

**В.І. Лавріненко, д.т.н.**  
**Г.Д. Ільницька, к.т.н.**  
**О.А. Дєвицький, к.т.н.**  
**В.В. Смоквина, к.т.н.**  
**О.О. Пасічний, к.т.н.**  
**І.М. Зайцева, м.н.с.**  
**О.В. Іщенко, д.х.н.**  
**С.В. Гайдай, к.х.н.**

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

*Київський національний університет ім. Тараса Шевченка МОН України*

## **ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АЛМАЗНИХ ЗЕРЕН ІЗ МЕТАЛІЗОВАНИМ ПОКРИТТЯМ НА ЗНОСОСТІЙКІСТЬ ШЛІФУВАЛЬНИХ КРУГІВ**

*Наведено результати дослідження впливу фізико-механічних характеристик алмазних зерен марки АС6 з металізованим покриттям на зносостійкість шліфувального інструменту. Представлено результати термогравіметричного аналізу алмазних зерен з металізованим покриттям нікелем та міддю. Встановлено, що металізація алмазних зерен сприяє збільшенню питомої площі їх поверхні, підвищує стійкість до окислення та електропровідність. Визначено, що покриття алмазних зерен металами сприяє покращенню їх фізико-механічних властивостей. Зокрема, металізація зерен міддю підвищує їх міцність більше ніж на 50 %, порівняно з міцністю вихідного порошку. За результатами проведених досліджень, застосування покриттів металами різальних зерен, внесених до робочого шару шліфувального інструменту, дозволяє підвищити зносостійкість алмазних кругів до 3-х разів, порівняно зі шліфуванням стандартним алмазним кругом, та отримати більш якісну оброблену поверхню деталі. Покриття алмазних зерен не лише підвищують їх фізико-механічні властивості, але й змінюють характер контакту інструмента з оброблюваною деталлю. Визначено, що найбільш ефективним є покриття зерен міддю, що варто пов'язати з підвищенням міцності зерен, а також високими електро- та теплопровідністю даного покриття.*

**Ключові слова:** металізація поверхонь порошків алмазу; термогравіметричний аналіз; фізико-механічні характеристики алмазних зерен; шліфувальний інструмент; відносні витрати алмазних зерен; електричні явища, що супроводжують шліфування.

**Постановка проблеми.** У машинобудуванні широко застосовуються інструменти з синтетичного алмазу при обробленні деталей із твердого сплаву, кераміки, скла та інших важкооброблюваних матеріалів. Продуктивність і якість оброблення значною мірою залежать від рівня властивостей різальних елементів і можливості їх інтенсивної експлуатації. Для досягнення високих показників процесу оброблення важливо застосовувати інструмент зі зміненими характеристиками робочого шару, що сприятиме підвищенню зносостійкості шліфувальних кругів. Одним зі шляхів підвищення ефективності шліфування є застосування покриттів різальних зерен, що дозволить не лише змінити умови фрикційного контакту робочого шару круга та оброблюваного матеріалу, а й підвищити зносостійкість алмазно-абразивного інструменту.

**Аналіз попередніх досліджень і публікацій.** Покриття порошків з надтвердих матеріалів (НТМ) різняться за методом їх нанесення, а також специфікою застосування для шліфувального інструмента при обробленні різномірних матеріалів [1]. В Інституті надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України (ІНМ НАН України) розроблено ряд технологій, що дозволяють наносити покриття на шліф-, субмікро-, мікро- та нанопорошки різноманітних марок та зернистостей на основі таких елементів, як: Ni, Cu, Co-Ni, Ni-W, Ti, Ti-Cr, Ti-W, Cr, W та ін. Існує також можливість застосування покриттів з внесенням наповнювачів до їх складу [2].

Попередніми дослідженнями встановлено, що однією з причин підвищення алмазоутримання зерен із металізованим покриттям є, по-перше, гранична хімічна взаємодія з елементами покриття при високотемпературному виготовленні інструментів на металевих зв'язуючих, по-друге, дифузійна взаємодія між покриттями зерен і зв'язуючим. Результатом такої взаємодії на поверхні алмазу утворюється легована зона з підвищеними фізико-механічними властивостями. В інструменті на полімерних та металополімерних зв'язках хімічна взаємодія відбувається на межі «металізоване покриття-полімер». В такому випадку, чим більш розвинена поверхня покриття, тим ефективніша взаємодія [3].

