

**Ключевые слова:** твердые сплавы, режущие пластины, химическая обработка, карбидный скелет

### Література

1. Третьяков В.И. Основы металловедения и технологии производства спеченных твердых сплавов. – М.: Металлургия, 1976. – 528 с.
2. Фальковский В. А., Клячко Л. И. Твердые сплавы. – М.: Руда и металлы, 2005. – 413 с.
3. Киффер Р., Шварцкопф П. Твердые сплавы. – М.: Металлургиздат, 1957. – 664 с.
4. Панов В.С., Чувилин А.М., Фальковский В.А. Технология и свойства спеченных твердых сплавов и изделий из них. – М.: МИСИС, 2004. – 464 с.

Надійшла 19.06.20

### References

1. Tretyakov, V.I. (1976). *Osnovy metallovedeniia i tehnologii spechennykh tverdyykh splavov [Bases of metal science and technology of production of sintered hard alloys]*. Moscow: Metallurgy [in Russian].
2. Falkovsky, V.A., Klyachko, L.I. (2005) *Tverdye splavy [Solid alloys]*. Moscow: Ruda and metals [in Russian].
3. Kieffer, R., Schwarzkopf, P.V. (1957) *Tverdye splavy [Solid alloys]*.— Moscow: Metallurgizdat [in Russian].
4. Panov, V.S., Chuvilin, A.M., Falkovsky, V.A. (2004) *Technologiya spechennykh tverdyykh splavov i izdelii iz nikh [Technology and properties of sintered hard alloys and their products]*. Moscow: MISIS [in Russian].

УДК 621.9: 621.3.082.7

DOI: 10.33839/2708-731X-23-1-304-312

**В. І. Грушко**, канд. фіз.-мат. наук.; **Є. І. Міцкевич**, інж.;  
**В. В. Лисаковський**, канд. техн. наук; **А. М. Кір'єв**, інж.; **О. Г. Лисенко**, канд. техн. наук

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

## СКАНУВАЛЬНА ТУНЕЛЬНА МІКРОСКОПІЯ З ЛЕГОВАНИМ БОРОМ АЛМАЗНИМ ВІСТРЯМ ДЛЯ *IN-SITU* ПРОФІЛОМЕТРІЇ ТА ФІНІШНОЇ ОБРОБКИ В СТАНКАХ АЛМАЗНОГО МІКРОТОЧІННЯ

*Розвиток методів алмазного мікроточіння з метою підвищення якості мікро- та нанорозмірних деталей критично важливий для багатьох напрямків оптики, електроніки, космічної техніки, нанотехнології та ін. Основними проблемами існуючих методів алмазного мікроточіння є обробка центру деталі та необхідність вилучення деталі з верстату для нанорозмірної оцінки її якості. Для вирішення цих проблем ми запропонували нову схему поєднання сканувальної тунельної мікроскопії (STM) з легованим бором алмазним вістрям/різцем та верстатом для алмазного мікроточіння. Після стандартної процедури точіння STM виконує лінійне сканування поверхні деталі в декількох діагональних напрямках при нерухомій деталі. При виявленні дефектних ділянок проводиться швидка процедура неастрового сканування дефектної ділянки в режимі постійної висоти і виконується наноконтактна обробка дефектної ділянки з подальшим повторним скануванням. Ми представили методики вирошування легованих бором монокристалів алмазу для вістрь/різців STM. Для визначення оптимального рівня вмісту бору у алмазному вістрі/різці*

комбінованою STM аналізувалися достовірно-вимірювані значення тунельного струму при максимальній для тунелювання напрузі зсуву і мінімально можливому тунельному зазорі в системі «вістря-зразок» STM. Встановлено, що при фінішній обробці і профілометрії поверхні кремнію слід використовувати алмази з концентрацією носіїв зарядів не менше  $8 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , що відповідає концентрації бору в алмазі  $\approx 100 \text{ ррт}$ , а при обробці та скануванні поверхні металів концентрація бору в алмазному вістрі повинна бути на рівні  $\approx 10 \text{ ррт}$ .

**Ключові слова:** алмазне мікроточіння, сканувальна тунельна мікроскопія, легований бором алмаз

## Вступ

Розвиток методів алмазного мікроточіння з метою підвищення якості мікро- та нано-розмірних деталей критично важливий для багатьох виробничих та наукових потреб. Огляд сучасних досягнень алмазного мікроточіння представлений у роботах [1–3]. Для перевірки якості обробки поверхні зазвичай використовують оптичні вимірювальні пристрої, такі як інтерферометр білого світла [4, 5]. Як відомо, складність і дорожнеча є перешкодою для застосування цих методів. Крім того, для виконання вимірювань якості поверхні оброблену деталь необхідно попередньо вилучити з верстата. Однак, для мікроструктур з повторюваним профілем використання оптичних вимірювальних систем з мікролінзовими ґратами ускладнює коректне порівняння поверхонь [6]. Як тільки деталь буде вилучена з токарного верстата після обробки, помилка нахилу і просторового положення окремого вимірювального пристрою призведе до того, що виміряні характеристики поверхні не будуть відповідати фактичним.

