатністю. Найменші значення напруженості спостерігаються при обробці керамік та полімерних матеріалів (0,13—0,29 кВ/м).

Таблиця 7

Залежність термоЕРС від характеристик кругів з НТМ  
при різній продуктивності обробки

Характеристики круга	Q, мм <sup>3</sup> /хв.	$\epsilon_{\text{роб.х.}}$ , мВ	$\epsilon_{\text{х.х.}}$ , мВ
12A2-45 125x5x3x32 KP 125/100 100%- M1-10 (без покриття)	100	1,3	0,6
	200	2,4	1,4
	300	3,0	2,8
	400	3,8	3,6
	500	4,0	3,8
12A2-45 125x5x3x32 KP 125/100C07 100%-M1-10 (склопокриття C07)	100	0,9	0,4
	200	1,8	1,4
	300	2,8	1,9
	400	3,3	2,6
	500	3,8	3,4
12A2-45 125x5x3x32 KP 125/100C02 100%-M1-10 (склопокриття C02 + Ti)	100	1,5	0,6
	200	2,8	1,6
	300	3,6	2,7
	400	4,1	3,3
	500	5,0	4,0
12A2-45 125x5x3x32 KP 125/100C05 100%-M1-10 (склопокриття C05 + Ti + Cu)	100	0,6	0,4
	200	1,5	1,2
	300	2,3	1,7
	400	3,9	3,1
	500	4,4	3,9
12A2-45 125x5x3x32 KP 125/100C03 100%-M1-10 (склопокриття + Ti +Ni)	100	0,9	0,5
	200	1,9	1,2
	300	3,0	2,0
	400	3,5	2,9
	500	3,6	3,2
12A2-45 125x5x3x32 AC6 125/100 100%- M1-10 (без склопокриття)	100	-1,7	-0,7
	200	-3,7	-2,7
	300	-4,3	-3,8
	400	-6,4	-5,1
	500	-6,5	-5,7
12A2-45 125x5x3x32 AC6 125/100C12 100%-M1-10 (склопокриття C12)	100	-2,4	-1,3
	200	-6,0	-4,6
	300	-5,5	-4,9
	400	-4,9	-4,3
	500	-5,9	-5,4

Відомо, що при абразивному обробленні можливе виникнення ефекту Зеебека, коли, внаслідок підвищення температури і різномірності матеріалу інструменту та оброблюваного матеріалу в зоні контакту інструменту з деталлю і шламом, виникають термоелектрорушійні сили

(термоЕРС). Під час шліфування різних груп матеріалів кругами з різними характеристиками робочого шару температура та термоЕРС в зоні оброблення різняться. Для кожного поєднання матеріалів інструменту та деталі доцільно визначити оптимальне значення термоЕРС, яке в подальшому можна використовувати для контролю або діагностики процесу шліфування і додаткового впливу на нього. Тому нами було приділено увагу термоелектричним явищам, які виникають в процесах абразивного оброблення кругами з надтвердих матеріалів. Дослідили залежність величини термоелектрорушійної сили (термоЕРС) від продуктивності оброблення при шліфуванні швидкорізальної сталі Р6М5 та твердого сплаву ВК8 кубонітовими та алмазними кругами відповідно. Застосовувались круги типорозміру 12А2-45° 125х5х3х32 на металевому з'язуючому М1-10 без склопокриття та зі склопокриттям алмазних зерен. Результати дослідження наведені в таблиці 7. Результати дослідження показали, що для кубонітових кругів найвища термоЕРС спостерігається при обробленні кругами зі склопокриттям та металізованим покриттям титаном різальних зерен круга; найнижча – при обробленні кругами зі склопокриттям кубонітових зерен. Доцільно зауважити, що це значення нижче, ніж при обробленні кубонітовими кругами без покриття зерен. З підвищенням продуктивності оброблення термоЕРС підвищується для всіх випадків. Для алмазних кругів за нижчої продуктивності процесу абсолютне значення термоЕРС при обробці кругами зі склопокриттям вище, ніж зафіксоване при обробці кругами без покриття зерен, за вищої продуктивності – навпаки. Іншими словами, для алмазних кругів без покриття робочих зерен абсолютне значення термоЕРС підвищується інтенсивніше прямопропорційно підвищенню продуктивності обробки. Крім того, при обробленні твердого сплаву отримали від'ємне значення термоЕРС. Отже, її знак залежить від характеристик оброблюваного матеріалу та інструменту. Наведене вище окрім іншого вказує також і на те, що в процесах електрофізичної обробки важливе значення має електродний матеріал. Таким чином, можна наголосити, що у процесах абразивної обробки є важливим врахування процесів електризації при шліфуванні, адже це може змінити перебіг фрикційних процесів в зоні обробки.

