

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТАЛОСТІ ПРОЦЕСУ АЛМАЗНОГО ШЛІФУВАННЯ ПОЛІКРИСТАЛІЧНИХ НАДТВЕРДИХ МАТЕРІАЛІВ

Наведено результати теоретико-експериментальних робіт, присвячених розробці і дослідженню прогресивних комбінованих процесів шліфування, що забезпечують сталість процесу обробки важкооброблюваних матеріалів, в тому числі і полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу і щільних модифікацій нітриду бору.

Ключові слова: оброблюваний матеріал, комбінований процес шліфування, алмазний круг, робоча поверхня круга, автономна зона, металева зв'язка круга, направлячий катод, ультразвукові коливання, міжелектродний зазор.

Вступ. На даний момент одним з найбільш використовуваних методів формоутворення лезових інструментів та інших виробів з полікристалічних надтвердих матеріалів (ПНТМ) залишається шліфування алмазними кругами. Цей метод має широкі технологічні можливості і може бути застосований для обробки практично будь-яких конструкційних та інструментальних матеріалів (від надм'яких до надтвердих [1]). У зв'язку з цим пошук додаткових можливостей для підвищення ефективності цього процесу є актуальною проблемою.

Огляд останніх джерел досліджень і публікацій. Особливістю процесу алмазного шліфування ПНТМ є відсутність його сталості, оскільки він характеризується періодичністю зміни значень вихідних показників у часі [1, 2], що пов'язано з нестабільністю процесу самозаточування алмазних зерен круга. В першу чергу це обставина негативно позначається на якості обробленої поверхні. Для забезпечення сталості в часі показників якості процесу формоутворення лезових інструментів з ПНТМ необхідно в максимальному ступені реалізувати на практиці умови сталого протікання процесів їх шліфування. У технічній літературі, орієнтованій на технологію машинобудування [3], вже є сформульоване визначення поняття точності та стабільності технологічних процесів і виконана класифікація їх за видами сталості. При цьому сталість техпроцесу пов'язують в першу чергу з точністю механічної обробки, яка, як відомо, є одним з основних об'єктів уваги технолога. Глибокий аналіз точності технологічного процесу можливий тільки на основі статистичного дослідження того розміру, який формується даним технологічним процесом. По сталості технологічні процеси можна розділити [4] на повністю сталі, сталі по розсіюванню і несталі.

Повністю сталі процеси ті, у яких за час виготовлення виробів (велика вибірка) значення числових характеристик розміру деталі (середнього арифметичного $\bar{X}$ і вибіркового середнього квадратичного відхилення S) залишаються незмінними. Процеси, сталі по розсіюванню зберігають постійною тільки характеристику розсіювання $\bar{X}$, а середнє арифметичне S змінюється. Якщо $\bar{X}$ і S змінюються в часі, то такі процеси називаються несталими. Наведена класифікація технологічних процесів за характером поведінки під час числових характеристик розміру — це класифікація з математичної точки зору [3, 4].

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми. Стосовно до формоутворення лезових інструментів з ПНТМ (і особливо на основі алмазу), що мають унікальні фізико-механічні властивості і, в першу чергу найвищу в природі мікротвердість, говорити про повну сталість по точності складно через аномально високе значення лінійного зносу алмазних кругів. Це не дозволяє при роботі на заздалегідь налагоджених верстатах виконати умову $\bar{X} = \text{const}$. Однак на практиці є багато технологічних процесів сталих по розсію-

ванню, у яких центр групування зміщується в процесі обробки в основному за рахунок зносу ріжучого інструменту, але характеристика розсіювання залишається незмінною. Тому мова може йти про сталість по розсіюванню ($S = \text{const}$). Однак стосовно до якості обробки можна говорити і про повну сталість. Класичний підхід в технології машинобудування полягає в тому, що у виробництві не повинно бути несталих технологічних процесів.

Відомо [3, 4], що довести технологічний процес до сталого стану можна, витримавши наступні вимоги: усунувши нестабільність показників точності верстата; отримавши стабільні по точності і фізико-механічним властивостям заготовки; досягнувши стабільності роботи інструменту. Останнє завдання стосовно обробки надтвердих матеріалів до цього часу не вирішено.