Варто зауважити, що в процесі шліфування виникають електричні явища, які напряму пов'язані з процесом алмазно-абразивного оброблення і безпосередньо впливають на його експлуатаційні характеристики [4, 5]. Як показали попередні дослідження, електричні явища, що спостерігаються в зоні шліфування, безпосередньо корелюють із відносними витратами зерен НТМ в інструменті [6, 7], що дозволяє застосовувати їх значення як критерію, за величиною якого можна оцінювати зносостійкість шліфувальних кругів [8, 9]. А це, в свою чергу, дозволить оцінювати ефективність застосування інструменту з наперед зміненими характеристиками робочого шару, в тому числі із застосуванням металізованого покриття алмазних зерен.

**Метою** даної роботи є дослідження фізико-хімічних властивостей та фізико-механічних характеристик металізованих алмазних зерен марки АС6, а також зносостійкості шліфувальних кругів з їх застосуванням.

**Методика досліджень.** Досліджували порошки синтетичного алмазу марки АС6 зернистістю 125/100, які методом хімічного відновлення були металізовані нікелем (25 мас. %) та міддю (38 мас. %) відповідно.

Термоокислення металізованих алмазів проводили на мас-спектрометрі МИ 1201. У процесі окислення зразків (та/або десорбції з його поверхні) змінюється маса і, відповідно, реєструється термограма – температурна залежність маси зразка (ТГ-крива). Диференціюванням кривої ТГ одержується крива ДТГ, що відповідає температурній залежності швидкості втрати маси і має піки, що відповідають десорбції та розкладу зразка по стадіях. Дослідження проводилось в режимі лінійного нагрівання за температур від 25 до 1000 °С на повітрі. Швидкість нагрівання становила 10 К/хв.

Вимірювання електрофізичних характеристик металізованих алмазів, а саме питомого електроопору, виконували за розробленою в ІНМ НАН України методикою [10].

Вимірювання статичної (механічної) міцності алмазів із металізованим покриттям проводили за методикою згідно з ДСТУ 3292–95.

Для оцінки зносостійкості кругів із застосуванням в робочому шарі металізованих алмазів виготовлено серію шліфувальних кругів типорозміру 12А2-45° 125х5х3х32 на полімерному зв'язуючому В2-08.

Дослідження процесу шліфування твердого сплаву марки ВК6 кругами із металізованими алмазними зернами в робочому шарі проводили на стенді, створеному на базі модернізованого універсально-заточувального верстата моделі 3В642.

У процесі дослідження визначали відносні витрати алмазних зерен –  $q_p$ , мг/г, відповідно до ГОСТ 16181-82.

Шорсткість оброблюваних поверхонь вимірювалася за допомогою профілометра-профілографа моделі SurfTest SJ-201 фірми Mitutoyo (Японія).

Для оцінки електризації в процесі шліфування вимірювалася величина напруженості електростатичного поля (Е, кВ/м) продуктів шліфування (шламу), який містить мікрочастинки оброблюваного матеріалу та робочого шару алмазного інструменту. Вимірювання значень напруженості електростатичного поля шламу здійснювалося вимірювачем параметрів електростатичного поля ИПЭП-1.

**Результати досліджень.** Сформовані зразки алмазних зерен досліджувалися за методом термогравіметрії. На рисунках 1–3 наведено термограми цих зразків.

Для зразка АС 6 (рис. 1), згідно з кривою ДТГ, стрибки зміни швидкості втрати маси зафіксовано при температурі 900 °С, що відповідає горінню алмазного ядра. На кривій ТГ спостерігається невеликий максимум, що пояснюється відщепленням гідроксильних груп та фізично адсорбованих форм води і відповідає екзотермічному ефекту на кривій ДТА. За температур вищих за 930 °С починається інтенсивна втрата маси зразка за рахунок горіння вуглецю (крива ТГ). Загальна втрата маси складає 8 мг від 100 мг наважки (8 %).

