

4. Gi Heung Choi, & Gi Sang Choi. (1997) Experimental study on AE from precision diamond machining. *KSME Int. J. Vol. 11, 6*, 605–610.
5. Devin L. N. Stakhniv N. Ye., & Naydenko A. G. (2002) Primenenie metoda akusticheskoi emissii dlia otsenki rabotosposobnosti reztsov iz ATP pri tochenii aluminievyykh splavov [Application of the acoustic emission method for evaluating the operability of cutting tools made from ATP during turning of aluminum alloys] *Mezhdunar. nauch.-tekhn. Sb. issue 62.: Rezaniye i instrument v tekhnologicheskikh sistemakh – Cutting and Instrument in Technological Systems*. (pp. 44–47). Khar'kov: NTU “KHPI” [in Russian].
6. Devin L. N., Stakhniv N. Ye, & Sulima A. G. (2011) Avtomatizirovannaya sistema dlya izmereniya signala akusticheskoy emissii v protsesse pretsizionnogo almaznogo tocheniya [Automated system for measuring the acoustic emission signal in the process of precision diamond turning]. Proceedings from Modern problems of production and repair in industry and transport ‘11: *11 Mezhdunar. nauch.-tekhn. seminar (21–25 fevralia 2011 hoda) – XIInd scientific-techn. Seminar*. (pp. 79–81). Kiev: ATM Ukraine [in Russian].
7. Devin L. N., & Novikov N. V. (2008) Shirokopolosnye datchiki akusticheskoi emissii dlia diagnostiki sostoiianiia rezhushchikh instrumentov [Broadband acoustic emission sensors for diagnosing the state of cutting tools] *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchiy kontrol. – Technical diagnostics and non-destructive testing*, 4, 81–85 [in Russian].

УДК 620.3

**В. М. Ткач**, д-р фіз.-мат наук, **В. В. Садохін** канд. техн. наук,  
**Д. В. Соколюк**, **В. П. Садохін**, **М. В. Фефілятьєв**

*Інститут надтвердих матеріалів НАН України ім. В.М. Бакуля, вул. Автозаводська 2,  
04074, г. Київ, e-mail: savikor2015@gmail.com*

## **НАНОТЕХНОЛОГІЯ ОДНОСТАДІЙНОГО ЛОКАЛІЗОВАНОГО ІОННО-ПЛАЗМОВОГО ДИСПЕРГУВАННЯ В ВАКУУМІ**

*Узагальнені результати досліджень у зв'язку з зміною деяких властивостей електропровідних матеріалів одного хімічного складу, при їх іонно-плазмовому диспергуванні в вакуумі в рідну основу, від їх масиву, до нано рівня. Результативним науково-дослідницьким рішенням даної проблематики розглядається конструкторсько-технологічні розробки з моделювання принципово важливих спеціалізованих блоків з автоматизованим контролем та керуванням технологічним процесом. Комплектуючі модулі плазменної нанодиспергації, а також налаштування таких блоків і пристроїв повинні підкорятися програмним командам з персонального комп'ютера. Повторюваність фізико-хімічних властивостей дозволить провести сертифікацію та скоротити інноваційний шлях нових наноматеріалів від наукової розробки до його комерціалізації*

**Ключові слова:** нанотехнологія, локалізоване іонно-плазмове диспергування у вакуумі.

### **Вступ**

Нанотехнологію, визначають зараз як сукупність методів синтезу, зборки, структуроутворення, нанесення, видалення і модифікування матеріалів, включаючи систему знань, навичок та вміння, апаратурне, матеріалознавче, метрологічне, інформаційне

забезпечення процесів та технологічних операцій, направлених на створення матеріалів та систем з новими властивостями, що зумовлені проявом розмірних ефектів при наномасштабах. Дослідження наноструктур є в даний час одним з пріоритетних напрямків в науці. Серед перспективних методик отримання наночастинок металів посідає своє чільне місце метод, заснований на одностадійному вакуумному диспергуванні наночастинок електропровідних металів в потоці інертного газу в рідку фазу, який дозволяє отримувати наночастки з регульованим середнім розміром і з чистотою вихідного матеріалу.

