

В. І. Лавріненко^{1, *}, В. Ю. Солод^{2, **}

Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України,
м. Київ, Україна

Дніпровський державний технічний університет МОН України,
м. Кам'янське, Україна

**lavrinenko@ism.kiev.ua*

***v_solod@ukr.net*

Процес абразивної обробки як фрикційна взаємодія різнородних матеріалів

Проведено оцінювання частки енергії тертя в абразивному процесі для різних оброблюваних інструментальних матеріалів і запропоновано шляхи зменшення тертя при шліфуванні кругами з надтвердих матеріалів, насамперед зменшення тертя на поверхні зв'язки кругів з НТМ.

Ключові слова: абразивна обробка, фрикційна взаємодія, круги з надтвердих матеріалів, зв'язка круга.

Абразивна обробка є процесом формотворення деталей значною кількістю абразивних часток (зерен) [1]. В [2] це визначено як процес шліфування, де зерна круга здійснюють масове мікрорізання. Ці визначення є безумовно справедливим, але воно відноситься в значній мірі до ідеальних умов, коли абразивні зерна помітно виступають зі зв'язки і контактний процес (в тому числі процес тертя) переважно визначається мікрорізанням, тобто контактом зерна і оброблюваного матеріалу, і тому шляхи зміни контактних процесів слід шукати саме у зоні різання. Але насправді у переважній більшості процесів абразивної обробки, особливо за умов обробки з високою продуктивністю, існують інші контактні процеси: взаємодія зв'язки круга зі шلامом, взаємодія шламу з оброблюваним матеріалом і навіть взаємодія зв'язки круга з оброблюваним матеріалом при швидкому зношуванні абразивних зерен. Особливо це є характерним для кругів з надтвердих матеріалів (НТМ). Так, в [3] для таких кругів показано, що в конкретний момент в процесі обробки знімання матеріалу здійснює лише невелика частина абразивних зерен, що знаходяться на робочій поверхні, і при незначному виступі зерен стає можливим безпосередній контакт шламу зі зв'язкою круга і оброблюваною поверхнею. Як наслідок, значно інтенсифікується тертя при обробці. Наприклад, в [4] показано, що при абразивному шліфуванні основна (80–98 %) частина енергії, що підводиться до зони обробки, витрачається на роботу тертя. Тобто процес абразивної обробки треба розглядати як процес фрикційної взаємодії різнородних матеріалів, а пошук шляхів зменшення сили тертя (тим самим і підвищення ефективності процесу абразивної обробки) слід вести у напрямку зниження інтенсивності тертя не тільки у зоні контакту абразивного зерна з оброблюваним матеріалом, а, в першу чергу, в зоні контакту шламу зі зв'язкою і оброблюваним матеріалом.

Як вказано вище, на подолання сили тертя в процесі абразивної обробки витрачається значна (80–98 %) частина загальної енергії. В [5] також показа-

но, що частка енергетичних витрат на тертя становить значну частину всієї енергії, що витрачається при шліфуванні. На наш погляд, такі оцінки є з великими і треба більш реально оцінити цю частину енергії, щоб визначити шляхи подолання енергетичних витрат на тертя. У даній роботі зроблено спробу оцінити витрати на тертя з різних позицій: витрати енергії в абразивному процесі, роботи при шліфуванні, особливості теплових процесів і силових характеристик, а саме коефіцієнта абразивного різання, також розглянуто шляхи зменшення сили тертя в процесах шліфування кругами з НТМ.

Енергія в абразивному процесі, що витрачається на шліфування, складається з трьох компонентів [6]: енергії на утворення стружки, на пластичне деформування матеріалу без відділення стружки і на тертя на контактних ділянках абразивних зерен і поверхні, що оброблюється. При шліфуванні чорних металів мінімальна питома енергія складає $12,4\text{--}15,2$ МДж/м³ незалежно від виду сталі. В той же час, енергія, що є необхідною для розплавлення одиниці об'єму сталі з твердого стану при 25 °С, складає $10,4$ МДж/м³ або лише 75 % від мінімальної вимірної питомої енергії шліфування. В [6] зроблено припущення, що енергія різання матеріалу під час стружкоутворення наближається до енергії, необхідної для плавлення металу, а надлишкова (25 %) енергія при шліфуванні витрачається на тертя між шламом і шліфувальним кругом. Звідси оцінка витрат енергії на тертя – 25 %.