У літературі описані кілька контактних і безконтактних методів, що дозволяють спостерігати оброблену поверхню, не витягуючи її з верстата. Лі та ін. [7] розробили контактну мікрокулю для *in-situ* вимірювання профілів мікроструктур після мікроточіння. Кім та ін. [8] виготовили седлову поверхню і виміряли її радіус, встановивши зонд на пристрій для сканування вздовж радіального напрямку. Гао та ін. [9] домоглися безконтактного *in-situ* виміру циліндричних поверхонь за допомогою оптичного датчика нахилу. Ко та ін. [10] виконали *in-situ* вимір профілю обробленої поверхні за допомогою безконтактного датчика переміщення лазера на основі моделі з автоматизованим дизайном. Квінсет та Турньєр [11] вибрали хроматичний конфокальний датчик для досягнення комплексного вимірювання топографії поверхні у центрі деталі. Однак у більшості дослідницьких робіт основна увага приділяється швидше скануванню лінії різку, ніж спостереження 3D-профілю обробленої поверхні. Крім того, точність методу контактного вимірювання заснована на розмірі і точності чутливого елемента виміру, а безконтактна оптична техніка має обмежені поперечну роздільну здатність і діапазон вертикального виміру [12]. Як відомо, сканувальна зондова мікроскопія є потужним інструментом для вимірювання нано-топографії [13]. В останні роки цей метод був випробуваний для автономного вимірювання деталей після мікроточіння з високою точністю обробки [14, 15]. Нашою метою є подальший розвиток методу зондової мікроскопії в процесах мікроточіння з використанням попереднього досвіду трибо-наноліграфії за допомогою легovanого бором алмазного вістря [16].

## Метод

Загальна концепція методу схематично представлена на рис. 1. У стандартному режимі сканувальної тунельної мікроскопії (STM) (рис. 2 а) в процесі сканування вістря рухається вздовж нерухокої поверхні зразка при постійному тунельному струмі (або постійній висоті), які контролюються зворотним зв'язком, а показання системи змінюються в залежності від топографії поверхні і на їх основі будується карта висот. Алгоритм роботи поєднаного з верстатом гібридного STM показаний на рис. 2 б. Після стандартної процедури алмазного точіння STM проводить лінійне сканування поверхні деталі в декількох діагональних напрямках (показано штриховою лінією) в режимі постійного тунельного

струму/постійної висоти при нерухомій деталі. При виявленні дефектних ділянок виконується швидка процедура неастроного сканування дефектної ділянки в режимі постійної висоти. Далі проводиться більш детальний аналіз дефектів у растровому режимі вимірювання. Після детального аналізу рельєфу оброблюваної поверхні обирається відповідна форма вістря і виконується контактна нанообробка дефектної ділянки з подальшим повторним скануванням.