### **Актуальність**

Науковий і практичний (бізнесовий) інтерес спрямований на пошук ефективних рішень в області сучасного матеріалознавства. Одним з таких рішень є модифікація матеріалів різними нанодобавками або створення наноструктур при синтезі матеріалу.

Нанооб'єкти можуть бути отримані безпосередньо при синтезі композиційного матеріалу, або окремо і потім введені при отриманні матеріалу в певній концентрації. Нанооб'єкти – дискретна частина матерії або, навпаки, її локальна відсутність (порожнечі, пора), розмір якої хоча б в одному вимірі знаходиться в нанодіапазоні (як правило, 1–100 нм) (див. ISO/TS80004-5-2014).

Подібні технології дозволяють значно покращувати характеристики матеріалів, створювати матеріали із заданими властивостями, проводити заміну металевих конструкцій на полімерні.

В Інституті надтвердих матеріалів ім. В. М. Бакуля НАН України розроблена технологія одностадійного іонно-плазмового диспергування (далі див.ТОСІД) і отримані агрегативно стабільні суспензії наночастинок електропровідних металів з керованими розподілом за розмірами та концентраціями в рідкій основі (гліцерин особливо чистий). Підкреслюємо – *досягнута технологічна можливість отримувати середній розмір наночастинок електропровідних матеріалів 10–30 нм, що принципово важливо в матеріалознавстві.*

Загальновідомо, що найбільш поширеними рідкими інгредієнтами в кінцевих промислових продуктах є гліцерин і передбачаючи необхідні додаткові споживчі властивості нового нанопродукту, досить імпантувати в нього наночастинки необхідного металу, в незначній масовій кількості і отримати сучасний матеріал серійного виготовлення без додаткового переобладнання виробництва [2, 3]. Процес реалізовується в нанореакторі неупинно і безступенево, що має перспективу його економічно доцільного впровадження в виробництво.

Результатами критичного аналізу літературних джерел визначено, що отримання агрегативно стабільних наносуспензій металів та їх колоїдних розчинів з керованими фізико-хімічними властивостями має найбільше науково-бізнесове значення і є магістральним шляхом розвитку наноматеріалознавства.

### **Проблематика**

Розмірна розмаїтність найбільшою мірою важлива саме для наноматеріалів, оскільки характеризується, як правило, великою часткою поверхневих атомів, які зумовлюють особливості фізико-хімічних властивостей. Більшість наноматеріалів є термодинамічно не рівноважними, тому не рівноважна (відмінна від форми монокристала даної речовини) морфологія є відображенням метастабільності наноматеріалів, тобто знаходження системи в локальному мінімумі вільної енергії. Наночастинки за своєю природою проявляють інші фізико-хімічні властивості, які залежать від їх розміру, від адгезивних, каталітичних, оптичних, електричних, квантово-механічних властивостей і від їх геометрії, розподілу по розмірами і порядку їх організації в нанооб'єкті [2]. Розмірна «вилка» є найбільш дієвим способом управління функціональними характеристиками наноматеріалів, а також впливом на їх біосумісність, оскільки є, по суті, відображенням результату еволюції (трансформації)

поверхні (межі розділу середовищ) в процесі технологічного впливу при отримання матеріалу [1].

*При розмірах часток металів менше 50 нм (кілька сотень атомів) відбувається різка зміна їх властивостей.* Наприклад, при зменшенні розмірів частинок золота до 2 нм його температура плавлення зменшується з 1065 до 200 °С. Такі наночастинки металу, навіть стикаючись одна з одною, майже не проводять електричний струм, утворюючи замкнуті електронні системи з декількох десятків атомів. Загальні властивості металів – висока електро- і теплопровідність, блиск, гнучкість і пластичність. Наприклад, питома електропровідність мідного дроту буде однією і тією ж у дроту товщиною 1 мм, 0,01 мм і 0,001 мм, але якщо ми спробуємо створити струмопровідну доріжку на ізолюючій підкладці товщиною в 10 атомів міді або приблизно 1,3 нм, то мідна доріжка швидко перетвориться в набір «кластерів з закритими електронними оболонками», тому на їх основі не вийде ні електро-, ні теплопровідності, характерною для міді. Хімічна поведінка для частинок з десятків і сотень атомів відрізняється від «шматків» з тисяч і мільйонів атомів. *У підсумку, приблизно на рівні розміру в 10 нм була виявлена фундаментальна межа, при переході від якої, до менших розмірів світ помітно змінюється, і властивості речовин треба фактично вивчати заново* [4].

