



Прийнято 23.01.2026. Прорецензовано 27.05.2026. Опубліковано 29.05.2026.

УДК 621.923

DOI: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-88-93

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОЦЕСУ ШЛІФУВАННЯ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ АЛМАЗНИМИ КРУГАМИ НА ОРГАНІЧНИХ І МЕТАЛЕВИХ ЗВ'ЯЗКАХ

Волошкіна І. В. *

Доктор філософії

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61000, Україна

<https://orcid.org/0000-0001-6735-2578>

e-mail: Iryna.Voloshkina@khpi.edu.ua

Пижов І. М.

Доктор технічних наук, професор

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

вул. Кирпичова, 2, м. Харків, 61000, Україна

<https://orcid.org/0000-0002-5551-4725>

e-mail: Ivan.Pyzhov@khpi.edu.ua

Анотація. У роботі розглянуто специфіку самозаточування алмазних шліфувальних кругів, виготовлених на органічних і металевих зв'язках, при обробці полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ). Традиційні методи обробки стикаються зі значними труднощами через співмірну твердість інструмента та оброблюваного матеріалу, що призводить до інтенсивного зношування алмазних зерен і переходу процесу шліфування у режим тертя. Обґрунтовано положення про те, що взаємодія матеріалів зі співмірною твердістю формує особливі умови реалізації механізму самозагострювання алмазоносного шару, який відрізняється від класичних уявлень про руйнування абразиву. Вперше експериментально виявлено періодичний характер процесу самозаточування та визначено його фізичну природу на базі досліджень обробки синтетичних полікристалічних алмазів марки АСБ кругами типу 12А2-45. Показано, що вирішальним чинником цього явища є динамічна силова напруженість у зоні контакту. Обґрунтовано, що наявність періодичності свідчить про потенційні резерви підвищення ефективності процесу шліфування. Для стабілізації процесу та забезпечення постійної ріжучої здатності круга на металевій зв'язці запропоновано використання спеціального пристрою електрохімічного управління рельєфом, який в автоматичному режимі підтримує оптимальну висоту виступання зерен. Доведено, що такий підхід дозволяє на 10–15% зменшити витрату алмазів і підвищити якість оброблюваної поверхні. Також проаналізовано особливості самозагострювання кругів на органічних зв'язках, де пружна деформація зв'язки сприяє виникненню мікротріщин у зернах і формуванню нових ріжучих кромки. На основі отриманих результатів визначено шляхи подальшої оптимізації процесу шліфування із застосуванням сучасних методів 3D-моделювання напружено-деформованого стану в зоні різання.

Ключові слова: полікристалічні надтверді матеріали, процес шліфування, алмазний круг, зв'язка круга, робоча поверхня круга, механізм самозаточування круга, спосіб шліфування, вихідні показники обробки, моделювання процесу шліфування, напружено-деформований стан.

Запропоноване посилання: Волошкіна, І. В. & Піжов, І. М. (2026). Підвищення ефективності процесу шліфування полікристалічних надтвердих матеріалів алмазними кругами на органічних і металевих зв'язках. Науковий вісник ІФНТУНГ, 1(60), 88-93. doi: 10.31471/1993-9965-2026-1(60)-88-93

* Відповідальний автор



Copyright © The Author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)

Вступ

Полікристалічні надтверді матеріали (ПНТМ), зокрема синтетичні полікристалічні алмази (СПА) та щільні модифікації нітриду бору (ЩМНБ), завдяки унікальним фізико-механічним властивостям набули широкого застосування у промисловості. Їх висока твердість і термостійкість роблять можливим використання у виробництві інструментів для високоточних технологічних операцій [1], [2].

Проте значна твердість ПНТМ ускладнює їх механічну обробку, тому найпоширенішим методом є алмазне шліфування.

Аналіз сучасних закордонних і вітчизняних досліджень і публікацій.

У сучасних дослідженнях велика увага приділяється трибологічним умовам шліфування ПНТМ та впливу зв'язки круга на стабільність процесу. Так, у дослідженнях [3] показано, що умови контакту «круг–заготовка» визначають інтенсивність зносу зерен. Також було доведено [4], що використання склов'язаної (vitrified bond) матриці забезпечує мінімальне пошкодження поверхні РСД при шліфуванні. Було розроблено пористі алмазні круги на керамічних зв'язках [5], що підвищують ефективність теплообміну та зменшують зношування. Новітні дослідження також зосереджені на механізмах зношування та методах підвищення стійкості [6], [7].