Робота при шліфуванні витрачається як на видалення припуску, так і на тертя в зоні різання. Та робота, що витрачається на тертя, складає 18–25 % від сумарної роботи шліфування [7].

Розподілення тепла при шліфуванні викликано тепловідведенням по напрямкам – у круг, матеріал, що обробляють, шлам і охолоджувальну рідину. Частка тепла, що нагріває матеріал, залежить від режимів обробки, характеристики круга і коливається у межах 10–34 % від загальної кількості тепла. Менші значення цієї частки відповідають використанню металічних зв'язок і обробці з охолодженням, більші – “сухому” шліфуванню кругами з НТМ на полімерних зв'язках [8]. Тобто, якщо припустити, що вся ця частка тепла викликана тертям, маємо третю оцінку – 10–34 %.

Розглянемо силові показники процесу шліфування, насамперед коефіцієнт абразивного різання – співвідношення складових зусилля різання при шліфуванні – P_z і P_y ($f_a = P_z/P_y$). Співвідношення P_z/P_y оцінює корисну роботу різання–диспергування відносно роботи проникнення зерен в оброблюваний матеріал і їхнього взаємного тертя. Чим більшим є значення P_z/P_y , тим більш оптимальними є умови шліфування при оцінюванні співвідношення робота сил різання і робота сили тертя, яка зазвичай переважає в енергетичному балансі шліфування [7]. Зі збільшенням глибини мікрорізання алмазним зерном сталі ШХ15 відношення P_z/P_y зростає, що свідчить про зменшення частки тертя у загальному процесі різання [9]. Чим більше P_z/P_y відрізняється від значень коефіцієнта тертя, тим ефективніше ріже круг [10]. Сила P_z пов'язана з подрібненням матеріалу (без тертя), а сила P_y – відтисненням індентора (алмазного зерна). При затуплених зернах (з площадками зносу) це співвідношення зменшується і наближається до коефіцієнта тертя. В процесі шліфування коефіцієнт абразивного різання може змінюватися в межах від значення коефіцієнта різання окремим зерном до значення коефіцієнта тертя або залишатися незмінним [11].

Таким чином, доцільно визначити, яким є співвідношення коефіцієнта тертя (при терті оброблюваного матеріалу по зв'язці) і коефіцієнта абразивного різання за аналогічних умов обробки. Авторами свого часу було проведено

дослідження значень коефіцієнтів тертя металічних та полімерних зв'язок, які найчастіше застосовуються при обробці інструментальних матеріалів (твердих сплавів і керамік) [12–14] (табл. 1). Видно, що значення як коефіцієнта абразивного різання, так і коефіцієнта тертя залежать від матеріалу, що обробляли. В табл. 1 також наведено дані про частку енергії, що витрачається на тертя, причому якщо дані для твердих сплавів і оксидно-карбідної кераміки вписуються у наведені вище оцінки (18–25, 25, 10–34 %), то для оксидних керамік частка енергії тертя суттєво більша, і іноді коефіцієнт абразивного різання може майже дорівнювати коефіцієнту тертя. Опосередкованим підтвердженням цього є те, що при обробці оксидної кераміки по пружній схемі, на відміну від обробки інших керамік і твердих сплавів, продуктивність шліфування досить різко зменшується – з 2600–3200 до 380 мм³/хв. [13], а це означає підвищену складову P_y , а отже і високе значення коефіцієнта тертя.

Таблиця 1. Коефіцієнти абразивного різання f_a і тертя f різних інструментальних матеріалів та частка енергії, що витрачається на тертя у процесі шліфування

Матеріал	f_a	f	Частка енергії тертя в процесі шліфування, %
Оксидна кераміка	0,06–0,08	0,031–0,078	52–98
Безвольфрамовий твердий сплав	0,17–0,26	0,049–0,108	29–42
Оксидно-карбідна кераміка	0,23–0,32	0,047–0,092	20–29
Твердий сплав	0,30–0,37	0,051–0,167	17–45

Наведене означає, що необхідно знижувати інтенсивність тертя в зоні оброблення і, насамперед, у зоні взаємодії зв'язки зі шламом. Основним джерелом підвищеного тертя у цьому випадку, на наш погляд, є абразивний вплив шламу на зв'язку. Для його зменшення можливими є два шляхи: перший – збільшення твердості зв'язки, другий – створення захисних плівок на поверхні зв'язки. Розглянемо конкретну реалізацію цих двох шляхів.