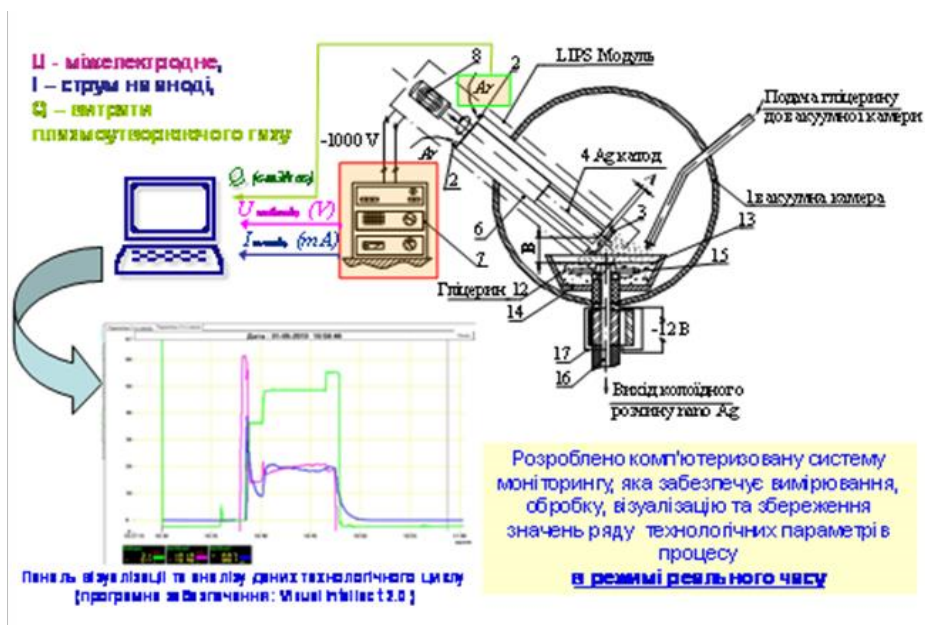
Відповідно, накопичені за багато десятиліть дані про фізико-хімічні характеристики речовин мають істотно доповнюватись, а іноді формуватись заново. Як приклад, відомо досить широкому колу науковців що межа зерен матеріалів є бар'єром для дислокації, тому зменшення розміру приводить до зростання характеристики міцності. Залежність межі текучості від розміру зерен описується прямим законом Холла-Петча що має граничні межі, за якими механічна міцність змінюється і в наукових колах з'явився термін – зворотній закон Холла-Петча. Підкреслюється, при цьому, що в області часток 10–30 нм, характеристики міцності зменшуються, що зумовлено тим, що при розмірах зерен збільшується об'ємна доля зерно межових областей з нерегулярною структурою [5].

*В теоретичних і прикладних інформаційних джерелах підтверджувалось що, чим вужче межа за розподілом розмірів наночасток, тим краще метод їх отримання, тому, що матимемо безпосередню можливість повторити результати як наукового дослідження, так і визначення екологічно-безпекової складової, що посідає, своє чільне місце* [1, 2, 6].