Крім того, досліджено [8] можливість керування рельєфом робочої поверхні круга за допомогою електрохімічних методів, що дозволяє стабілізувати процес шліфування.

Висвітлення невирішених раніше частин загальної проблем

Однак попри значну кількість робіт, механізм самозаточування алмазних кругів при обробці ПНТМ ще недостатньо вивчений. Це обмежує можливість подальшої оптимізації технології й підвищення ефективності процесу [9], [10], [11].

Формулювання цілей статті

Встановлення фізичних і технологічних закономірностей процесу шліфування ПНТМ алмазними кругами на різних типах зв'язок, визначення особливостей механізму самозаточування зерен і шляхів підвищення ефективності процесу.

Висвітлення основного матеріалу дослідження

Раніше було встановлено, що за умов, коли твердість оброблюваного матеріалу та абразивного зерна є співмірною, класичний механізм самозаточування не реалізується. Зерна не заглиблюються в матеріал, а знімання припуску відбувається через крихке руйнування поверхневих шарів ПНТМ [9], [10], [11], [12]. При цьому гострі кромки швидко зношуються, висота виступання зерен над рівнем зв'язки зменшується, а кількість зерен із площадками зносу зростає. Це спричинює перехід процесу шліфування у режим тертя між двома надтвердими матеріалами – ПНТМ та алмазом, що суттєво знижує ефективність обробки.

Для дослідження процесу шліфування було використано полікристалічний алмаз марки АСБ, оскільки він характеризується високою твердістю та стабільністю фізико-механічних властивостей. АСБ є композитним матеріалом на основі мікропорошків синтетичного алмазу, спечених у металевій матриці (зазвичай на основі кобальту) за умов високого тиску і температури. Це забезпечує унікальні фізико-механічні властивості: мікротвердість матеріалу сягає 50–70 ГПа, а модуль пружності становить 750–850 ГПа, що робить його ідеальним об'єктом для дослідження процесів обробки ПНТМ. Як абразивний інструмент застосовано алмазні круги типу 12А2-45 на металевій і органічній зв'язках, що дозволяє порівняти вплив типу зв'язки на ефективність самозагострювання алмазних зерен. Режими обробки ($V_k = 20$ м/с; $S_{pr} = 1$ м/хв; $P_n = 2,5$ МПа) вибрані на основі попередніх досліджень [13], які забезпечують стабільну роботу системи без термічних пошкоджень зразка.

Для стабілізації рельєфу алмазного круга та підвищення точності обробки використовується пристрій електрохімічного управління, який підтримує постійну висоту виступання абразивних зерен. Це зменшує знос інструмента та забезпечує рівномірність процесу шліфування.

Згідно з представленим рисунком він містить катод 13, робоча поверхня якого складається з двох частин, з'єднаних з корпусом 12 і встановлених на напрямних 11. Між цими частинами катода знаходиться змінний трубчастий елемент 4, який кріпиться до переходника 6. Під час роботи пристрою торцева поверхня трубчастого елемента 4 вводиться в контакт із поверхнею алмазного круга 2 на металевій зв'язці. Електродвигун 8 за допомогою, наприклад, зубчастого блоку 5 і зубчастих шестерень 7