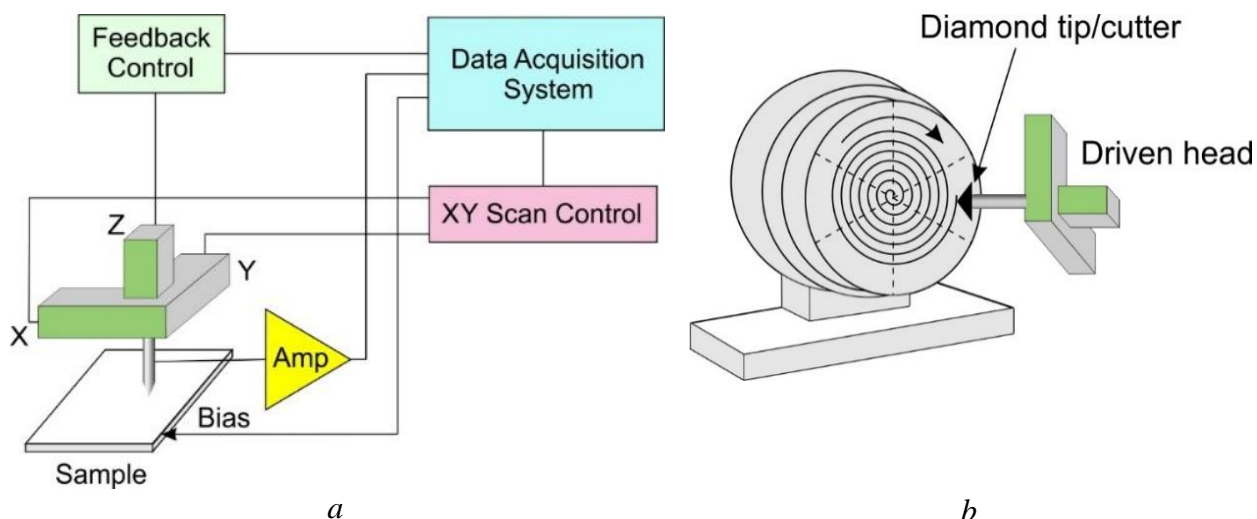


Рис. 1. Загальна схема методу: а – схема стандартного STM, б – гібридна система STM/алмазне мікроточіння

### Леговані бором алмази для вістря/різця STM

Для створення необхідних умов зростання алмазів використовується апарат високого тиску (АВТ) типу «Тороїд» і ростова комірка [17, 18]. Затравочна система, що складається з трьох попередньо орієнтованих кристалів, відокремлюється від сплаву розчинника захисним шаром для запобігання передчасного розчинення. З метою отримання монокристалів алмазу типу ІІв застосовується ряд джерел вуглецю, що складаються з суміші графіту ПММ-1 з різною кількістю легуючої добавки бору. Процес вирощування проводиться при тиску 6 ГПа і температурах від 1350 до 1450 °С. Температура в реакційній зоні задається змінним електричним струмом, який пропускається через систему резистивного нагріву комірки.

Залежно від рівня легування вихідного джерела можуть бути вирощені кристали з різною концентрацією

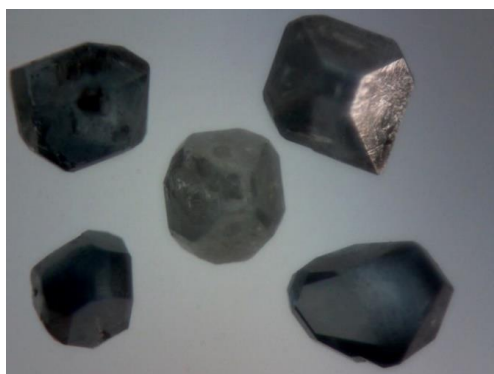


Рис. 2. Леговані бором монокристали алмазу для вістря/різця STM з різною концентрацією бору. Розмір кристалів 2–3 мм

нескомпенсованих домішок бору, що візуально спостерігається в зміні забарвлення кристалів від майже безбарвних (менше 0,05 мас. % бору) до темно-синіх і непрозоро чорних (0,5 мас. % і більше). Вивчення поглинання в ІЧ-спектрі алмазів дозволяє оцінити вміст присутніх домішок і їх розподіл. Зображення зразків легованих бором монокристалів алмазу з різною концентрацією бору показані на рис. 2. Зсув параметрів вирощування в високотемпературну область, що

примикає до лінії рівноваги графіт↔алмаз, дозволяє отримувати більш однорідні кристали, сформовані виключно пірамідою зростання октаедра.

### Аналіз концентрації носіїв зарядів в алмазах для вістря/різця STM

Оскільки для забезпечення високої зносостійкості необхідно використовувати алмазні різці з найменшим рівнем легування бором і, отже, найменшою концентрацією носіїв зарядів, значення тунельного струму є найбільш критичним параметром у вирішенні питання про придатність алмазного вістря для STM-профілометрії.

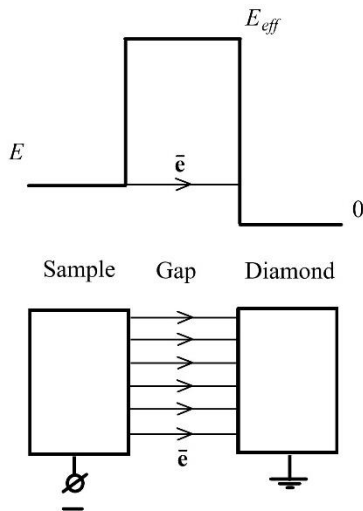


Рис. 3. Енергетична діаграма STM-профілометрії поверхні алмазним зондом p-типу

Для визначення оптимального рівня вмісту бору у алмазному вістрі/різці комбінованого STM аналізувалися достовірно-вимірювані значення тунельного струму  $I$  при максимальній для тунелювання напрузі зсуву  $V$  і мінімально можливому тунельному зазорі  $d$  в системі «вістря-зразок» STM, енергетична діаграма якої представлена на рис. 3. В якості теоретичної залежності  $I(V, d)$  використовувався вираз (1), отриманий для ефективного потенційного бар'єру  $E_{eff}$  тунельного контакту при невеликих тунельних напругах  $V$  ( $eV \ll E_{eff}$ ) [19]:

$$I = eVnvS \exp(-2kd), \quad (1)$$

де

$$k = \sqrt{\frac{2mE_{eff}}{\hbar^2}}, \quad (2)$$

$k$  – коефіцієнт загасання густини хвильової функції електрона в тунельному проміжку,  $\hbar$  – постійна Планка,  $m$  – маса електрона,  $e$  – заряд електрона,  $n$  – концентрація носіїв заряду,  $v$  – ефективна швидкість руху зарядів,  $S$  – площа поперечного перерізу каналу тунелювання.

Вираз (1) узагальнено нами [20] на випадок кінцевих тунельних напруг стандартною процедурою інтегрування з енергетичного вікна  $E = eV$  ( $E$  тут – енергія електрона):

$$I \approx nvS \int_0^{eV} \exp\left(-2\sqrt{\frac{2m(E_{eff} - E)}{\hbar^2}}d\right)dE \quad (3)$$

Формула (3) описує зміну струму  $I$  при зміні тунельної напруги  $V$ . Представлена формула в явному вигляді містить залежність тунельної вольт-амперної характеристики  $I(V)$  від концентрації  $n$  і швидкості носіїв заряду  $v$  при заданій мінімально можливій тунельній відстані  $d=20-30$  нм, що відповідає рівню шумів вимірювальної системи [21]. Мінімальне значення тунельного зазору забезпечує максимальне значення тунельного струму. Для сучасних швидких STM-профілометрів достовірно-вимірювальне значення тунельного струму становить близько 0,2 нА [21]. Основними носіями зарядів в STM з напівпровідниковим алмазним зондом p-типу є дірки. Концентрація тунелюючих з металевого зразка електронів обмежена концентрацією акцепторних рівнів в алмазному вістрі, здатних прийняти ці електрони. Враховуючи, що в тунелюванні задіяна тільки найближча до поверхні зразка частина вістря, обмежена каналом тунелювання [20], в якості  $v$  береться значення дрейфової швидкості носіїв зарядів у вістрі, отримане на основі звичайної залежності (4) з мобільністю носіїв зарядів  $\mu_p = 1600 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$

$$v = \mu_p E_f, \quad (4)$$

[22] при постійному значенні напруженості електричного поля зонда  $E_f = V/h$  ( $h$  – висота зонда) [22, 23].

В якості ефективного потенційного бар'єру  $E_{eff}$  береться максимально можливе для системи зонд-зразок усереднене значення роботи виходу зонда і зразка. Для системи алмаз-Au

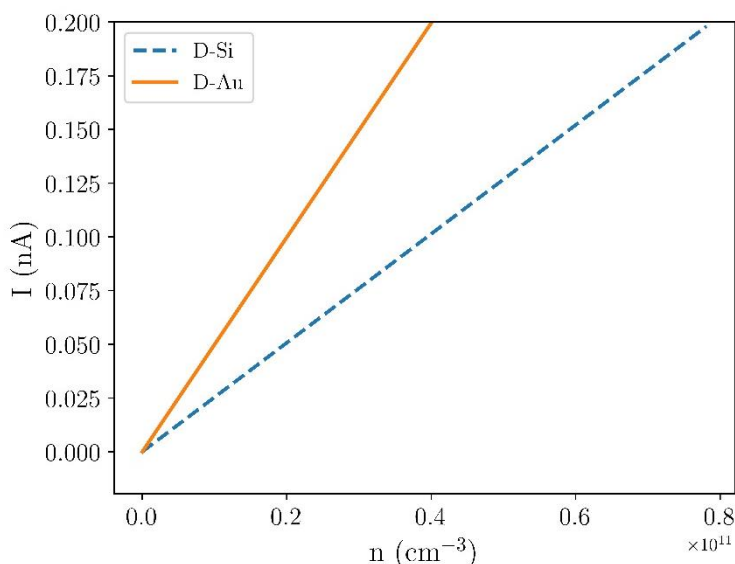


Рис. 4. Залежність тунельного струму  $I$  від концентрації  $n$  носіїв зарядів в алмазному STM-зонді/різці в системі алмаз-золото (D-Au) та алмаз-кремній (D-Si)

прийнято  $E_{eff} = 5.3\text{eV}$ , для системи алмаз-Si  $E_{eff} = 4.9\text{eV}$  [24, 25]. Максимально можливе значення тунельної напруги відповідне величині ефективного потенційного бар'єру між алмазним вістрям та металевою і напівпровідниковою поверхнями:  $V = 5.3\text{В}$  і  $V = 4.9\text{В}$  відповідно.