### **Шляхи вирішення**

Розуміння складності протікання ТОСІД, у зв'язку з активним використанням як основної складової у ньому плазми, передбачає чітке вивірення параметрів в заданих діапазонах. Лише утримання заданих параметрів, ведення процесу в стабільному режимі роботи дозволяє добитися високих результатів кінцевого продукту. Як показує практика, при керуванні плазмовими установками оператори часто помиляються через те, що фізіологічні можливості людини вельми обмежені. Складність, також, становить необхідність вимірювання технічних параметрів у вакуумі, що суттєво звужує коло можливого використання датчиків, приладів, контролюючих та управляючих органів при незмінно високим вимогам щодо точності та часу спрацювання останніх. Основою ТОСІД – створення матеріалів з новими та перспективними властивостями являється сам газовий розряд, низькотемпературна плазма, електроди, а також приелектродні області. В кожній з вказаних областей реалізуються свої умови розряду і своя специфіка утворення кінцевих матеріалів. При виборі інструментом нанодиспергування саме локалізованого плазмового розряду великого значення набуває вивчення фізики процесу та вимірювання об'ємних кутових розподілів потоків вибитого з катоду матеріалу, вимірювання швидкості

розпилювання (масопереносу в одиницю часу) та тепловкладень у функції відстані від місця розряду. При сталих оптимальних технологічних параметрах процесу розпилення – напруги та струму розряду – характеристики масопереносу та кутових розподілів струменів матеріалу, вибитого з катоду, складають важливі параметри ефективності та продуктивності процесу виготовлення наносуспензій. Вимірювання тепловкладень у оброблювану рідину, дають можливість підтримувати рівноважний температурний режим, при якому оброблювана рідина не деструктується, а внесені наночастки мають достатню енергію для імплантації та переміщення і створення гомогенної наносуспензії. Аналіз експериментальних даних з використанням дифузної моделі формування наночасток та їхніх агрегатів показав її придатність в умовах, що розглядаються. Формування наночасток відбувається в тонкому приповерхневому шарі робочої рідини при її проходженні крізь місце напилювання. Агрегати наночасток утворюються в тому ж робочому прошарку. Зростання наночасток та їхніх агрегатів припиняється при виході з місця напилювання та перемішування розчину. Кінцевий розмір наночасток в умовах, що розглядаються, практично залежить від режиму напилювання. Особливу увагу приділяється розвитку систем програмованого управління ТОСІД, з метою зменшення впливу оператора на кінцевий результат – отримання наносуспензії (рисунок).



Блок-схема керування ТОСІД наночасток електропровідних матеріалів в рідину

Схема складається з вакуумної камери з відповідними технічними засобами для досягнення та постійного підтримання необхідного вакууму (1), високовольтного джерела постійного струму (7), сопла-анода (3) закріпленого за допомогою ізолятора (6) на певній регульованій відстані  $A$  від катоду (4), і, відповідно, електрично поєднанного з позитивним полюсом джерела постійного струму (7), а також підключеного до газопідводу (2) для підведення до сопла плазмотворючого газу, що утворює плазмовий струмінь; а також катоду (4), який електрично поєднаний з негативним полюсом джерела постійного струму (7). За допомогою зворотньо-поступального руху катоду регулюється зазор  $A$  між анодом (3) та розпилювальним катодом (4). Ємність (14) з рідиною, що обробляється (12),

охолоджуються за допомогою теплообмінника (15), що знаходиться на охолоджуваній трубці (16) від блоку-генератора холоду (17). Це забезпечує необхідний температурний режим несучої рідини, в яку імплантуються наночастинки металу. Головні параметри ТОСІД виводяться через RS 485 на монітор персонального комп'ютера і архивуються на його жорсткий диск.

Технологічний цикл приготування суспензії наноструктурних частинок електропровідних матеріалів у несучих рідинах, поміщених у ємність (14), починається з досягнення необхідного тиску (розрядження) у вакуумній камері, причому цикл відкачки збільшується на додатковий час, необхідний для дегазації рідини-носія (12), що підлягає обробці. По закінченні виходу розчинених у рідині підпалюється локалізований плазмовий розряд. Для цього на катод (4), що електрично поєднаний з негативним полюсом джерела постійного струму (7), подається висока напруга (0,3–1,5 кВ). Одночасно до газопідводу (2) підводиться плазмоутворюючий газ, що витікає із сопла-аноду (3). Локалізований плазмовий розряд, що розпилює поверхню катоду (4), вибиваючи нанорозмірні частинки його матеріалу, утворює плазмовий струмінь, який захоплює вибиті наноструктурні частинки матеріалу катоду з робочого проміжку  $A$  та транспортує і спрямовує їх в своєму подальшому русі на поверхню оброблюваної рідини і занурює (імплантує) ці частки у оброблювану рідину (12). Шляхом обертання катоду (4) за допомогою приводу (8) та висування його вздовж осі обертання по мірі розпилення досягається збереження величини регульованого робочого проміжку  $A$  і, таким чином, стабілізується струм плазмового розряду і підтримується рівномірність розпилення матеріалу катоду [2].