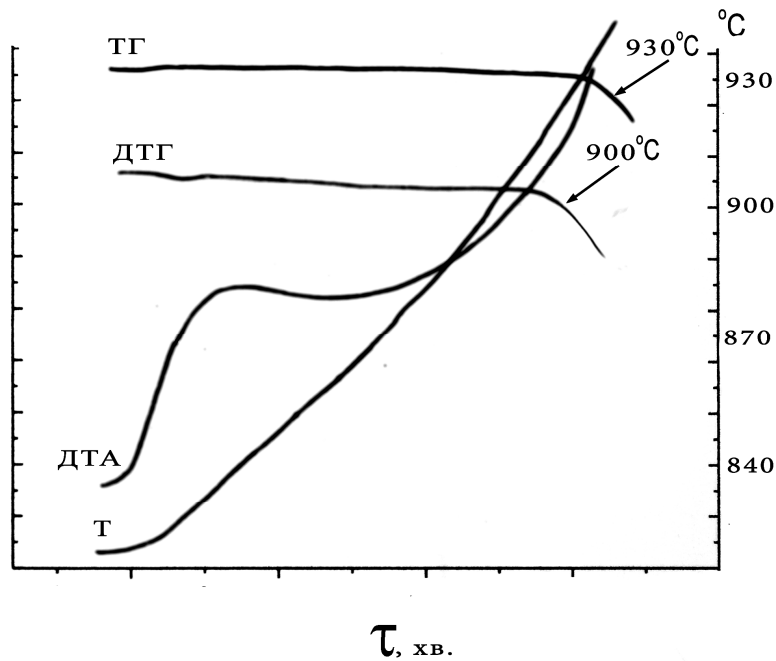


Рис. 1. Дані термогравіметричного аналізу для вихідного зразка алмазу марки АС 6

Для зразка з покриттям нікелем (рис. 2) спостерігаються значні стрибки ТГ та ДТГ за температур 960 та 920 °С відповідно, що відповідає горінню алмазу. Крім того, на початку кривої ДТА (до 100 °С) спостерігається характерний стрибок – виділення гідроксильних груп та фізично адсорбованої форми води. Загальна втрата маси при цьому складає 7 мг.

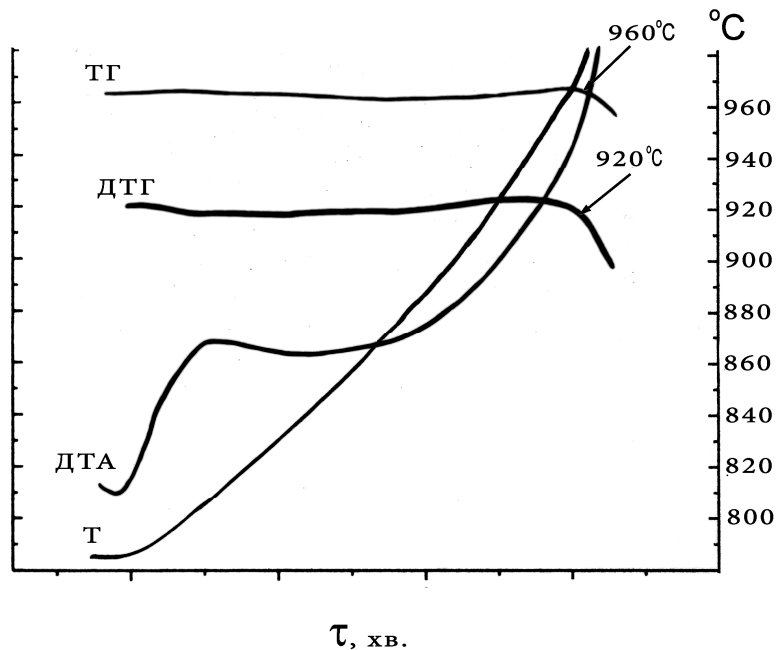


Рис. 2. Дані термогравіметричного аналізу для зразка алмазу з покриттям нікелем

З результатів аналізу зразка з покриттям міддю (рис. 3) видно, що крива ТГ після 920 °С починає зростати, досягнувши піку при 930 °С, а далі різко йде на спад. Причому, загальна втрата маси при 930 °С складає 7 мг, а після 930 °С – 12 мг (від 100 мг наважки). Паралельно цьому процесу на кривій ДТГ різкий стрибок зафіксовано при 850 °С, що пов'язано з горінням алмазу. Крім того, на початку кривої ДТА (до 100 °С) спостерігається, аналогічний до зразків з покриттям нікелем, стрибок – виділення гідроксильних груп та фізично адсорбованої форми води.