Вираз (3) являє собою лінійну залежність струму від концентрації носіїв зарядів, графічно представлену на рис. 4, де в якості оброблюваних і вимірюваних алмазним зондом поверхонь обрані золото і кремній, що моделюють поверхню деталей з металів та напівпровідників. Як видно з рисунка 4, в системі алмазний

зонд – поверхня золота (D-Au) значенню тунельного струму  $I = 0.2$  нА, що може бути достовірно виміряно, відповідає концентрація носіїв зарядів  $n \approx 4 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ . За даними роботи [22] такої величині концентрації носіїв відповідає вміст бору в алмазі NB  $\approx 10$  ppm, що характерно для октаедричних секторів зростання НРНТ алмазів, вирощених із суміші, яка містить 0.1 at.% бору [22]. Як видно з рисунка 4, при фінішній обробці і профілометрії поверхні кремнію слід використовувати алмази з концентрацією носіїв зарядів не менше  $8 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , що відповідає NB  $\approx 100$  ppm та концентрації бору у вихідній суміші  $\approx 1$  at.%. Такі кристали з необхідними розмірами (2-3 мм) можуть бути вирощені в установках типу «Тороїд» для використання в якості різців/зондів STM для фінішної обробки і *in-situ* контролю якості обробленої поверхні. Оскільки концентрація носіїв зарядів істотно залежить від матеріалу поверхні деталі, оцінка необхідного для достовірного STM-вимірювання значення концентрації носіїв зарядів повинна виконуватися для кожного оброблюваного матеріалу окремо.

## Висновки

Ми представили нову схему поєднання сканувальної тунельної мікроскопії з верстатом для алмазного мікроточіння. Монокристал легованого бором алмазу використано для вістря/різця STM. Такий підхід дає змогу виконувати нанорозмірну оцінку якості обробленої поверхні без вилучення деталі з верстату, а також фінішну обробку центру деталі та дефектних ділянок. Вирощування легованих бором монокристалів алмазу в апараті високого тиску в умовах високих тисків – високих температур дозволяє отримувати вістря/різці STM з різними рівнями легування для різних умов використання. Виконано

моделювання параметрів тунелювання електронів в комбінованому STM та визначені оптимальні рівні легування бором алмазу для обробки та візуалізації поверхонь металів та напівпровідників. Для практичного використання представлених результатів необхідні подальші дослідження для визначення оптимальних геометричних розмірів вістря/різця STM та розробка електронних та механічних компонентів інтеграції STM у станки для алмазного мікроточіння.

**V. I. Grushko, E. I. Mitskevich, A. M. Kiriev, V. V. Lysakovskiy, O. G. Lysenko,**

*V. N. Bakul Institute for Superhard Materials of National Academy of Sciences of Ukraine*

### **SCANNING TUNNELING MICROSCOPY WITH BORON-DOPED DIAMOND TIP FOR IN-SITU PROFILOMETRY AND FINISHING IN DIAMOND MICRO-TURNING MACHINES**

*The development of diamond micro-turning methods to improve the quality of micro- and nano-dimensional characteristics of parts is critical for many areas of optics, electronics, space technology, nanotechnology and others. The main problems of the existing methods of diamond micro-turning are the processing of the center of the part and the need to extract the part from the machine for nanoscale evaluation of surface quality. To solve these problems, we have proposed a new scheme for combining scanning tunneling microscopy (STM) with boron-doped diamond tip/cutter and a diamond micro-turning machine. After the standard diamond turning procedure, the STM performs a linear scan of the part surface in several diagonal directions with the stationary part. When defective areas are detected, a quick non-raster scanning procedure of the defective area is performed at a constant height mode and contact nanoprocessing of the defective area is performed. We presented techniques to grow boron-doped single crystals diamond for STM tips/cutters. To determine the optimal level of boron content in the diamond tip/cutter of the combined STM, the reliably measured values of the tunneling current were analyzed at the maximum bias for tunneling and the minimum possible tunneling gap in the STM tip system. It is found that diamonds with a charge carrier concentration of at least  $8 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ , that corresponds to a boron concentration in diamond  $\approx 100$  ppm, should be used during finishing and profilometry of silicon surface, and boron concentration in diamond tip should be at the level of  $\approx 10$  ppm during processing and scanning of metal surface.*