За допомогою вибору параметрів технологічного процесу локалізованого іонно-плазмового диспергування можна отримати певні нанорозміри вибитих частинок матеріалу катоду та отримати досить вузьке їх розподілення. Розподіл одержаних наночастинок металу в суспензіях за розмірами вивчався за допомогою методів просвічуючої електронної мікроскопії, кросс-кореляційної спектроскопії та ін. на базі декількох незалежних вітчизняних і закордонних лабораторій і показав споріднені результати, які відтворені в таблиці [8].

#### Середній характеристичний діаметр наночастинок металів в суспензіях

Me	Розмір частинок, нм				
	кореляційна спектроскопія	СЕМ	високошвидкісне центрифугування	крос-кореляційна спектроскопія	СЕМ після обробки в диспергаторі
<b>Cu</b>	<b>36</b>	агломерати		<b>39,56</b>	
<b>Ag</b>	<b>33</b>		86 % частинок має розмір 35-78 нм	<b>31,05</b>	75 % частинок має розмір 30 - 60 нм
<b>Au</b>	<b>42</b>	<b>20-30</b>		<b>36,89</b>	
<b>Pd</b>	<b>12</b> <b>50</b>	<b>10-13</b> <b>16-37</b>		<b>1,64</b> <b>49,21</b>	

Тиск плазмоутворюючого газу та параметри розряду вибираються таким чином, щоб плазмовий струмінь не тільки вніс (імплантував) наноструктурні частинки у рідину, але й постійно оновлював приповерхневий прошарок несучої рідини, що створює умови для

однорідного розповсюдження в ній частинок та створення гомогенної суспензії високої концентрації при достатньому часі обробки рідини. Теоретичне підґрунтя комп'ютерного моделювання розпилення матеріалів іонним пучком розглянуто в роботі [9].

### **Висновок**

Програмно, комбінуючи співвідношення компонентів, можна отримувати матеріали з необхідними характеристиками.

Впровадження керування іонно-плазмовим диспергуванням електропровідних матеріалів на базі мікропроцесорів (наприклад МИК-51, МИК-52) в програмному середовищі *Visual Intellect* з архівуванням ТОСІД, дозволить, прогнозувати і досить точно керувати термодинамічними характеристиками процесу, базуючись на статистичному пакеті архівованих і відпрацьованих даних і співставляти з сертифікованою за характеристичними: розміром, розподілом та концентрацією отримувати якісні партії наноматеріалів з високими показниками повторюваності фізико-хімічних характеристик.

*Обобщены результаты исследований в связи с изменением некоторых свойств электропроводящих материалов одного химического состава, при их ионно-плазменном диспергировании в вакууме в жидкую основу, от их массива, до нано уровня. Результативным научно-исследовательским решением данной проблематики просматриваются конструкторско-технологические проработки по моделированию принципиально важных специализированных блоков с автоматизированным контролем и управлением технологическим процессом. Комплектующие модуля плазменной нанодиспергации, а также конфигурации таких блоков и устройств должны подчиняться программным командам с персонального компьютера. Повторяемость физико-химических свойств позволит проводить сертификацию и сократить инновационный путь новых наноматериалов от научной разработки до его коммерциализации.*

**Ключевые слова:** Нанотехнология, локализованное ионно плазменное диспергирования в вакууме.

### **V. M. Tkach, V. V. Sadokhin, D. V. Sokoliuk, V. P. Sadokhin, M. V. Fefilatiev NANOTECHNOLOGY OF A SINGLE-STAGE LOCALIZED ION-PLASMA DISPERSION IN A VACUUM**