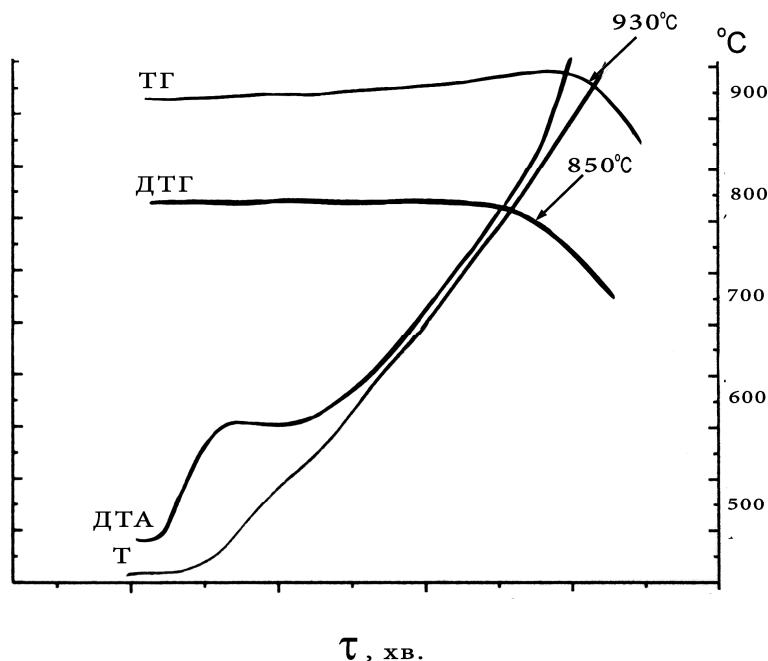


Рис. 3. Дані термогравіметричного аналізу для зразка алмазу з покриттям міддю

Дані термогравіметричного аналізу свідчать, що всі представлені зразки є досить стійкими за температур нагрівання до 1000 °С і характеризуються досить незначною втратою маси. Втрата маси пов'язана як з термоокисленням алмазних зерен за температури вище 500 °С, так і з графітизацією алмазу при більш високих температурах (~930 °С). Лише для зразка синтетичного алмазу без застосування покриття спостерігається невеликий, але чіткий стрибок на кривих ТГ і ДТГ, що говорить про наявність ОН-груп на поверхні цього зразка. Для решти зразків явних піків на кривих ТГ і ДТГ, які могли б свідчити про наявність тих чи інших груп, що входять до складу зразків і схильність їх до руйнування за тих чи інших температурах, не виявлено.

Порівняльні результати вимірювання статичної (механічної) міцності алмазних зерен без покриття та з металізованим покриттям нікелем та алюмінієм наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Статична (механічна) міцність алмазних зерен без покриття та з металізованим покриттям

Зразок	Статична (механічна) міцність – Р, Н
АС6 125/100	7,82
АС6 125/100 (Ni)	8,56
АС6 125/100 (Cu)	12,26

Як видно з таблиці 1, міцність металізованих порошків вища, ніж вихідних. Металізація алмазних зерен міддю сприяє підвищенню їх міцності більше ніж на 50 %, порівняно з міцністю вихідного порошку.

Дослідження електрофізичних характеристик зразків за показником питомого електроопору ( $\rho$ ) показали, що для вихідного порошку без покриття його значення становить  $5,5 \cdot 10^{10}$  Ом·м. Металізація порошків нікелем та міддю дозволяє отримати електропровідні зерна з питомим електричним опором  $1 \cdot 10^{-5}$  і  $1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м відповідно.

Для оцінки ефективності застосування алмазів з металізованим покриттям в робочому шарі шліфувального інструменту проведено оброблення твердого сплаву марки ВК8 на продуктивності шліфування  $Q = 400$  мм<sup>3</sup>/хв. Результати досліджень представлено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати досліджень з шліфування (без охолодження) твердого сплаву ВК8 кругами без покриття та з металізованим покриттям алмазних зерен

Шліфувальний інструмент	Напруженість електростатичного поля, $E$ , кВ/м	Відносні витрати алмазних зерен, $q_p$ , мг/г	Шорсткість обробленої поверхні, $R_a$ , мкм
12A2–45° 125x5x3x32 AC6 125/100–B2-08–100	-1,9	18,27	0,47
12A2–45° 125x5x3x32 AC6 125/100 (Ni)–B2-08–100	-1,7	8,48	0,42
12A2–45° 125x5x3x32 AC6 125/100 (Cu)–B2-08–100	-1,4	5,97	0,44

За результатами проведених досліджень, застосування покриттів металами різальних зерен, внесених до робочого шару шліфувального інструменту, дозволяє підвищити зносостійкість алмазних кругів до 3-х разів, порівняно зі шліфуванням стандартним алмазним кругом. Це можна пояснити, зокрема, вищою міцністю металізованих алмазних зерен. Крім того, як свідчать результати досліджень, застосування кругів з металізованим покриттям алмазних зерен дозволяє отримати більш якісну оброблену поверхню деталі.

