

Исследование процессов обработки

УДК 621.923: 621.922

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

¹Інститут надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля
НАН України, м. Київ, Україна

²Дніпродзержинський державний технічний університет,
м. Кам'янське, Україна

**lavrinenko@ism.kiev.ua*

***v_solod@ukr.net*

Окислення або оксидні матеріали в зоні обробки кругами з НТМ як чинник впливу на показники процесу шліфування

Розглянуто застосування для процесів шліфування опосередкованих заходів, які стимулюють процеси окислення, а також використання в складі робочого шару кругів оксидів і матеріалів, схильних до окислення, оскільки пряме введення кисню в зону обробки, що є важливим чинником зміни триботехнічних характеристик контактних поверхонь, викликає певні труднощі.

Ключові слова: окислення, зона обробки, шліфування, круги з надтвердих матеріалів, оксиди, плазмовий вплив, плівки.

Кисень в процесах різання є важливим чинником зміни триботехнічних характеристик контактних поверхонь [1]. Оксидні шари, що виникають під дією кисню або його сполук на контактних поверхнях, у значній мірі знижують тертя. Чим вищою є хімічна активність металу до кисню, тим більший ефект зниження тертя спостерігають. Так, коефіцієнт тертя стружки по передній поверхні інструменту при різанні для ювенільних поверхонь має значення 0,8–6,0, а для окислених – 0,4–0,8 [1]. Примусовий обдув зони різання киснем знижує складові зусилля різання. Іншими варіантами введення кисню в зону обробки є застосування 0,5 %-ного розчину перекису водню в воді або іонізованого повітря [1].

Здавалося б, що процеси окислення треба застосовувати ширше. Але не все так просто. Так, в [2] для різальних композитів на основі cBN показано, що окислення вільних ділянок поверхні інструментів, які безпосередньо прилягають до контактних зон інструмент–оброблюваний матеріал, приводить до певного підвищення твердості та зниження міцності матеріалу їх поверхневого шару, а це обумовлює мікросколювання фрагментів інструментально-го матеріалу і, відтак, викликає прискорене зношування інструменту.

© В. І. ЛАВРІНЕНКО, В. Ю. СОЛОД, 2016

Авторами було проведено дослідження при точінні сталі 40X попередньо примусово окисленими пластинами з безвольфрамового твердого сплаву ТН20 після різного плазмового (теплого) впливу з врахуванням вмісту кисню в поверхневому шарі пластин після такого впливу (табл. 1).

Таблиця 1. Зв'язок між наявністю кисню на робочій поверхні пластин ТН20 після плазмового впливу і зносом пластин по задній поверхні при точінні сталі 40X (швидкість різання – 73,2 м/хв, подовжня подача – 0,11 мм/об., глибина різання – 0,5 мм)

Плазмовий вплив на поверхню пластини	Температурний діапазон плазмового впливу, °С	Кисень на поверхні пластини, % (за масою)	Знос пластини по задній поверхні, мм
Без впливу (вихідна)	–	8,07	0,125±0,025
Середній	800–900	20,50	0,200±0,050
Потужний	1300–1400	25,23	0,380±0,120

Виявлено, що, як і в [2], збільшена кількість кисню на поверхні різального інструменту корелює із збільшенням зносу пластин, тобто кисень знову ж таки при різанні і на безвольфрамових твердих сплавах викликає прискорене зношування інструменту.

В процесах абразивної обробки, при шліфуванні, часто застосовують водяні розчини технологічних середовищ (ТС), що приготовлені на основі солей лужних металів (розчини електролітів) [3]. Високі температури шліфування не виключають можливості одночасної присутності у зоні обробки як насичених сольових розчинів, так і оксидів лужних металів. Достатня кількість кисню повітря, водяного середовища та продуктів термічного розкладання елементів ТС сприяє швидкому окисленню поверхні металу. Так, наприклад, особливо інтенсивно окислюються залізвуглецеві сплави, у хімічному складі яких присутні ванадій та вольфрам. За інших рівних умов окремі елементи, що знаходяться у складі оброблюваного матеріалу, розташовані у певній послідовності за зростаючою спорідненістю до кисню: алюміній, титан, кремній, ванадій, марганець, вуглець та ін. Тому на оброблюваній поверхні залізвуглецевих сплавів окрім оксидів заліза можуть одночасно знаходитися і інші оксиди, кількість яких може виявитися значно більшою, ніж оксидів заліза [3].