*The results of studies are summarized in connection with the change in certain properties of electrically conductive materials of a single chemical composition, when they are ion-plasma dispersed in a vacuum into the liquid substrate, from their mass, to the nano level. A productive scientific and research solution to this problem looks at design and technological studies on the modeling of fundamentally important specialized units with automated monitoring and control of the technological process. The components of the plasma nanodispersion module, as well as the configuration of such units and devices, must obey the program commands from the personal computer. Repeatability of physical and chemical properties will allow to carry out certification and reduce the innovative path of new nanomaterials from scientific development to its commercialization.*

**Key words:** Nanotechnology, localized ion-plasma dispersion in vacuum. *Keywords: Nanotechnology, localized ion-plasma dispersion in vacuum.*

### **Література**

1. Тринеева В. В. Технология получения металл/углеродных нанокмполитов и применение их для модификации полимерных материалов: автореферат дис. ... доктора технических наук: 05.17.06. – Ижевск, 2015. – 41 с.
2. Садохін В. В. Отримання суспензій наночастинок металів з керованими розподілом розмірів та концентраціями комбінованим методом іонно-плазмового

- диспергування. Інститут надтвердих матеріалів ім. Бакуля, НАН України. – Київ, 2014. – С.45–50; С. 147–148.
3. Патент № 80513 Україна. МПК В22F 9/14, В22F 9/02, А61К 33/38. Одностадійний спосіб приготування висококонцентрованих суспензій нанорозмірних часток електропровідних матеріалів на основі водорозчинних і водонерозчинних рідин та пристрій для його здійснення / Д. А. Дудко, Л. Д. Кістерська, В. П. Садохін. – Опубл. 25.09.07; Бюл. № 15.
  4. Введение в нанотехнологию. Межмолекулярные взаимодействия и особые свойства поверхностей раздела фаз [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://edudop.ru/mod/page/view.php?id=26402>.
  5. Юров В. М., Лауринас В. Ч., Гученко С. А. Некоторые вопросы физики прочности металлических наноструктур // Межвуз. сб. науч. трудов «Физико-химические аспекты изучения кластеров, наноструктур и наноматериалов». – Тверь: Твер. гос. ун-т, 2013. – Вып. 5. – С. 408–412.
  6. Богданов К. Ю. Почему наночастицы плавятся при низкой температуре? [Электронный ресурс] // Сайт нанотехнологического сообщества «Нанометр». – 2008. Режим доступа: [http://www.nanometer.ru/2008/02/19/nanochastici\\_temperatura\\_plavlenia\\_6057.html](http://www.nanometer.ru/2008/02/19/nanochastici_temperatura_plavlenia_6057.html).
  7. Wagener M., Gunther B. // Progress in Colloid and Polymer Science. – 1998. – 111. – P. 78–81.
  8. Екологічно чиста технологія плазмового диспергування електропровідних матеріалів з одностадійним циклом виготовлення суспензій наночасток у широкому спектрі рідких основ / М. В Новіков., В. В. Садохін, В. М. Перевертайло та ін. // Порошковая металлургия. – 2012. – № 1/2. – С. 34–45.
  9. Промохов А. А. Компьютерное моделирование распыления твёрдых тел ионным пучком. – М.: МГУ, Физический факультет, кафедра физической электроники, 2012. – 37 с.