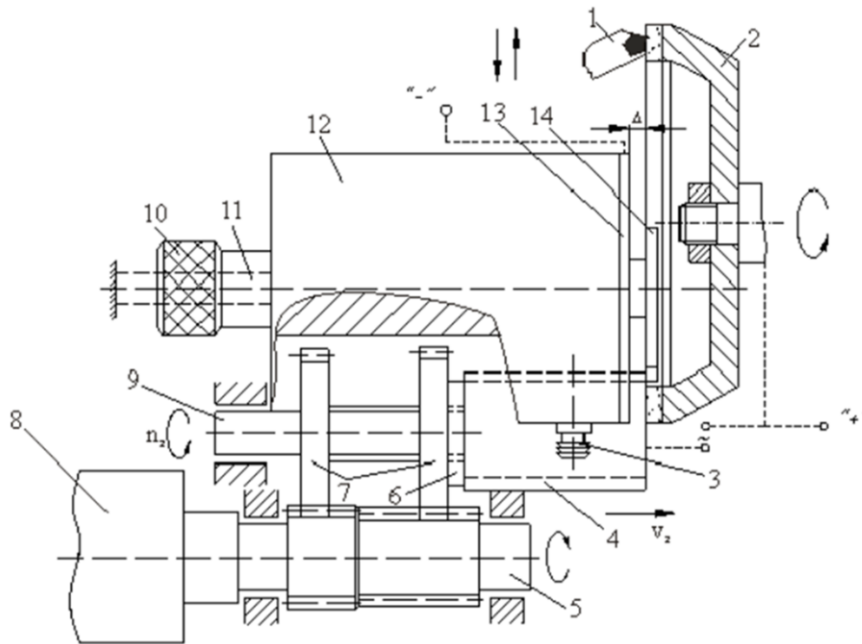


Рисунок 1 – Схема устрою для реалізації електрохімічного впливу на РПК

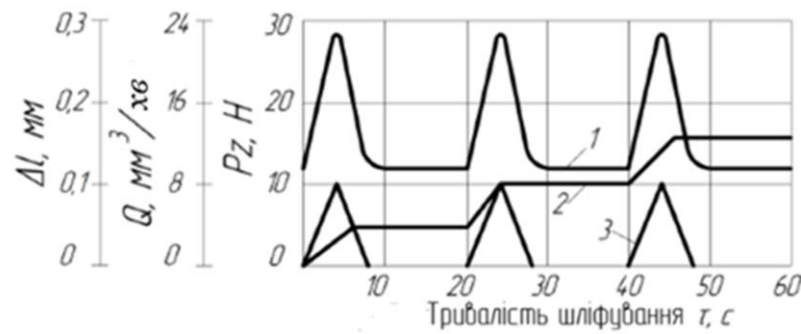
приводить в обертання гвинт 10 і перехідник 6. Оскільки зубчастий блок має поверхні з різним числом зубів, то перехідник 6 обертається швидше за гвинт 10. У результаті трубчастий елемент 4 переміщається в напрямку, перпендикулярному робочій поверхні круга 2. Потім у зазор між катодом 13 і кругом 2 подають електроліт і замикають електричний ланцюг. Обертанням гвинта 10 катод 13 з корпусом 12 встановлюють із зазором D відносно робочій поверхні круга 2. Зазор контролюють за величиною сили струму в ланцюзі управління, що визначає інтенсивність видалення зв'язки, а, отже, і висоту виступання зерен над її рівнем. Переміщення катода починається після того, як штовхач 14 щільно притискається до вільного торця трубчастого елемента 4. Потім вмикається електродвигун 8 приводу пристрою, і він автоматично забезпечує величину зазору D (струму в ланцюзі управління), оскільки в міру зношування круга 2 буде змінюватися і положення трубчастого елемента 4 (який обертається і постійно підшліфовується кругом). При цьому штовхач 14 також переміщається разом з катодом 13 під дією трубчастого елемента 4. Якщо знос круга відсутній, то в результаті підшліфовування трубчастого елемента 4 положення його робочого торця буде незмінним і катод залишиться на місці. Відведення катода 13 від круга 2 здійснюється під дією пружин, встановлених на напрямних 11 після зворотного обертання гвинта 10.

Швидкість переміщення трубчастого елемента повинна бути мінімально можливою, але

дещо більшою, ніж швидкість зносу круга. В іншому випадку міжелектродний зазор між кругом і катодом не буде перебувати в заданих межах. Частота обертання і матеріал у разі використання ЕХ (електрохімічного) управління значення не мають, а довжину трубчастого елемента вибирають таким чином, щоб її вистачило, наприклад, для роботи протягом однієї робочої зміни (наприклад, використовуючи об'ємний знос електрода-інструмента). Таким чином, пристрій буде стабільно підтримувати необхідний рельєф і профіль робочої поверхні круга в автоматичному режимі. В результаті на 10–15% зменшується витрата алмазів, поліпшується якість оброблюваних деталей за рахунок виключення можливості появи коротких замикань між кругом і катодом. Крім того, трубчастий елемент може слугувати додатковим правлячим електродом (при підвищених вимогах до геометрії робочої поверхні круга і т.д.).