Іншим варіантом ТС є тверді мастила, які застосовують у вигляді олівців або паст. При переривчастому точінні різцем з твердого сплаву Р20 сталі 45 є два можливі шляхи впливу твердих мастил на процеси, що відбуваються на передній поверхні інструменту: по-перше, вплив на силу тертя на передній поверхні, по-друге, вплив на взаємну дифузію матеріалів інструменту та стружки. При необхідності зниження сили різання найбільш ефективними є оксиди і сульфід. Так, MnS є ефективним при високих швидкостях різання, а MoS₂ – при низьких. Серед оксидів на зменшення зносу найбільш впливає PbO₂, хоча він діє також і на утворення термічних тріщин. SiO₂ також знижує інтенсивність зношування інструменту, але при дуже високих швидкостях обробки [4].

Тверді мастила є важливим фактором зміни фрикційних властивостей і для алмазно-абразивного інструменту. При цьому характеристики тертя матриці мають суттєве значення, оскільки існує певна небезпека схоплювання зв'язки с оброблюваним матеріалом, а це може призвести до виривання час-

тинок зв'язки, підвищення коефіцієнта тертя, зростання температури в зоні контакту та подальшого руйнування. На подолання тертя витрачається значна частина енергії в процесі обробки. Наприклад, при обробці пластмас різанням на тертя припадає до 60 % від усього тепловиділення [5]. Це може бути причиною підвищеного адгезійного зношування зерен. Зменшити знос алмазних зерен можна шляхом зміни складу плівок, що розділяють контактуючі тіла. Так, для мідно-олов'яних зв'язок є необхідним враховувати те, що у міді є певні особливості в зміні коефіцієнта тертя в залежності від температури. При цьому важлива роль фазового переходу між оксидами міді: при температурі початку фазового переходу Cu_2O в CuO спостерігали мінімум коефіцієнта тертя, а при температурі закінчення переходу зафіксували його максимум, що пояснюється зростанням впливу молекулярної та деформаційної складових коефіцієнта тертя [6].

Це можна підтвердити і дослідженнями авторів [7]. Так, встановлено, що зі зростанням навантаження у зоні фрикційного контакту, в межах вказаного вище діапазону, коефіцієнт тертя інструментальних матеріалів, що містять карбіди металів IVb- і Vb-підгрупи, по керамічним і 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. Вказані вище особливості можна пояснити наступним. Зі зростанням навантаження збільшується температура у зоні контакту і ініціюється виникнення оксидних плівок як на зв'язці, так і на інструментальному матеріалі. А це, в свою чергу, приводить до зниження коефіцієнта 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. Як приклад, покажемо, що для шліфування інструментальних матеріалів, що містять карбіди титану, недоцільно застосовувати круги на керамічних зв'язках, бо вони мають найбільші показники коефіцієнта тертя – 0,15–0,28. Слід відзначити, що металеві зв'язки на основі кобальту (0,12–0,34) та на основі Cu-Al-Zn (0,13–0,26) є також неприйнятними через зниження контактних навантажень в зоні обробки. В свою чергу, група зв'язок на полімерних (0,07–0,13) та металічних основах Cu-Sn-Sb (0,07–0,10) і Cu-Sn (0,05–0,11) вже є більш прийнятною для використання при обробці інструментальних матеріалів, що містять карбіди металів IVb- і Vb-підгрупи. Крім того, виявлено, що при фракційному контакті без застосування технологічних рідин коефіцієнт тертя значно зростає. Так, при ковзанні інструментальних матеріалів по металічним зв'язкам він підвищується у 1,3–1,9 рази на зв'язках з основою Cu-Al-Zn , у 2,4–4,7 рази – з основою Cu-Sn-Sb , а при ковзанні по полімерним зв'язкам – в 1,8–2,9 рази. Тобто, і у даному випадку висновки з викладеної вище “оксидної” гіпотези виправдовуються. Відомо [8], що домішки Sb зменшують здатність окислювання зв'язки, тому найбільше підвищення коефіцієнта тертя спостерігаємо на зв'язці з основою Cu-Sn-Sb .