Надійшла 21.06.18

## References

1. Trineeva, V. V. (2015). Tekhnolohiia polucheniia metal/uhlerodnykh nanokompozitov i primeneniie ikh dlia modifikatsii polimernykh materialov [The technology of obtaining metal/carbon nanocomposites and their application for the modification of polymeric materials]. *Extended abstract of Doctor's thesis*. Izhevsk [in Russian].
2. Sadokhin, V. V. (2014). Otrymannia suspenszii nanochstynok metaliv z kerovanyim rozpodilom rozmiriv ta koncentraziiamy kombinovanyim metodom ionno-plazmovoho disperhuvannia [Receiving suspension of nanoparticles of metals in peeling size distribution that concentrates combinings by the method of ion-plasma dispersing]. NAN Ukrainy; In-t sverkhtverdykh materialov. (pp. 45–50; 147–148). Kyiv [in Ukrainian].
3. Dudko, D. A., Kisterska, L. D., & Sadokhin, V. P. (2007). Patent of Ukraine 80513 [in Ukrainian].
4. Vvedenie v nanotekhnolohiiu. Molekuliarnye vzaimodeistviia i osobyie svoistva poverkhnostei razdela faz [Introduction to nanotechnology. Intermolecular interactions and special properties of the interfaces of phases]. *edudop.ru*. Retrieved from <http://edudop.ru/mod/page/view.php?id=26402> [in Russian].

5. Yurov, V. M., Laurinas, V. Ch., & Huchenko, S. A. (2013). Nekotorye voprosy fiziki prochnosti metallicheskikh nanostruktur [Some questions of the physics of strength of metallic nanostructures]. – *Fiziko-khimicheskie aspekty izucheniia klasterov, nanostruktur I nanomaterialov – Physicochemical aspects of studying clusters, nanostructures and nanomaterials, Vol. 5*, 408–412 [in Russian].
6. Bohdanov, K. Yu. (2008). Pochemu nanochastizy plaviatia pri nizkoi temperature? [Why do nanoparticles melt at low temperature?]. *Nanometr. nanometer.ru*. Retrieved from [http://www.nanometer.ru/2008/02/19/nanochastici\\_temperatura\\_plavlenia\\_6057.html](http://www.nanometer.ru/2008/02/19/nanochastici_temperatura_plavlenia_6057.html) [in Russian].
7. Wagener, M., & Gunther, B. (1998). *Progress in Colloid and Polymer Science, Vol. 111*, 78-81.
8. Novikov, M. V., Sadokhin, V. V., Perevertailo, V. M. et al. (2012). Ekologichno chysta tekhnolohiia plazmovoho dyspehuvannia elektroprovadnykh materialiv z odnostadiinym ziklom vyhotovlennia suspensii nanochastinok u shirokomu spektri ridkykh osnov [Eco-clean technology of plasma dispersion of electrical materials with a single-cycle of the preparation of the suspension nanoparticles at a wide range spectrum of liquid bases]. *Poroshkova metallurhiia – Powder metallurgy*, 1-2, 34–45.
9. Promokhov, A. A. (2012). *Kompiuternoe modelirovanie raspyleniia tverdykh tel ionnym puchkom* [Computer simulation of solid-state sputtering with an ion beam]. Moscow: MSU, Physical faculty of the Moscow State University

УДК 666.11.01:621.921-419

**С. А. Кухаренко**, канд. техн. наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины, ул. Автозаводская, 2,  
04074 г. Киев, e-mail: svetlana0401@ukr.net*

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ СИЛЫ ПОЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КАТИОНОВ НА ИОННУЮ ДИФФУЗИЮ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ СИЛИКАТНЫХ СИСТЕМАХ**

*Изложены основные результаты исследования влияния силы поля различных катионов на ионную диффузию в силикатных многокомпонентных системах, которые широко используются в качестве связующих инструментальных абразивсодержащих композиционных материалов различного функционального назначения. Показано, что, эффективные коэффициенты диффузии щелочного и щелочноземельного катионов в диффузионной паре не являются однозначной функцией ионного радиуса катиона, а зависят от структурных факторов и энергии связи с другими ионами расплава.*

**Ключевые слова:** *стекло, щелочные и щелочноземельные катионы, диффузия, энергия активации диффузии, эффективный коэффициент диффузии, абразивсодержащие композиты.*

### **Введение**

При изготовлении абразивного инструмента из сверхтвердых материалов (СТМ) на керамических связках в качестве связующего нашли применение стеклообразные материалы, обладающие достаточной твердостью, прочностью и адгезией к порошкам СТМ. Стеклообразные связующие отличаются невысокой адгезией к обрабатываемым материалам.