Дослідження показали, що під час електрохімічно керованого шліфування спостерігається періодична зміна силових параметрів процесу (рис. 2). Подібна періодичність виявлена і при роботі кругів на органічних зв'язках (рис. 3), проте інтенсивність змін у цьому випадку більша [9]. Це свідчить, що незалежно від типу зв'язки, у зоні контакту формується циклічна зміна умов навантаження, що призводить до самовідновлення ріжучих мікроромок.

Основними умовами реалізації самозаточування є:



1 – Pz; 2 – Δl; 3 – Q

Рисунок 2 – Осцилограми зміни вихідних показників обробки ПНТМ залежно від сили струму в ланцюзі управління та тривалості шліфування

Умови обробки: круг 12A2-45 150x10x3x32 AC6 125/100 A1 ПМ12 100%;
 $V_k = 20$ м/с; $S_{пр} = 1$ м/хв; $P_H = 2,5$ МПа; ($P_y = 50$ Н); $I = 30$ А

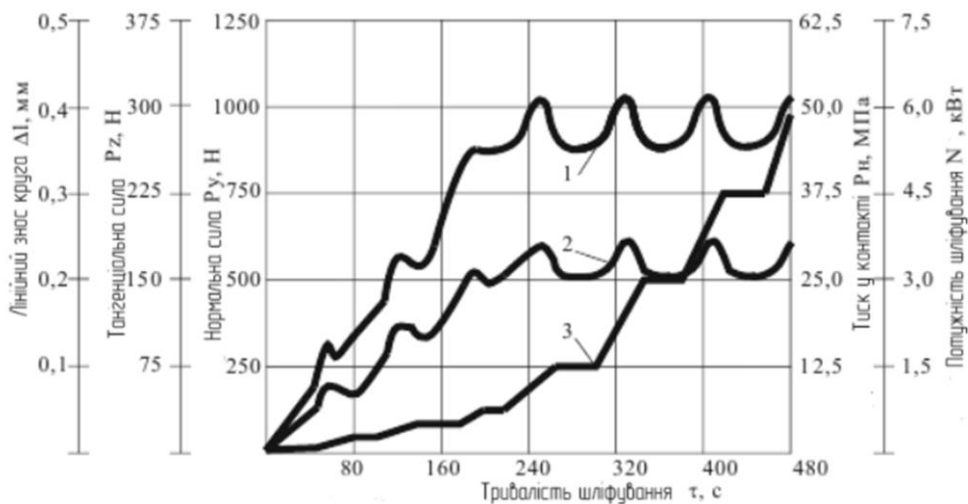
1 - P_y (Н); 2 - P_z (Н); 3 - Δl

Рисунок 3 – Зміна вихідних показників обробки у часі

Умови обробки: круг 12A2-45° 150x10x2x32 AC4 125/100 B2-01 100%, $V_k=20$ м/с, $S_{пр}=1$ м/хв, СОТС-3% розчин Na_2CO_3 у воді. Оброблюваний матеріал - СПА марки АСБ [3] $Sk \approx 20$ мм²

- достатня висота вильоту зерен над рівнем зв'язки;
- оптимальна щільність зернового шару;
- наявність структурних дефектів у зернах, які проявляються при інтенсивній контактній взаємодії.

У кругах на органічних зв'язках алмазні зерна часто повністю занурені у зв'язку, що обмежує їх рухливість і ускладнює прояв структурної недосконалості. Водночас деформація зв'язки під дією навантаження сприяє виникненню мікротріщин у зернах і формуванню нових ріжучих кромки, що забезпечує самовідновлення ріжучої здатності круга.

Але з фізичної точки зору не зовсім зрозуміло, чому в обох випадках процес обробки супроводжується інтенсивним самогострюванням алмазних зерен [9], [10], [11], [12]. Раніше встановлено, що для реалізації самогос-

трювання алмазних зерен при малих значеннях сил різання потрібно створити ряд необхідних умов. Головними з них можна вважати рівень висоти вильоту зерен над рівнем зв'язки і забезпечення необхідної кількості алмазних зерен конкретної марки в контакт з оброблюваним матеріалом (ОМ). Перша умова може бути забезпечена шляхом безперервного електрохімічного видалення металевої зв'язки круга з потрібною швидкістю [12].