Для шліфувального інструменту з надтвердих матеріалів (НТМ) логічним висновком з наведеного вище є те, що необхідна присутність кисню для створення оксидних плівок як на зернах НТМ, так і на поверхні зв'язки. Тут є декілька шляхів – тепловий, наприклад плазмовий, вплив на різальну поверхню круга, введення безпосередньо оксидів або оксидовмісних матеріалів до складу зв'язки.

Визначення кількісного елементного складу поверхонь виконували за допомогою растрового електронного мікроскопу Zeiss EVO 50XVP (“Carl

Zeiss”, Німеччина) з енергодисперсним аналізатором рентгенівських спектрів INCA Energy 450 (“Oxford Instruments”, Велика Британія). Дослідження стану робочої поверхні проводили з використанням оптичного стереоскопічного мікроскопу мод. XS-6220 (“Ningbo Shengheng Optics & Electronics Co.,Ltd.”, Китай) та спеціальної цифрової камери мод. DCM-500, яка була вмонтована в окуляр мікроскопа.

Відомо [9], що плазмова поверхнева обробка характеризується значним питомим тепловим потоком. У даній роботі розглядали вплив плазмового струменя на робочу поверхню низки шліфувальних кругів форми 12A2-45° 125×5×3×32 з характеристиками – КО 160/125–B2-08–100, КР 400/315–B2-08–125, АС6 125/100–M2-01–100, а також В₄С 125/100–M020-2–150. Це дозволило охопити як полімерні, так і металеві зв’язки, кубоніт (КО, КР), алмаз АС6 і подріблену кераміку В₄С як абразивні матеріали, різну відносну концентрацію НТМ у робочому шарі – 100, 125 і 150 %, а також різну зернистість – 125/100, 160/125 і 400/315. Плазмовій обробці піддавали робочий шар кругів при відповідних значеннях струму плазмового струменя та при різних швидкостях його руху, що дозволяло мати необхідний тепловий вплив: струм 150 і 200 А при швидкості обробки для кругів на полімерних зв’язках – 62,5–90 см/хв, для кругів на металевих зв’язках – 16–83,3 см/хв. Встановлено [10], що в усіх випадках при плазмовій обробці оксидне покриття виникає як на абразивних зернах, так і на зв’язках, що є характерним і для полімерних, і для металічних зв’язок.

Аналіз елементного складу плівок, що виникають на абразивних зернах та 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), в той час як на зв’язці його менше – від 16,9 до 25,0 % (за масою). В цілому за умов різного впливу кисень на зв’язці збільшується з 9–12 до 16,5–23,0 % (за масою) [10].

Наведені вище дослідження та висновки з них дозволяють зробити припущення, що плазмовий вплив на ріжучу поверхню круга внаслідок викладених вище ефектів – зміни елементного складу поверхні зв’язки та зерен і збільшеного вмісту кисню у плівках, що виникають на їх поверхні – може підвищити експлуатаційні показники шліфувальних кругів. Дослідження процесу шліфування алмазним кругом 12A2-45° 125×5×3×32 АС6 125/100–M2-01–100 твердого сплаву ВК6 з охолодженням у вихідному стані і після плазмового впливу на ріжучу поверхню круга проводили на дослідницькому стенді, створеному на базі модернізованого універсально-заточувального верстату мод. ЗВ642. Виявлено, що попередній плазмовий вплив невеликої потужності дозволяє у порівнянні з механічним абразивним впливом підвищити зносостійкість круга в 1,4 рази, а також після плазмового впливу відбувається більш “м’яке” різання кругом. У певній мірі, на думку авторів, це пов’язане з утворенням плівок на поверхні круга, на що вже звертали увагу вище. Для перевірки цього припущення було додатково вирізано невеликі сегменти круга 12A2-45° 125×5×3×32 АС6 125/100–M2-01–100 після плазмового впливу і шліфування. Алмазні зерна після плазмового впливу мають певне окислення поверхні (вміст кисню на зернах – 2,90–5,32 % (за масою)). Цікавим є те, що на поверхні алмазних зерен фіксується при цьому 0,50–1,16 % (за масою) міді. Таким чином, на зерні існує плівка оксиду міді. Разом з тим присутні оксидні плівки і на алмазних зернах на зчосах, де кисню значно більше – від 16 до 26 % (за масою), також багато міді та вольфраму (перенос на зерна в процесі тертя). На зв’язці кисню значно більше – від 9,1 до 20,9 % (за масою),