В [12] показано, що з підвищенням твердості полімерних і металополімерних зв'язок коефіцієнт тертя знижується і, наприклад, для металополімерних зв'язок характер такого зниження має вигляд

$$f = (5,96 \cdot 10^{-2} - 6,56 \cdot 10^{-4}) H_{зв},$$

де $H_{зв}$ – твердість зв'язки, HRВ. Для металічних зв'язок такої залежності не знайдено, тут більший вплив має їх основа. Так, зв'язки з основою Cu–Sn мають менший коефіцієнт тертя, аніж зв'язки з основою Cu–Al–Zn. Наприклад, коефіцієнт тертя по твердому сплаву BK8 для зв'язок з основою Cu–Sn складає 0,051–0,058, а для зв'язок з основою Cu–Al–Zn – 0,148–0,188, що ймовірно пов'язано з більш гетерогенною будовою їх поверхні.

Якщо зв'язку круга замінювати не бажано, але необхідно підвищити її антифрикційні властивості, існує можливість зниження тертя за рахунок модифікації складу зв'язок при введенні в них наповнювачів, які сприяють зниженню тертя (чавуну, графіту, дисульфиду молібдену, фтористого кальцію, тощо). Воодночас модифікація зв'язок потребує зміни технологічного процесу виготовлення інструменту з НТМ, фактично змінює вибрану зв'язку, є специфічною до певних умов обробки і не завжди є позитивною, особливо для

утримання зерен НТМ у зв'язці. Тому було запропоновано компромісне рішення: частину (25 %) алмазних зерен у зв'язці замінюють на зернисті компакти з КНБ з вуглецевим наповнювачем [15]. У цьому випадку твердість зв'язки залишається без змін, більш того, введення, хоча і шаруватих, але компактів з мікропорошків КНБ високої твердості не тільки не погіршує твердість зв'язки, а у певній мірі зміцнює зв'язку і захищає її від негативного впливу абразивного шламу. Як наслідок, це дає можливість значно (до 3 раз) збільшити зносостійкість алмазного інструменту [15].

Але коли немає можливості змінювати зв'язку або вводити в робочий шар круга антифрикційні компакти, можна використати процес створення захисних плівок на поверхні зв'язки, які змінюють умови тертя в зоні контакту.

Слід розділяти плівки за їх природою – пасиваційні та мастильні, а також за методами нанесення. Пасивація, яка запобігає утворенню хімічних та інтерметалічних зв'язків між контактуючими поверхнями, відбувається внаслідок реакції активних компонентів плазми з ювенільними поверхнями, що безперервно утворюються у процесі різання [16]. Кисень в процесах різання є важливим чинником зміни триботехнічних характеристик контактних поверхонь – оксидні шари, що виникають під дією кисню або його сполук на контактних поверхнях, значно зменшують коефіцієнт тертя. Чим вищою є хімічна активність металу до кисню, тим спостерігається більше зменшення коефіцієнту тертя. Так, коефіцієнт тертя стружки по передній поверхні інструменту при різанні для ювенільних поверхонь має значення 0,8–6,0, а для окислених поверхонь – 0,4–0,8 [17]. При шліфуванні часто використовують водянні розчини технологічних рідин на основі солей лужних металів (розчини електролітів). Високі температури шліфування не виключають можливості одночасної присутності в зоні обробки як насичених сольових розчинів, так і оксидів лужних металів. Достатня кількість кисню у повітрі, водяне середовище і продукти термічного розкладання елементів технологічної рідини сприяють швидкому окисленню поверхні металу. Збільшенню продуктів окислення сприяють не тільки високі температури в зоні різання шліфувальним кругом, але і накопичення на оброблюваній поверхні позитивних електричних зарядів (термоелектричний ефект). У цьому випадку є умови для електрохімічних процесів в зоні контакту [18].