При цьому частково вирішується і друга задача, оскільки в силу різного вильоту зерен на робочій поверхні круга (РПК) їх число зменшується (а, отже, і в контакт з ОМ) під час руху в напрямку від рівня зв'язки. Друга задача може бути вирішена встановленням оптимальної характеристики алмазоносного шару. Реалізації процесу самогострювання алмазних зерен значною мірою можуть сприяти й

інші фактори, наприклад, структурна недосконалість алмазних зерен (наявність включень, тріщин і т.д.), які можуть проявитися в умовах високошвидкісної контактної взаємодії зерен з ОМ [10], [11].

При обробці алмазними кругами на органічних зв'язках в режимі їх самозагострювання (на відміну від керованого процесу шліфування) висота вильоту алмазних зерен над рівнем зв'язки дуже мала, або відсутня взагалі [14]. У таких умовах алмазні зерна цілком знаходяться у зв'язці, що щільно їх обтискає і таким чином заважає проявитися структурній недосконалості зерен. У таких умовах в контакті з ОМ знаходиться максимальна кількість зерен. З деяким наближенням цей факт можна вважати поясненням особливості реалізації процесу самозагострювання алмазних зерен при шліфуванні ПНТМ.

Висновки

Встановлено, що періодичність процесу шліфування ПНТМ алмазними кругами обумовлена циклічними змінами силових параметрів контакту, які сприяють самозаточуванню алмазних зерен [9], [10], [11], [12]. Електрохімічне управління рельєфом робочої поверхні

забезпечує стабільність геометрії круга, зменшує витрату алмазів і покращує якість обробки [12]. Для глибшого розуміння фізичної природи самозагострювання доцільно застосовувати 3D-моделювання напружено-деформованого стану в зоні контакту. Це пов'язано з тим, що експериментально зафіксувати мікропроцеси пружної деформації зв'язки та сколювання алмазних зерен безпосередньо в закритій зоні різання практично неможливо. 3D-моделювання дозволить розрахувати локальні напруження на рівні окремого зерна та кількісно визначити умови, за якими відбувається його мікроруйнування та утворення нових ріжучих кромок [15].

Подяки

Дослідження виконано в межах науково-дослідної роботи № 0126U000863 «Конструкторсько-технологічне забезпечення процесів абразивної обробки важкообробних матеріалів підведенням у зону різання додаткових видів енергії».

Конфлікт інтересів

Відсутній.

Список використаних джерел / References

1. McNamara, D., Alveen, P., Carolan, D., Murphy, N., Ivanković, A. Fracture toughness evaluation of polycrystalline diamond as a function of microstructure. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, Vol. 143, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.06.008>
2. Schwander, M., Partes, K. A review of diamond synthesis by CVD processes. *Diamond & Related Materials*, 2011, 20(9):1287–1301. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2011.08.005>
3. Bergs T. Tribological conditions in grinding of polycrystalline diamond. *Diamond & Related Materials*, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2020.108971>
4. Lu Y., Wang B., Rosenkranz A. et al. Nanoscale smooth and damage-free polycrystalline diamond surface ground by coarse diamond grinding wheel. *Diamond & Related Materials*, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.diamond.2022.108971>
5. Kundrák, J., Fedorenko, D.O. Fedorovich, V. O., Fedorenko, E.Y., & Ostroverkh, E.V. Porous diamond grinding wheels on ceramic binders: Design and manufacturing. *Manufacturing Technology*, 2019, Vol. 19, No. 3, pp. 446–454. <https://doi.org/10.21062/ujep/311.2019/a/1213-2489/MT/19/3/446>
6. Li, H., & Chen, X. (2023). Wear characteristics and self-sharpening mechanism of micro-grooved diamond grinding wheel for optical glass. *Journal of Manufacturing Processes*, 101, 796-808. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2023.07.067>
7. Wang, F., Liu, Y., & Zhao, Q. (2024). Advanced grinding technology for polycrystalline diamond: A review on mechanisms and wheel topography. *Tribology International*, 193, 109312. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2024.109312>
8. Grabchenko A.I., Dobroskok V.L., & Fedorovich V.A. (2006). *3D modeling of diamond-abrasive tools and grinding processes*. Kharkiv: NTU "KhPI". 364 p.
9. Kundrák, J., Fedorovich, V., Markopoulos, A. P., Pyzhov, I., & Kryukova, N. (2016). Diamond grinding wheels production study with the use of the finite element method. *Journal of Advanced Research*, 7(6), 1057–1064. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2016.08.003>
10. Kundrák, J., Fedorovich, V., Markopoulos, A. P., Pyzhov, I., & Ostroverkh, Y. (2022). Theoretical Assessment of the Role of Bond Material during Grinding of Superhard Materials with Diamond Wheels. *Machines (MDPI)*, 10(7), 543. <https://doi.org/10.3390/machines10070543>