тому ймовірна наявність на поверхні зв'язки Cu_2O , який характеризується малим коефіцієнтом тертя і дозволяє досягти вказаного вище “м'якого” різання кругом.

Розглянемо інший варіант – введення оксидів у зв'язку. Як показано авторами раніше [11], захист зв'язки від негативної дії шламу можна зробити за рахунок його модифікування так званими “опорними елементами”, основною функцією яких і повинно бути посилення цієї слабкої ланки робочої поверхні круга. Фактично це є розробкою абразивного інструменту з дискретним ріжучим шаром, у якому вирізняються ріжучі зерна з НТМ і функціональні зернисті включення (“опорні елементи”), які для різних умов обробки можуть виконувати відповідну функцію, наприклад зниження тертя. Так, автори [12] вводили в структуру шліфувального круга, разом з абразивними зернами і керамічною зв'язкою, кисеньвмісні електрокорундові (Al_2O_3) сферичні частинки. В [13] як опорний елемент використовували зерна з білого плавленого глинозему та склоподібної зв'язки.

Разом з тим, в Україні є природна мінеральна сировина – кисеньвмісні мінеральні зернисті концентрати, у тому числі з вмістом Al_2O_3 , які можна використати як опорні елементи. До них відносяться титано-цирконові мінерали – продукти переробки титано-цирконової руди на Вольногорському гірсько-металургійному комбінаті Дніпропетровської області України, а саме: рутиловий (TiO_2), ставролітовий ($\text{Fe}_2\text{Al}_9[\text{SiO}_4]\text{O}_7(\text{OH})$), ільменітовий ($\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{TiO}_2$), цирконовий ($\text{Zr}[\text{SiO}_4]$) та дистен-силіманітовий ($\text{Al}_2[\text{SiO}_4]\text{O}$) концентрати [14].

Для перевірки викладених вище припущень було виготовлено алмазні круги форм 12A2-45° 125×5×3×32 AC6 125/100 B2-08 із заміною 25 % алмазів на вказані вище зернисті концентрати і проведено їх випробування при шліфуванні твердого сплаву Т15К6 без охолодження з продуктивністю 500 $\text{мм}^3/\text{хв}$. Результати досліджень по зносостійкості алмазних кругів із кисеньвмісними концентратами наведено на рис. 1.

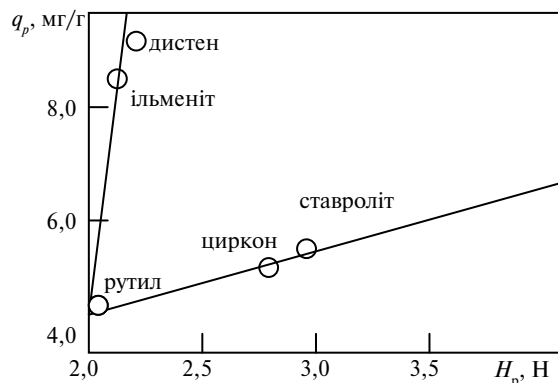


Рис. 1. Зміна зносостійкості шліфувальних кругів при введенні в робочий шар кисеньвмісних зернистих концентратів різного руйнівного навантаження H_p .

Аналіз даних рис. 1 свідчить, що можна виділити окремі групи таких концентратів. При цьому рутил є своєрідною точкою відліку і має найбільш позитивний вплив на зносостійкість кругів. Введення маломісних концентратів (ільменіта та дистена) достатньо різко знижує зносостійкість кругів, в той час як введення іншої групи концентратів (циркона та ставроліта) підвищує зносостійкість (але найкращим є рутил).