Разом з тим [19], анодні електрохімічні процеси на оброблюваній поверхні є вкрай негативними, оскільки вони значно збільшують інтенсивність процесу тертя. Це виразно проявляється у дії дослідженого авторами ефекту “змащування” електричним струмом [20]. Було встановлено, що при накладенні потенціалу на зону фрикційного контакту при електрошліфуванні кругами з НТМ коефіцієнт тертя змінюється, причому при невеликих напругах він знижується (для швидкорізальних сталей – при 0–6 В, для вольфрамових твердих сплавів – при 0–3 В, для безвольфрамових твердих сплавів (БВТС) – при 0–2 В [4]). При подальшому підвищенні напруги ефект “змащування” зникає. Причина полягає в тому, що при підвищенні напруги, наприклад більше 2 В для БВТС, на їх поверхні виникають анодні плівки, які суттєво змінюють фрикційні процеси при напругах 8–10 В [19]. Аналогічно це відбувається і на інших матеріалах. Тобто для збереження антифрикційних процесів в зоні обробки слід уникати примусового нанесення анодних оксидних плівок на оброблювану поверхню. Але більш цікавим є наслідок електрохімічних процесів на поверхні круга, а саме поява плівок на ній. Так, при терті зв'язки М2-01 по сплаву ТН20 у випадку примусового формування на поверхні зв'язки анодних плівок (до круга підводять “плюс” від джерела струму) коефіцієнт тертя

складає 0,06, а при примусовому формуванні катодних плівок (до круга підводять “мінус”) – 0,045 (при відсутності плівок – 0,049). Це свідчить, що на поверхні круга для отримання кращого фрикційного контакту бажано примусово формувати саме катодні плівки [21].

Таким чином, примусово створювати плівки треба лише на робочій поверхні круга. На практиці можливими є ще два варіанти такого примусового утворення: іонно-плазмове напилення, тобто, зовнішнє нанесення, і реалізація внутрішніх резервів перерозподілу елементів у поверхневому шарі за рахунок, наприклад, плазмового теплового впливу.

Розглянемо перший варіант – нанесення іонно-плазмового покриття на робочу поверхню інструменту. В [22] розглядали вплив багатошарового іонно-плазмового покриття TiC/Co і TiN/Co на працездатність алмазних одношарових правлячих інструментів, отриманих гальванічним методом. Здебільшого у правлячому інструменті знос робочої поверхні відбувається двома шляхами: за рахунок абразивного зносу алмазних ріжучих елементів (зерен) і за рахунок виривання алмазних зерен зі зв'язки. Аналіз характеру зносу робочої поверхні алмазних правлячих роликів засвідчив, що у ряді випадків другий механізм превалює над першим [22]. Це відбувається через гідроабразивне вимивання зв'язки навкруги зерна. Закріплення зерна в зв'язці погіршується, міцність утримання зменшується. Було висунуто гіпотезу [22] про те, що іонно-плазмове багатошарове покриття, яке підвищує твердість і антифрикційність поверхні нікелевої зв'язки, сповільнює темпи її гідроабразивного вимивання. Для підтвердження даного припущення для одношарового правлячого інструменту, виготовленого методом гальваностегії, було проведено дослідження впливу багатошарових покриттів з нітриду або карбіду титану з тонкими прошарками кобальту на зносостійкість інструменту. Для дослідів зразки було виготовлено у вигляді правлячих олівців, на робочій поверхні яких методом гальваностегії було закріплено по п'ять кристалів з однієї партії синтетичних алмазів АС160Т 630/500 загальною масою 2,7 мг. Зразки зарощували нікелем в однакових умовах, на однакових режимах попарно, і далі досліджували три групи зразків: без покриття, з іонно-плазмовими покриттями TiC/Co і TiN/Co товщиною 10 ± 1 мкм кожне. Випробування проводили методом правки абразивного круга до повного зносу алмазних зерен (табл. 2). Встановлено, що нанесення багатошарового покриття з TiC з компенсувальними прошарками з пластичного металу (Co) підвищує зносостійкість одношарового правлячого інструменту в 2,3 рази, а при застосуванні покриттів з TiN – у 1,8 рази.

Таблиця 2. Зносостійкість одношарових алмазних правлячих олівців з нанесеним покриттям

Покриття	Витрати абразиву, кг	Зміна маси зразка, мг	Відносні витрати зерен алмазу, мг/кг
Без покриття	0,506	2,7	5,34
TiC/Co	1,185	2,7	2,29
TiN/Co	0,908	2,7	2,97

Розглянемо другий варіант примусового утворення покриття – плазмовий термічний вплив. Встановлено [23], що при плазмовій обробці також можна досягти певного утворення покриття як на зернах НТМ, так і на зв'язці, причому саме покриття утворюється за рахунок перерозподілу матеріалу зв'язки,

що може змінити контактні процеси в зоні обробки при шліфуванні. При цьому аналіз елементного складу плівок, що виникають на абразивних зернах і зв'язці в зоні плазмового впливу засвідчив наступне: в них досить багато кисню, причому на зернах його фіксується більше – від 26,7 до 33,6 % (за масою), тоді як на зв'язці менше – від 16,9 до 25,0 % (за масою). Дещо інший і розподіл елементів зв'язки, що входять до складу плівок. Наприклад, якщо для вихідної суміші зв'язки MO20-2 співвідношення між основними складовими зв'язки Cu:Sn:Sb складає 8,75:2:1, то на абразивних зернах це співвідношення – 5:2:1 (спостерігаємо меншу кількість міді), а на поверхні зв'язки – 8,95:3,78:1, тобто майже вдвічі (1,79 рази) кількість олова в плівці перевищує вихідну у суміші.