11. Xu, L., et al. (2023). Fabrication and Polishing Performance of Diamond Self-Sharpening Gel Disc. *Micromachines*, 15(1), 56. <https://doi.org/10.3390/mi15010056>
12. Gołabczak, M., Gołabczak, A., & Tomczyk, B. (2021). Electrochemical and X-ray Examinations of Erosion Products during Dressing of Superhard Grinding Wheels Using Alternating Current and Ecological Electrolytes of Low Concentration of Chemical Compounds. *Materials*, 14(6), 1375. <https://doi.org/10.3390/ma14061375>
13. Zhou, L., Morgan, M. N., & Lin, C. (2022). An investigation of the grinding characteristics of polycrystalline diamond (PCD) tools. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 144(5), 051009. <https://doi.org/10.1115/1.4052345>
14. Kovalenko, V., Kopecký, L., & Piška, M. (2022). Wear mechanisms of diamond grains in grinding wheels with organic bonds when grinding PCD. *Materials*, 15(13), 4658. <https://doi.org/10.3390/ma15134658>
15. Mamalis, A.G., Grabchenko, A.I., Fedorovich, V.A., & Kundrák, J. (2009). Methodology of 3D simulation of processes in technology of diamond-composite materials. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 43(11–12), 1235–1250. <https://doi.org/10.1007/s00170-008-1802-0>

INCREASING THE EFFICIENCY OF THE GRINDING PROCESS OF POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIALS WITH DIAMOND WHEELS ON ORGANIC AND METAL BONDS

Voloshkina I. V.

PhD (Doctor of Philosophy)
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Kyrpychova str. 2, Kharkiv, 61000, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0001-6735-2578>
e-mail: Iryna.Voloshkina@khpi.edu.ua

Pyzhov I. M.

Doctor of Technical Sciences, Professor
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"
Kyrpychova str. 2, Kharkiv, 61000, Ukraine
<https://orcid.org/0000-0002-5551-4725>
e-mail: Ivan.Pyzhov@khpi.edu.ua

Abstract. The paper considers the specifics of self-sharpening of diamond grinding wheels made on organic and metal bonds during the processing of polycrystalline superhard materials (PSHM). Traditional processing methods face significant difficulties due to the comparable hardness of the tool and the processed material, which leads to intensive wear of diamond grains and the transition of the grinding process to a friction mode. The theoretical statement is justified that the interaction of materials with comparable hardness forms special conditions for the implementation of the self-sharpening mechanism of the diamond-bearing layer, which differs from classical ideas about abrasive destruction. For the first time, the periodic nature of the self-sharpening process was experimentally revealed and its physical nature was determined based on studies of processing synthetic polycrystalline diamonds of the ASB brand with 12A2-45 type wheels. It is shown that the decisive factor of this phenomenon is the dynamic power tension in the contact zone. It is justified that the presence of periodicity indicates potential reserves for increasing the efficiency of the grinding process. To stabilize the process and ensure a constant cutting ability of the wheel on a metal bond, the use of a special electrochemical relief control device is proposed, which automatically maintains the optimal height of grain protrusion. It is proved that this approach allows reducing diamond consumption by 10-15% and improving the quality of the processed surface. The features of self-sharpening of wheels on organic bonds are also analyzed, where the elastic deformation of the bond contributes to the appearance of microcracks in the grains and the formation of new cutting edges. Based on the obtained results, ways for further optimization of the grinding process using modern methods of 3D modeling of the stress-strain state in the cutting zone are determined.

Keywords: polycrystalline superhard materials, grinding process, diamond wheel, wheel bond, wheel working surface, wheel self-sharpening mechanism, grinding method, output processing indicators, grinding process modeling, stress-strain state.