Для пояснення особливостей такого поділу (оскільки використовували достатньо широкий діапазон складу зернистих концентратів з переважним вмістом оксидів титана, алюмінію, заліза, кремнію) досліджували процеси електризації при шліфуванні кругами з застосуванням таких матеріалів через оцінку залишкової напруженості продуктів обробки (шламу) за методикою [15, 16]. Дослідження проводили при шліфуванні твердого сплаву Т15К6 без охолодження з застосуванням вказаних вище шліфувальних кругів. Виміри напруженості електричного поля проводили за допомогою вимірювача параметрів електростатичного поля ИПЭП-1 (Білорусь).

Результати дослідження наведено на рис. 2, аналіз якого свідчить, що характер зміни залишкової напруженості продуктів обробки сплаву Т15К6 корелює зі зміною зносостійкості шліфувальних кругів на рис. 1, тобто, спостерігається певний зв'язок між зносостійкістю круга та напруженістю шламу і, фактично, більшій зносостійкості відповідає менша електростатична напруженість. Як бачимо, аналіз фізичних характеристик, даних по зносостійкості (див. рис. 1) і напруженості (див. рис. 2) свідчить про те, що при заміні частини алмазів у робочому шарі шліфувальних кругів опорними елементами необхідно використовувати виключно оксидний концентрат – рутил TiO_2 .

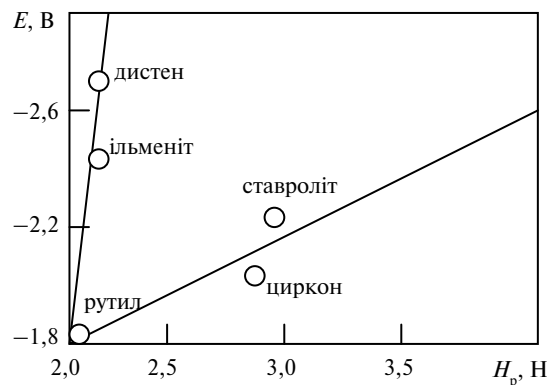


Рис. 2. Зміна залишкової напруженості продуктів обробки сплаву Т15К6 при застосуванні в робочому шарі кругів різних кисеньвмісних зернистих концентратів різного руйнівного навантаження H_p .

Для перевірки даного висновку було проведено оціночні дослідження залишкової напруженості продуктів обробки сплаву Т15К6 при шліфуванні з різною продуктивністю алмазними кругами 12А2-45° 125×5×3×32 з робочими шарами АС6 125/100-В2-08-100 та АС6 125/100-75 + рутил-25-В2-08 (табл. 2). Аналіз даних табл. 2 свідчить, що з підвищенням продуктивності обробки залишкова напруженість шламу очікувано зростає, але при цьому, в усіх випадках, наявність оксидного концентрату (рутилу) у робочому шарі приводить до зниження цієї напруженості, а відтак знос кругів з їх включенням буде нижчим, ніж чисто алмазних. Для додаткової перевірки даного висновку було досліджено зносостійкість вказаних кругів при шліфуванні сплаву Т15К6 з продуктивністю 500 $mm^3/хв$ (поперечна подача 0,1 мм/пдв. хід) без охолодження. Експерименти засвідчили, що відносні витрати алмазів в алмазному шарі без домішок склали для таких умов 8,37 мг/г, а для шару з вмістом оксидного концентрату (рутилу) – 6,89 мг/г, що підтверджує висновки з табл. 2.