Дослідження і висновки з них, що наведено вище, дозволяють зробити припущення, що плазмовий вплив на ріжучу поверхню круга внаслідок створення на ній плівок зі зміненим елементним складом поверхні зв'язки і зерен може привести до підвищення зносостійкості шліфувальних кругів. Досліджували показники процесу шліфування при продуктивності обробки $100 \text{ мм}^3/\text{хв}$ алмазним кругом 12A2-45° 125×5×3×32 AC6 125/100 100 M2-01 твердого сплаву ВК6 після різних методів впливу на ріжучу поверхню круга. Встановлено, що після попереднього механічного впливу на ріжучу поверхню круга вільним абразивом відносні витрати алмазів склали 1,2 мг/г, після електроерозійного впливу при $U = 30 \text{ В}$, $I = 2 \text{ А}$ – 1,97 мг/г, а після впливу плазмовим струменем при $I = 150 \text{ А}$, $v_{\text{пер}} = 25 \text{ см/хв}$ – 0,87 мг/г. Це свідчить про те, що плазмовий вплив невеликої потужності дозволяє підвищити зносостійкість круга в 1,4 рази, а також що після плазмового впливу відбувається більш “м'яке” різання кругом. Певною мірою це пов'язане саме з утворенням плівок на поверхні зв'язки і зернах круга.

Таким чином, для зменшення інтенсивності фрикційних процесів в зоні шліфування кругами з НТМ і, насамперед, зменшення тертя на поверхні зв'язки кругів з НТМ необхідно змінювати стан поверхні зв'язки за рахунок двох основних способів: по-перше, збільшення твердості зв'язки зміною її складу або заміною у робочому шарі круга частини (25 %) зерен НТМ на антифрикційні компакти з мікропорошків КНБ з вуглецевою зв'язкою, і, по-друге – створення захисних плівок на поверхні саме зв'язки, а плівки на робочій поверхні круга повинні бути пасиваційними або примусово нанесеними, наприклад, плазмовим методом, але з підвищеним вмістом кисню.

Проведена оцінка доли тертя в абразивному процесі для різних оброблюваних інструментальних матеріалів і пропозити шляхи зниження тертя при шліфуванні кругами з свертвердых матеріалів.

Ключевые слова: абразивная обработка, трение, фрикционное взаимодействие, круги из свертвердых материалов, связка круга.

The portion of friction energy in the abrasive machining process has been assessed for various cutting-tool materials machined, and some methods for decreasing friction in grinding with superabrasive wheels, especially reducing friction on the bond surface of superabrasive wheels.

Keywords: abrasive machining, friction interaction, superabrasive wheels, wheel bond.

1. Мазур М. П., Внуков Ю. М., Доброскок В. Л., Залогова В. О., Новоселов Ю. К., Якубов Ф. Я. Основи теорії різання матеріалів: Підручник для вищ. навч. закладів / Під заг. ред. М. П. Мазура. – Львів: Новий світ-2000, 2010. – 422 с.
2. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. – М.: Машиностроение, 1974. – 320 с.