Для встановлення особливостей контактних процесів в зоні шліфування вимірювачем параметрів електростатичного поля ИПЭП-1 додатково визначалась напруженість електростатичного поля шламу. При шліфуванні кругами з металізованим покриттям алмазних зерен значення напруженості електростатичного поля нижче за значення, що зафіксоване після оброблення алмазним кругом без покриття зерен. Це пояснюється досить низьким електроопором металізованих зерен. У цьому випадку заряди рівномірно розподіляються по всій поверхні круга, що, певною мірою, нівелює їх локальне накопичення та сприяє підвищенню зносостійкості шліфувального інструменту.

Взагалі, згідно з наведеними вище результатами, найбільш ефективним є покриття зерен міддю, що варто пов'язати з вищою міцністю зерен, а також високими електро- та теплопровідністю даного покриття.

#### Загальні висновки:

1. Визначено, що покриття алмазних зерен металами сприяє покращенню їх фізико-механічних властивостей. Зокрема, металізація зерен міддю підвищує їх міцність більше ніж на 50 %, порівняно з міцністю вихідного порошку.

2. Показано, що для вихідного порошку без покриття значення питомого електроопору становить  $5,5 \cdot 10^{10}$  Ом·м. Металізація порошоків нікелем та міддю дозволяє отримати електропровідні зерна з питомим електричним опором  $1 \cdot 10^{-5}$  і  $1 \cdot 10^{-6}$  Ом·м відповідно.

3. Застосування покриттів металами різальних зерен, внесених до робочого шару шліфувального інструменту, дозволяє підвищити зносостійкість алмазних кругів до 3-х разів, порівняно зі шліфуванням стандартним алмазним кругом, та отримати більш якісну оброблену поверхню деталі.

4. Найбільш ефективним є покриття зерен міддю, що варто пов'язати з підвищенням міцності зерен, а також високими електро- та теплопровідністю даного покриття.

Отже, застосування покриттів зерен НТМ дозволяє підвищити їх фізико-механічні властивості та змінити характер контакту інструмента з оброблюваною деталлю, а отже правильний вибір покриття алмазних зерен дозволить підвищити зносостійкість шліфувальних кругів, що дуже важливо при реалізації оброблення на високих продуктивностях. Низькі значення питомого електричного опору наведених металізованих покриттів алмазних зерен можуть позначитись на застосуванні їх в інструменті на металевому зв'язуючому в процесах електрошліфування, оскільки це дасть змогу змінити загальний електроопір шліфувального круга і, як наслідок, керувати потужністю розрядів у міжелектродному проміжку.

#### Список використаної літератури:

1. Дуда Т.М. Эффективные покрытия для порошков алмаза и КНБ, их структурные особенности и области промышленного применения / Т.М. Дуда // Синтез, спекание и свойства сверхтвердых материалов. – К. : ИСМ НАН Украины, 2005. – С. 86–95.
2. Некоторые особенности получения и физико-механические свойства алмазных порошков, металлизированных композиционными химическими покрытиями с включением УДА / Т.М. Дуда, Ю.И. Никитин, В.Г. Полторацкий и др. // Сверхтв. материалы. – 2000. - № 5. – С. 88–94.