**Key words:** *diamond micro-turning, scanning tunneling microscopy, boron-doped diamond*

**В.И. Грушко, Е.И. Мицкевич, В.В. Лысаковский, А.М. Кирьев, О.Г. Лысенко**

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины*

### **СКАНИРУЮЩАЯ ТУННЕЛЬНАЯ МИКРОСКОПИЯ С ЛЕГИРОВАННЫМ БОРОМ АЛМАЗНЫМ ОСТРИЕМ ДЛЯ IN-SITU ПРОФИЛОМЕТРИИ И ФИНИШНОЙ ОБРАБОТКИ В СТАНКАХ АЛМАЗНОГО МИКРОТОЧИННЯ**

*Развитие методов алмазного микроточения с целью повышения качества микро- и наноразмерных деталей критически важно для многих направлений оптики, электроники, космической техники, нанотехнологии и др. Основными проблемами существующих методов алмазного микроточения являются обработка центра детали и необходимость изъятия детали из станка для наноразмерной оценки ее качества. Для решения этих проблем мы предложили новую схему сочетания сканирующей туннельной микроскопии (STM) с легированным бором алмазным острием и станком для алмазного микроточения. После стандартной процедуры точения STM проводит линейное сканирование поверхности детали в нескольких диагональных направлениях при неподвижной детали. При обнаружении дефектных участков выполняется быстрая процедура нерастрового сканирования дефектного участка в режиме постоянной высоты и проводится наноконтактная обработка дефектного участка с последующим повторным сканированием. Мы представили методики выращивания легированных бором монокристаллов алмаза для острия/резца*

*STM.* Для определения оптимального уровня содержания бора в алмазном острие/резце комбинированного STM анализировались достоверно-измеряемые значения туннельного тока при максимальном для туннелирования напряжении смещения и минимально возможном туннельном зазоре в системе «острие-образец» STM. Установлено, что при финишной обработке и профилометрии поверхности кремния следует использовать алмазы с концентрацией носителей зарядов не менее  $8 \times 10^{10} \text{ см}^{-3}$ , что соответствует концентрации бора в алмазе  $\approx 100 \text{ ppm}$ , а при обработке и сканировании поверхности металлов концентрация бора в алмазном острие должна быть на уровне  $\approx 10 \text{ ppm}$ .

**Ключевые слова:** алмазное микроточение, сканирующая туннельная микроскопия, легированный бором алмаз

### Література

1. Abdulkadir L.N., Abou-El-Hossein K., Jumare A.I. et al. Ultra-precision diamond turning of optical silicon // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2018. – Vol. 96. – P. 173–208.
2. Hatefi S., Abou-El-Hossein K. Review of single-point diamond turning process in terms of ultra-precision optical surface roughness // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2020. – Vol. 106. – P. 2167–2187.
3. Gong H., Ao S., Huang K., Wang Y., Yan. C. Tool path generation of ultra-precision diamond turning: A state-of-the-art review // Nanotec. Precis. Eng. – 2019. – Vol. 2, N 3. – P. 118–124.
4. Yu D. P., Hong G. S., Wong Y. S. Profile error compensation in fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces // Int. J. Mach. Tool. Manuf. – 2012. – Vol. 52, N 1. – P. 13–23.
5. de Podesta M., May E. F., Mehl J. B., Pitre L., Gavioso R. M., Benedetto G., Albo P. A., Truong D. and Flack D. // Metrologia – 2010. – Vol. 47, N 5. – P. 588.
6. Yu D. P., Zhong X., Wong Y. S., Hong G. S., Lu W. F., Cheng H. L. Profile error compensation in fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces // Meas. Sci. Technol. – 2011. – Vol. 22, N 1. – P. 015105.
7. Lee K. W., Noh Y. J., Gao W., Arai Y., Shimizu Y., Tanaka K., Fukuta M., Kai Y. Experimental investigation of an air-bearing displacement sensor for on-machine surface form measurement of micro-structures // Precis. Eng. – 2011. – Vol. 12. – P. 671–678.
8. Kim H. S., Lee K. I., Lee K. M., Bang Y. B. Fabrication of free-form surfaces using a long-stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement // Int. J. Mach. Tool. Manuf. – 2009. – Vol. 49, N 12. – P. 991–997.
9. Gao W., Tano M., Sato S., Kiyono S. On-machine measurement of a cylindrical surface with sinusoidal micro-structures by an optical slope sensor // Precis. Eng. – 2006. – Vol. 30, N 3. – P. 274–279.
10. Ko T. J., Park J. W., Kim H. S., Kim S. H. On-machine measurement using a noncontact sensor based on a CAD model // Int. J. Adv. Manuf. Technol. – 2007. – Vol. 32. – P. 739–746.
11. Quinsat Y., Tournier C. In situ non-contact measurements of surface roughness // Precis. Eng. – 2012. – Vol. 36, N 1. – P. 97–103.
12. Hansen H. N., Carneiro K., Haitjema H., De Chiffre L. Dimensional Micro and Nano Metrology // CIRP Ann. – 2006. – Vol. 55, N 2. – P. 721–743.
13. Binnig G., Rohrer H., Gerber C., Weibel E. Tunneling through a controllable vacuum gap // Appl. Phys. Lett. – 1982. – Vol. 40. – P. 178.
14. Ju B. F., Chen Y. L., Ge Y. Z. The art of electrochemical etching for preparing tungsten probes with controllable tip profile and characteristic parameters // Rev. Sci. Instrum. – 2011. – Vol. 82, N 1. – P. 013707.