Необхідно також зауважити, що на електроопір шліфувальних кругів найбільше впливають відносна концентрація зерен НТМ, їх покриття та зв'язка круга. Із підвищенням концентрації НТМ електроопір кругів відчутно зростає, оскільки у зв'язці підвищується частка неелектропровідного абразиву. Склопокриття зерен НТМ різко підвищує величину електроопору. Це викликане підвищенням вмістом неелектропровідного матеріалу (скла) у композиції абразив-зв'язка. Електроопір кругів без покриття і з металізованим покриттям зерен НТМ має незначну різницю.

В попередніх дослідженнях [6, 7] було показано, що електричні явища та термоструми, які мають місце в зоні шліфування напряду пов'язані зі зносостійкістю алмазно-абразивного інструменту. Чим вище модульна величина напруженості електростатичного поля шламу або ж термоЕРС в процесі шліфування – тим вищі відносні витрати зерен НТМ (табл. 8).

Таблиця 8

*Вплив термоЕРС при шліфуванні на відносні витрати зерен НТМ та якість обробленої поверхні*

Характеристика кругів	$\varepsilon$ , мВ	$q_p$ , мг/г	$R_a$ , мкм
12A2-45 125x5x3x32 КР 125/100 100%-M1-10 (без покриття)	2,4	3,88	0,71
12A2-45 125x5x3x32 КР 125/100C07 100%-M1-10 (склопокриття C07)	1,8	8,88	0,67
12A2-45 125x5x3x32 КР 125/100C02 100%-M1-10 (склопокриття C02 + Ti)	2,8	39,98	0,93
12A2-45 125x5x3x32 КР 125/100C05 100%-M1-10 (склопокриття C05 + Ti + Cu)	1,5	12,7	0,9
12A2-45 125x5x3x32 КР 125/100C03 100%-M1-10 (скло покриття C03 + Ti +Ni)	1,9	19,13	0,91
12A2-45 125x5x3x32 AC6 125/100 100%-M1-10 (без склопокриття)	-3,7	7,14	0,62
12A2-45 125x5x3x32 AC6 125/100C12 100%-M1-10 (склопокриття C12)	-6,0	9,39	0,62

Отже, для досягнення позитивного ефекту від електричних явищ, в тому числі термострумів, які виникають в зоні шліфування, важливо враховувати властивості оброблюваного матеріалу та характеристики робочого шару алмазно-абразивного інструменту. Правильний вибір інструменту з НТМ забезпечить більш якісний перебіг процесу оброблення. Крім того, оптимальний вибір пари «інструмент–деталь», в свою чергу, може забезпечити, внаслідок поляризації поверхонь контакту, утворення катодних плівок на робочій поверхні інструменту, позитивна роль яких наведена вище.

#### **Висновки:**

1. Встановлено, що для досягнення ефективною обробки інструментальних матеріалів необхідно мати такий процес електрошліфування, який би виключав негативну дію як інтенсивних електрохімічних, так і інтенсивних електрофізичних процесів, що призводять до виникнення тріщин та виколочок.



2. За умов електрошліфування кругами з НТМ електрохімічних електродних процесів недостатньо для досягнення відчутних показників анодного розчинення, але цілком достатньо для поляризації поверхонь аноду і катоду, формування на них плівок і зміни, тим самим, умов електрофізичного контактування електродів.

3. Встановлено, що наявність катодних плівок на поверхні зв'язки круга призводить до зниження коефіцієнта тертя зв'язки з оброблюваним матеріалом, що дозволяє визначити умови зниження зносу зв'язок при формуванні на їх поверхні катодних плівок.

4. У процесах абразивної обробки є важливим врахування процесів електризації при шліфуванні, адже це може змінити перебіг фрикційних процесів в зоні обробки.

5. Визначено, що на електроопір шліфувальних кругів найбільше впливають відносна концентрація зерен НТМ, їх покриття та зв'язка круга. Із підвищенням концентрації НТМ електроопір кругів відчутно зростає, оскільки у зв'язці підвищується частка неелектропровідного абразиву. Склопокриття зерен НТМ різко підвищує величину електроопору.

6. Електричні явища та термоструми, які мають місце в зоні шліфування напряму пов'язані зі зносостійкістю алмазно-абразивного інструменту. Чим вище величина напруженості електростатичного поля шламу, взята за модулем, або ж термоЕРС в процесі шліфування – тим вищі відносні витрати зерен НТМ.

7. Вказано, що для досягнення позитивного ефекту від електричних явищ, в тому числі термострумів, які виникають в зоні шліфування, важливо враховувати властивості оброблюваного матеріалу та характеристики робочого шару алмазно-абразивного інструменту. Правильний вибір інструменту з НТМ забезпечить більш якісний перебіг процесу оброблення. Оптимальний вибір пари «інструмент–деталь», в свою чергу, може забезпечити внаслідок поляризації поверхонь контакту, утворення катодних плівок на робочій поверхні інструменту.