Таблиця 2. Залишкова напруженість продуктів обробки сплаву Т15К6 при шліфуванні з різною продуктивністю

Продуктивність шліфування, мм ³ /хв	Залишкова напруженість шламу, кВ/м, після шліфування кругами	
	АС6 125/100–100–В2-08	АС6 125/100–75 + рутит–25–В2-08
100	–0,6	–0,2
200	–1,1	–0,9
300	–1,4	–1,3
400	–1,9	–1,6
500	–2,1	–1,8

На закінчення викладеного вище та своєрідного підтвердження “оксидної гіпотези” порівнюємо працездатність в робочого шару шліфувальних кругів інструментально-абразивних матеріалів, за основу яких відбирали інструментальні кераміки: оксидну – VO13 (система Al₂O₃), оксидно-карбідну – ВOK71 (система Al₂O₃ + TiC), нитридну – селеніт (система Si₃N₄). Інструментально-абразивні матеріали отримували у процесі подрібнення спечених різальних пластин із вказаних керамік, що вже були у використанні, до необхідної зернистості. Така технологія досить відома, наприклад, для отримання абразивного матеріалу гексаніт-А. Зацікавленість у таких дослідженнях ще полягає у тому, що шлам кераміки є досить активним абразивним матеріалом, що значно зношує зв’язку алмазних кругів, якими цю кераміку обробляють. Тому виявлення принципів особливостей такого абразивного шламу може допомогти у пошуку шляхів підвищення зносостійкості кругів [16, 17].

Для проведення випробувань було виготовлено шліфувальні круги форми 12А2-45° 125×5×3×32 із зернистістю абразивного матеріалу 125/100 100 %-ної концентрації на полімерній зв’язці В2-08. Порівняння зносостійкості шліфувальних кругів з різної подрібленої кераміки, а також алмазу АС6 і кубоніту КР провадили при обробці зразків з полімерної зв’язки Б8 та сірого чавуну (рис. 3) при продуктивності обробки в 100 мм³/хв. При однаковій продуктивності чим менші відносні витрати абразиву в кругах, тим більш ефективним буде абразивний матеріал. Виявлено, що з підвищенням твердості таких абразивних матеріалів при обробці як чавуну, так і полімерного матеріалу, знос круга зростає. Причому встановлено, що для вказаних умов найбільш ефективними є саме оксидні матеріали.

Таким чином, для підвищення ефективності процесів шліфування необхідно наступне:

Зв’язка робочого шару круга повинна містити у своєму складі матеріали, що досить активно окислюються, і необхідно створювати умови для їх окислення у процесі обробки. Разом з тим необхідно уточнити у подальших дослідженнях обмеження, які можуть бути при такому окисленні.

Плазмовий вплив на робочу поверхню круга має бути таким, щоб утворювалися оксидні плівки на зв’язці та на зернах НТМ.

У якості опорних елементів у робочому шарі круга можна ефективно застосовувати оксидні зернисті мінеральні концентрати, насамперед оксидні рутитові концентрати.

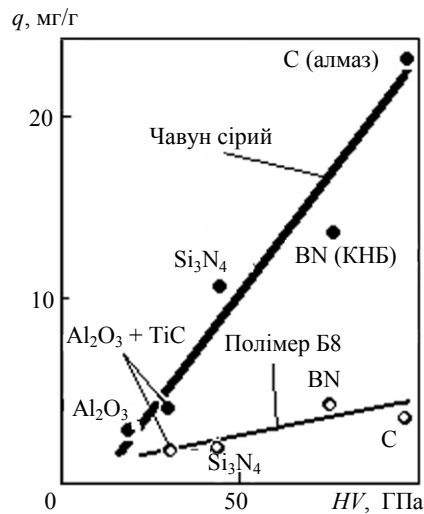


Рис. 3. Вплив твердості абразивних матеріалів на показник зносостійкості кругів при шліфуванні сірого чавуну і полімерної зв'язки Б8 [17].

При обробці полімерних матеріалів і чавунів можна в кругах ефективно застосовувати абразивні матеріали у вигляді різної подрібленої оксидної інструментальної кераміки.

Рассмотрено применение для процессов шлифования опосредованных мер, стимулирующих процессы окисления, а также использование в составе рабочего слоя кругов оксидов и материалов, склонных к окислению, поскольку прямое введение кислорода в зону обработки, что является важным фактором изменения триботехнических характеристик контактных поверхностей, вызывает определенные трудности.

Ключевые слова: окисление, зона обработки, шлифование, круги из сверхтвердых материалов, оксиды, плазменное воздействие, пленки.