15. Sawano H., Gokan T., Yoshioka H., Shinno H. A Newly developed STM-based coordinate measuring machine // *Precis Eng.* – 2012. – 36, N 4. – P. 538–545.
16. Lysenko O., Grushko V., Mitskevich E. and Mamalis A. Scanning probe microscopy with diamond tip in tribo-nanolithography // *Symposium SS/TT/UU/VV – Advances in Spectroscopy and Imaging of Surfaces and Nanostructures.* – 2011. – 1318.
17. Novikov N. V., Nachalnaya T. A., Ivakhnenko S.A. et al. Properties of semiconducting diamonds grown by the temperature-gradient method // *Diamond and Related Materials.* – 2003. – Vol. 12, N 10–11. – P. 1990–1994.
18. Chepugov A. P., Chaika A. N., Grushko V. I., Mitskevich E. I., Lysenko O. G. Boron-doped diamond single crystals for probes of the high-vacuum tunneling microscopy // *Journal of Superhard Materials* – 2013. – Vol. 35. – P. 151–157.
19. Wolf E. L. *Principles of Electron Tunneling Spectroscopy*, Clarendon, Oxford, 1985, – 595 p.
20. Grushko V., Lubben O., Chaika A., Novikov N., Mitskevich E., Chepugov A., Lysenko O., Murphy B. E., Krasnikov S. A., Shvets I. V. Atomically resolved STM imaging with a diamond tip: simulation and experiment // *Nanotechnology* – 2014. – Vol. 25, N 2. – P. 025706.
21. Ju B. F., Zhu W. L., Yang S., Yang K. Scanning tunneling microscopy-based in situ measurement of fast tool servo-assisted diamond turning micro-structures // *Measurement Science and Technology* – 2014. – 25, N 5. – P 055004.
22. Bormashov V. S., Tarelkin S. A., Buga S. G., Kuznetsov M. S., Terentiev S. A., Semenov A. N. and Blank V. D. Electrical properties of the high quality boron-doped synthetic single-crystal diamonds grown by the temperature gradient method // *Diamond and Related Materials* – 2013. – Vol. 35. – P 19–23.
23. Pernegger H., Roe S, Weilhammer P., Eremin V. et al. Charge-carrier properties in synthetic single-crystal diamond measured with the transient-current technique // *Journal of Applied Physics* – 2005. – Vol. 97. – P 073704.
24. Diederich L., Küttel O. M., Aebi P., Schlappbach L. Electron affinity and work function of differently oriented and doped diamond surfaces determined by photoelectron spectroscopy // *Surface Science* – 1998. – Vol. 418, N 1. – P 219–239.
25. Hölzl J., Schulte F. K. Work function of metals. In: Hölzl J., Schulte F. K., Wagner H. (eds.) *Solid Surface Physics. Springer Tracts in Modern Physics.* – Vol 85. – Berlin, Heidelberg: Springer, 1979.

Надійшла 10.06.20

### References

1. Abdulkadir, L.N., Abou-El-Hosseini, K., Jumare, A.I., et al. (2018). Ultra-precision diamond turning of optical silicon. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 96, 173–208.
2. Hatefi, S., & Abou-El-Hosseini, K. (2020). Review of single-point diamond turning process in terms of ultra-precision optical surface roughness. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 106, 2167–2187.
3. Gong, H., Ao, S., Huang, K., et al. (2019). Tool path generation of ultra-precision diamond turning: A state-of-the-art review. *Nanotec. Precis. Eng.*, Vol. 2, 3, 118–124.
4. Yu, D. P., Hong, G. S., & Wong Y. S. (2012). Profile error compensation in fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces. *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, Vol. 52, 1, 13–23.
5. de Podesta, M., May, E. F., Mehl, J. B., et al. (2010). *Metrologia*, Vol. 47, 5, 588.
6. Yu, D. P., Zhong, X., Wong, Y. S., et al. (2011). Profile error compensation in fast tool servo diamond turning of micro-structured surfaces. *Meas. Sci. Technol.*, Vol. 22, 1, 015105.