3. Дуда Т.М. Взаимодействие на границах контакта алмаз–покрытие–связка / Т.М. Дуда // Сверхтв. материалы. – 1986. - № 5. – С. 30–33.
4. Лавріненко В.І. Електричні явища в процесах механічної обробки, їх взаємозв'язок із продуктивністю та енергоємністю оброблювання та способи ефективного застосування цих явищ / В.І. Лавріненко, О.А. Девицький, Б.В. Ситник // Прогресивні технології і системи машинобудування : міжнар. зб. наук. праць. – Донецьк : ДонНТУ, 2009. – Вип. 38. – С. 122–126.
5. Лавріненко В.І. Вплив характеристик робочого шару кругів з надтвердих матеріалів на термоЕРС при шліфуванні / В.І. Лавріненко, О.А. Девицький, О.О. Пасичний // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2011. – Вип. 3 (58). – С. 67–71.
6. Выбор характеристик рабочего слоя абразивного инструмента из сверхтвердых материалов с учетом электрических явлений, сопровождающих процесс шлифования / В.И. Лавриненко, А.А. Девицкий, О.О. Пасичный и др. // Инструментальный світ. – 2013. – № 3–4 (59–60). – С. 17–22.
7. Дослідження впливу електризації на процес шліфування кругами з введенням компактів мікропорошків НТМ до робочого шару / В.І. Лавріненко, О.А. Девицький, Б.В. Ситник та ін. // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Вип. 9. – Харків : НТУ «ХП», 2014. – С. 83–89.
8. Патент на корисну модель № 83782, Україна, МПК (2013.01) В23В 25/00. Спосіб оцінювання зносостійкості шліфувального інструмента з надтвердих матеріалів із введенням функціональних домішок у робочий шар інструмента / В.І. Лавріненко, О.А. Девицький, Б.В. Ситник, С.А. Кухаренко ; заявл. 19.04.13 ; опубл. 25.09.13, Бюл. № 18.
9. Девицький О.А. Оцінювання впливу функціональних домішок у робочому шарі шліфувального інструмента з НТМ на його зносостійкість / О.А. Девицький // Міжнар. науково-тех. конф. «Машинобудування – очима молодих». – Кременчук : Вид-во КрНУ ім. М. Остроградського, 2013. – С. 146–148.
10. М 23.9 – 303:2014 Методика определения удельного электрического сопротивления дисперсных порошков сверхтвердых материалов. – ИСМ НАН Украины, 2014. – 6 с.

ЛАВРІНЕНКО Валерій Іванович – доктор технічних наук, професор, завідувач відділу, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

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

Тел.: (044) 432–95–15.

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

ІЛЬНИЦЬКА Галина Дмитрівна – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, в.о. завідувача лабораторії, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- дисперсні порошки та методи їх отримання;
- композиційні матеріали;
- морфометричні характеристики зерен надтвердих матеріалів;
- властивості робочого шару шліфувальних кругів.

Тел.: (044) 467–58–31.

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

ДЄВИЦЬКИЙ Олександр Анатолійович – кандидат технічних наук, науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- шліфування кругами з НТМ;
- інструменти з НТМ;
- властивості робочого шару кругів;
- контактні процеси в зоні шліфування.

Тел.: (044) 467–58–54.

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

СМОКВИНА Володимир Віталійович – кандидат технічних наук, в.о. Вченого секретаря, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- шліфування кругами з НТМ;

- інструменти з НТМ;
  - властивості робочого шару кругів.
- Тел.: (044) 467–66–42.  
E-mail: [yvsmokvyna@ukr.net](mailto:yvsmokvyna@ukr.net)

ПАСІЧНИЙ Олег Олегович – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

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

Тел.: (044) 432–95–15.

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

ЗАЙЦЕВА Ірина Миколаївна – молодший науковий співробітник, Інститут надтвердих матеріалів ім. В.М. Бакуля НАН України.

Наукові інтереси:

- дисперсні порошки та методи їх отримання;
- композиційні матеріали;
- морфометричні характеристики зерен надтвердих матеріалів;
- властивості робочого шару шліфувальних кругів.

Тел.: (044) 467–58–31.

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

ЩЕНКО Олена Вікторівна – доктор хімічних наук, професор, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Наукові інтереси:

- фізико-хімічні властивості каталізаторів;
- композиційні матеріали;
- метод термопрограмованої десорбції.

Тел.: (044) 239–33–16.

E-mail: [isch@voliacable.com](mailto:isch@voliacable.com)

ГАЙДАЙ Сніжана Вікторівна – кандидат хімічних наук, доцент, Київський національний університет імені Тараса Шевченка.

Наукові інтереси:

- фізико-хімічні властивості каталізаторів;
- композиційні матеріали;
- метод термопрограмованої десорбції.

Тел.: (044) 239–33–16.

E-mail: [gaidaisv@mail.ru](mailto:gaidaisv@mail.ru)

Стаття надійшла до редакції 06.08.2015