### Список використаної літератури:

1. *Фадеев Г.Н.* Пятая вертикаль: элементы V группы периодической системы Менделеева / *Г.Н. Фадеев.* – М. : Просвещение, 1985. – 191 с.
2. *Беззубенко Н.К.* Процессы алмазно-искрового шлифования / *Н.К. Беззубенко* // Резание и инструмент. – 1981. – Вып. 26. – С. 39–42.

3. *Лавріненко В.И.* Электрошлифование инструментальных материалов / *В.И. Лавріненко.* – К. : Наук. думка. – 1993. – 155 с.
4. *Седыкин Ф.В.* Размерная электрохимическая обработка деталей машин / *Ф.В. Седыкин.* – М. : Машиностроение, 1976. – 302 с.
5. *Лавріненко В.И.* Катодные пленки при электрохимическом шлифовании кругами из СТМ / *В.И. Лавріненко* // Сверхтвердые материалы. – 1996. – № 2. – С. 56–61.
6. *Лавріненко В.И.* Електричні явища в процесах механічної обробки, їх взаємозв'язок з продуктивністю та енергоємністю оброблювання та способи ефективного застосування цих явищ / *В.И. Лавріненко, О.А. Девіцький, Б.В. Ситник* // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. пр. – Донецьк, 2009 – С. 122–126.
7. *Девіцький О.А.* Дослідження електризації при абразивній обробці кругами з НТМ із включеннями та покриттям / *О.А. Девіцький* // Тези доповідей до X Всеукр. молодіжної наук.-техн. конф. «Машинобудування України очима молодих: прогресивні ідеї – наука – виробництво». – Суми, 2010. – С. 42–44.

ЛАВРІНЕНКО Валерій Іванович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, завідувач відділу № 3 Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- шлифування кругами з НТМ;
- інструменти з НТМ;
- властивості робочого шару кругів.

Тел.: 432–95–15.

E-mail: [ceramic@ism.kiev.ua](mailto:ceramic@ism.kiev.ua).

ДЄВИЦЬКИЙ Олександр Анатолійович – молодший науковий співробітник відділу № 3 Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- шлифування кругами з НТМ;
- інструменти з НТМ;
- властивості робочого шару кругів;
- електричні явища в процесах механічної обробки.

Тел.: 467–58–54.

E-mail: [devitsky@mail.ua](mailto:devitsky@mail.ua).

ПАСІЧНИЙ Олег Олегович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, відділ № 3 Інституту надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- шліфування кругами з НТМ;
- інструменти з НТМ;
- властивості робочого шару кругів.

Тел.: 432–95–15.

E-mail: [ceramic@ism.kiev.ua](mailto:ceramic@ism.kiev.ua).

Стаття надійшла до редакції

**Лаврінченко В.І., Дєвицький О.А., Пасічний О.О.** Эффекты, що виникають в процесах електрошліфування, та пошук шляхів їх утворення за умов неявної поляризації або електризації при обробці

**Лавриненко В.И., Девицкий А.А. Пасичный О.О.** Эффекты, возникающие в процессах электрошлифования и поиск путей их образования при условиях неявной поляризации или электризации при обработке

**Lavrinenko V.I., Devitsky A.A., Pasichny O.O.** Effects arising in the process of electro grinding and finding education under the conditions implicit polarization or electrization in processing.

УДК 621.923

**Эффекты, возникающие в процессах электрошлифования и поиск путей их образования при условиях неявной поляризации или электризации при обработке / В.И. Лавриненко, А.А. Девицкий, О.О. Пасичный**

Исследованы эффекты, сопровождающие процесс электрошлифования кругами из СТМ. Рассмотрены кинетика катодных процессов, элементный состав и характеристики катодных пленок. Определены положительная роль этих пленок и влияние на изменение течения фрикционных процессов в зоне шлифования, а также возможности их формирования в результате электрохимической гетерогенности связки кругов из СТМ и образования в условиях неявной поляризации. Рассмотрено влияние электризации в процессе шлифования на фрикционные процессы в зоне контакта инструмента с деталью.

УДК 621.923

**Effects arising in the process of electro grinding and finding education under the conditions implicit polarization or electrization in processing / V.I. Lavrinenko, A.A. Devitsky, O.O. Pasichny**

Investigated the effects that are produced when electric grinding wheels with SHM. The kinetics of cathode processes, elemental composition and characteristics of the cathode films. A positive role of these films and the effect in changing the course of frictional processes in the grinding zone and the possibility of forming an electrochemical heterogeneity band circles of SHM and education in the implicit polarization. The effect of polarization during grinding processes in the friction area of contact of the tool with the workpiece.