3. *Захаренко И. П.* Основы алмазной обработки твердосплавного инструмента. – К.: Наук. думка, 1981. – 300 с.
4. *Лавриненко В. И., Солод В. Ю.* Инструменты из сверхтвердых материалов в технологиях абразивной и физико-технической обработки. – Каменское: ДГТУ, 2016. – 529 с.
5. *Яцерицын П. И., Бранович Э. С.* Роль связки шлифовального круга в работе сил трения и в теплообразовании // Респуб. науч.-техн. совещание “Магнитно-абразивное полирование деталей”, 12–13 окт. 1976 г.: Тез. докл. – Минск: АН БССР, 1976. – С. 3–9.
6. *Malkin S., Joseph N.* Minimum energy in abrasive processes // *Wear.* – 1975. – **32.** – Р. 15–23.
7. *Старков В. К.* Физический механизм съема материала при шлифовании // Современные технологии в машиностроении: К юбилею Ф. Я. Якубова: Сб. науч. ст. / Под общ. ред. А. И. Грабченко. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2007. – С. 156–171.
8. *Шейн А. В.* Исследование процесса плоского торцового шлифования инструментальных материалов алмазными кругами: Автореф. ... канд. техн. наук. – Куйбышев: КПИ, 1971. – 31 с.
9. *Сагарда А. А., Химач О. В.* Контактная температура и силовые зависимости при резании алмазным зерном // Синтет. алмазы. – 1972. – Вып. 2. – С. 5–9.
10. *Семко М. Ф.* Особенности процесса резания алмазным и минералокерамическим инструментом и обработки пластмасс: Автореф. ... докт. техн. наук. – К.: КПИ, 1968. – 76 с.
11. *Сухобрус А. А.* Исследование силовых и энергетических характеристик процесса шлифования хрупких материалов // Сверхтв. материалы. – 1993. – № 1. – С. 64–69.
12. *Лавриненко В. И., Чальй В. Т., Шклярченко В. В.* Антифрикционные свойства связок на полимерной основе // Композиционные материалы на основе алмазов и кубического нитрида бора для изготовления инструмента. – К.: ИСМ НАН Украины, 1994. – С. 17–24.
13. *Шепелев А. А., Лавриненко В. И., Боднарчук Н. И., Шклярченко В. В., Лазнюк В. Д.* Алмазное шлифование керамики на основе нитрида кремния и карбида бора // Сверхтв. материалы. – 1994. – № 3. – С. 43–50.
14. *Лавриненко В. И., Шепелев А. А., Солод В. Ю.* Особенности фрикционного контакта связки кругов из СТМ и обрабатываемых материалов // Там же. – 1995. – № 5. – С. 26–29.
15. *Лавриненко В. И., Ситник Б. В., Полторацкий В. Г., Бочечка О. О., Солод В. Ю.* Композити на основі мікропорошків КНБ, структурованих вуглецевою зв’язкою, як функціональні елементи в структурі робочого шару алмазно-абразивного інструмента. Повідомлення 2. Композити як опорні елементи // Там же. – 2014. – № 5. – С. 53–60.
16. *Смазочно-охлаждающие* технологические средства для обработки металлов резанием: Справ. / Под ред. С. Г. Энтелеса, Э. М. Берлинера. – М.: Машиностроение, 1986. – 352 с.
17. *Латышев В. Н., Наумов А. Г.* Об эффективности использования кислорода в процессе резания // Резание и инструмент в технологических системах. – 2001. – Вып. 60. – С. 121–127.
18. *Корчак С. Н., Шамин В. Ю.* Физико-химическое взаимодействие СОЖ на производительность шлифования // Вопросы теории действия смазочно-охлаждающих технологических средств в процессах обработки металлов резанием: Сб. 2. – Горький: ГПИ, 1975. – С. 50–53.
19. *Лавриненко В. И., Пугач Э. А., Филиппенко С. И., Солод В. Ю., Постолова Г. Г.* Состав и структура анодных оксидных пленок при алмазно-электрохимическом шлифовании безвольфрамовых твердых сплавов // Физика и химия обработки материалов. – 1989. – № 2. – С. 76–82.
20. *Лавриненко В. И., Рыжов Э. В., Солод В. Ю.* Контактное взаимодействие поверхностей круга и обрабатываемого материала при электрошлифовании // Трение и износ. – 1997. – **18,** № 1. – С. 89–91.
21. *Лавриненко В. И.* Катодные пленки при электрохимическом шлифовании кругами из СТМ // Сверхтв. материалы. – 1996. – № 2. – С. 56–61.
22. *Лавриненко В. И., Шейко М. Н., Дабижка Е. В., Бондарь И. В., Бологов П. И., Лубнин А. Г.* Влияние ионно-плазменных покрытий на эксплуатационные свойства алмазного правящего инструмента // Там же. – 2008. – № 6. – С. 73–80.
23. *Лавриненко В. И., Скрябин В. О., Ситник Б. В., Смоквина В. В., Лещук І. В., Ткач В. М., Самотугін С. С., Мазур В. О., Кудінова К. В.* Дослідження впливу плазмової обробки на різальну поверхню шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів // Там же. – 2010. – № 5. – С. 81–87.

Надійшла 31.05.17