7. Lee, K. W., Noh, Y. J., Gao, W., et al. (2011). Experimental investigation of an air-bearing displacement sensor for on-machine surface form measurement of micro-structures. *Precis. Eng.*, Vol. 12, 671–678.
8. Kim, H. S., Lee, K. I., Lee, K. M. & Bang, Y. B. (2009). Fabrication of free-form surfaces using a long-stroke fast tool servo and corrective figuring with on-machine measurement. *Int. J. Mach. Tool. Manuf.*, Vol. 49, 12, 991–997.
9. Gao, W., Tano, M., Sato, S., & Kiyono, S. (2006). On-machine measurement of a cylindrical surface with sinusoidal micro-structures by an optical slope sensor. *Precis. Eng.*, Vol. 30, 3, 274–279.
10. Ko, T. J., Park, J. W., Kim, H. S., & Kim, S. H. (2007). On-machine measurement using a noncontact sensor based on a CAD model. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 32, 739–746.
11. Quinsat, Y., & Tournier C. (2012). In situ non-contact measurements of surface roughness. *Precis. Eng.*, Vol. 36, 1, 97–103.
12. Hansen, H. N., Carneiro, K., Haitjema, H., & De Chiffre, L. (2006). Dimensional Micro and Nano Metrology. *CIRP Ann.*, Vol. 55, 2, 721–743.
13. Binnig, G., Rohrer, H., Gerber C., & Weibel E. (1982). Tunneling through a controllable vacuum gap. *Appl. Phys. Lett.*, Vol. 40, 178.
14. Ju, B. F., Chen, Y. L., & Ge, Y. Z. (2011). The art of electrochemical etching for preparing tungsten probes with controllable tip profile and characteristic parameters. *Rev. Sci. Instrum.*, Vol. 82, 1, 013707.
15. Sawano, H., Gokan, T., Yoshioka H., & Shinno, H. (2012). A newly developed STM-based coordinate measuring machine. *Precis Eng.*, Vol. 36, 4, 538–545.
16. Lysenko, O., Grushko, V., Mitskevich, E., & Mamalis, A. (2011). Scanning probe microscopy with diamond tip in tribo-nanolithography. *Symposium SS/TT/UU/VV – Advances in Spectroscopy and Imaging of Surfaces and Nanostructures*. 1318.
17. Novikov, N. V., Nachalnaya, T. A., Ivakhnenko, S.A., et al. (2003). Properties of semiconducting diamonds grown by the temperature-gradient method. *Diamond and Related Materials*, Vol. 12, 10–11, 1990–1994.
18. Chepugov, A. P., Chaika, A. N., Grushko, V. I., et al. G. (2013). Boron-doped diamond single crystals for probes of the high-vacuum tunneling microscopy. *Journal of Superhard Materials*, Vol. 35, 151–157.
19. Wolf, E. L. (1985). *Principles of Electron Tunneling Spectroscopy*. Oxford: Clarendon
20. Grushko, V., Lubben, O., Chaika, A., et al. (2014). Atomically resolved STM imaging with a diamond tip: simulation and experiment. *Nanotechnology*, Vol. 25, 2, 025706.
21. Ju, B. F., Zhu, W. L., Yang, S., & Yang, K. (2014). Scanning tunneling microscopy-based in situ measurement of fast tool servo-assisted diamond turning micro-structures. *Measurement Science and Technology*, Vol. 25, 5, 055004.
22. Bormashov, V. S., Tarelkin, S. A., Buga, S. G., et al. (2013). Electrical properties of the high quality boron-doped synthetic single-crystal diamonds grown by the temperature gradient method. *Diamond and Related Materials*, Vol. 35, 19–23.
23. Pernegger, H., Roe, S, Weillhammer, P., Eremin, V., et al. (2005). Charge-carrier properties in synthetic single-crystal diamond measured with the transient-current technique. *Journal of Applied Physics*, Vol. 97, 073704.
24. Diederich, L., Küttel, O. M., Aebi, P., & Schlapbach, L. (1998). Electron affinity and work function of differently oriented and doped diamond surfaces determined by photoelectron spectroscopy. *Surface Science*, Vol. 418, 1, 219–239.
25. Hölzl, J., & Schulte, F. K. Work function of metals. In: Hölzl J., Schulte F. K., Wagner H. (eds) (1979). *Solid Surface Physics. Springer Tracts in Modern Physics*, Vol 85, Berlin, Heidelberg: Springer.