Consider applying for the processes of grinding indirect measures to stimulate the oxidation and application in the working layer discs oxide materials prone to oxidation as the direct introduction of oxygen into the processing zone, which is an important factor in changing tribotechnical characteristics of contact surfaces, causing difficulties.

Keywords: oxidation, zone processing, grinding, wheels of superhard materials, oxides, plasma effects, films.

1. 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.
2. Клименко С. А., Манохин А. С., Копейкина М. Ю. Состояние поверхностного слоя инструментов с ПСТМ на основе cBN при точении закаленной стали // Резание и инструмент в технологических системах. – 2015. – Вып. 85. – С. 119–125.
3. 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.
4. Kunio Uehara, Shinji Kumagai, Mitsuru Sakurai, Hideo Takeshita. Effect of solid lubrications in high speed intermittent metal cutting // Proc. Int. Conf. Prod. Eng., Tokyo, 1974, Part I. – Tokyo: J. Soc. Prec. Eng. 1974. – P. 566–571.
5. Дрожжин В. И. Эффективность обработки пластмасс и закономерности физических явлений процесса их резания // Резание и инструмент в технологических системах. – 1996. – Вып. 50. – С. 47–51.

6. Амосов М. И., Золотарев Г. Б. Влияние процесса окисления на коэффициент трения меди // Изв. ВУЗов. Машиностроение. – 1974. – № 10. – С. 32–35.
7. Шепелев А. А., Лавриненко В. И., Солод В. Ю. Особенности фрикционного контакта связок кругов из СТМ и обрабатываемых материалов // Сверхтв. материалы. – 1995. – № 5. – С. 26–29.
8. Фадеев Г. Н. Пятая вертикаль: элементы V группы периодической системы Менделеева. – М.: Просвещение, 1985. – 191 с.
9. Лецинский Л. К., Самотугин С. С. Слоистые наплавленные и упрочненные композиции. – Мариуполь: ООО “Типография Новый Мир”, 2005. – 392 с.
10. Лавріненко В. І., Скрябін В. О., Ситник Б. В. та ін. Дослідження впливу плазмової обробки на різальну поверхню шліфувальних кругів з надтвердих матеріалів // Сверхтв. материалы. – 2010. – № 5. – С. 81–87.
11. Лавріненко В. І., Солод В. Ю., Ситник Б. В., Нікітін Ю. І. Застосування опорних елементів в структурі робочого шару кругів з НТМ для підвищення їх експлуатаційних показників // Там же. – 2011. – № 1. – С. 72–79.
12. А. с. 1073082 СССР. Шлифовальный круг / И. П. Третьяков, В. Н. Тимофеев, Б. П. Кудряшов, В. Т. Ивашинников. – Оpubл. 1984, Бюл. № 6.
13. Pat. 4385907 USA, IC B 24 D 3/18. Resinoid bonded grinding wheel with support member made of a heat insulating material / T. Tomita, I. Suzuki, T. Imai, M. Kitajima. – Publ. 31.05.83.
14. Лавриненко В. И., Солод В. Ю., Ситник Б. В. и др. Исследование возможностей эффективного использования минеральных зернистых концентратов в качестве опорных элементов в рабочем слое алмазных кругов // Сверхтв. материалы. – 2012. – № 1. – С. 75–83.
15. Лавріненко В. І., Скрябін В. О., Девицький О. А. та ін. Методичні рекомендації по процесам абразивної обробки кругами з НТМ з додатковим електрофізичним впливом на контактні поверхні – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2011. – 36 с.
16. Лавриненко В. И., Девицкий А. А., Пасичный О. О., Кухаренко С. А. Термоэлектрические явления в процессах обработки и исследование их функционирования при шлифовании кругами из СТМ // Сверхтв. материалы. – 2015. – № 4. – С. 63–75.
17. Лавріненко В. І., Новіков М. В. Надтверді абразивні матеріали в механообробці: Енциклопед. дов. / Під заг. ред. акад. М. В. Новікова. – К.: ІНМ ім. В. М. Бакуля НАНУ, 2013. – 452 с.

Поступила 24.03.16