Постановка завдання. У даній роботі мова йде про створення умов для забезпечення сталості вихідних показників процесів шліфування, які є основою проєктованих технологічних процесів виготовлення виробів з ПНТМ. З урахуванням того, що один з основних факторів, які забезпечують технологічну сталість, пов'язаний зі стабільністю роботи алмазного круга, ці умови сформульовані наступним чином: створення умов для забезпечення технологічної сталості процесу шліфування ще на етапі спікання алмазоносного шару круга (який супроводжується високими значеннями силовий і теплової напруженості) шляхом збереження його незмінною характеристики; забезпечення високого рівня зносостійкості різального рельєфу алмазного круга; наявність високоефективних способів управління ріжучим рельєфом і профілем алмазних кругів та пристроїв для їх здійснення; використання автоматичної слідкуючої системи для надійного підтримання сталості (у часі) параметрів, що характеризують стан РПК. Таким чином метою представленої роботи є пошук шляхів стабілізації комбінованого процесу шліфування і вирішення на цій основі проблеми формоутворення лезових інструментів та виробів з ПНТМ.

Основний матеріал і результати. Одним з ефективних напрямків підвищення стабільності роботи алмазних зерен є нанесення на них товстошарових рельєфних металевих покриттів [5]. З метою встановлення фізичних особливостей в зонах контакту покритого зерна зі зв'язкою і оброблюваним ПНТМ і виявлення на цій основі можливих резервів процесу шліфування були виконані теоретико-експериментальні дослідження напружено-деформованого стану (НДС) системи «зв'язка круга – алмазне зерно – рельєфне товстошарове покриття – оброблюваний матеріал» з урахуванням наявності металофази в зерні. Розрахунки показали, що наявність металевих покриттів на алмазному зерні вносить суттєві корективи в НДС цієї системи. Встановлено, що товстошарові рельєфні металеві покриття на алмазних зернах відіграють важливу роль у забезпеченні технологічної сталості. 3D аналіз НДС показав, що їх наявність на алмазному зерні при тих же умовах термосилового навантаження системи істотно зменшує величину напруги на межі «зерно-зв'язка» (рис. 1). Це можна пояснити значним збільшенням поверхні контакту покритого зерна зі зв'язкою круга, що у свою чергу є підтвердженням факту кращого утримання зерен у зв'язці, а, отже, підвищення їх ріжучого ресурсу.

З іншого боку покриття сприяє збереженню цілісності алмазного зерна при спіканні, що в свою чергу є одним з факторів забезпечення стабільності процесу шліфування. Встановлено, що поява площин зносу на вершинах зерен згідно до реалізації явища пристосованості процесу шліфування знижує і згодом практично повністю виключає видалення припуску з ПНТМ [1]. Для забезпечення безперервності процесу самозаточування алмазних зерен в процесі шліфування і високого рівня зносостійкості різального рельєфу алмазного круга необхідно виконати одне з основоположних умов. Воно полягає у забезпеченні безперервного самозаточування круга за умови, що висота вильоту зерен над рівнем зв'язки має мінімально можливе значення. При цьому в контакті з ПНТМ буде знаходитися максимальна кількість алмазних зерен. Іншими словами таким способом можна регулювати величину їх концентрації, а, отже, і зносостійкість різального рельєфу круга. У зв'язку з цим нами запропонована ідея поєднання способів безперервного електрохіміч-

ного видалення зв'язки з робочої поверхні круга (РПК) та ультразвукового впливу на алмазні зерна [6], ефект від якого в умовах високошвидкісної контактної взаємодії двох високотвердих матеріалів проявляється найбільш яскраво. Для забезпечення необхідної відповідності швидкостей зношування різального рельєфу та електрохімічного видалення зв'язки круга, яке можна вважати основоположним у плані практичної реалізації умов, що забезпечують технологічну сталість, необхідно використовувати схему автоматичної підтримки щільності технологічного струму в ланцюзі управління ріжучим рельєфом круга на металевій зв'язці [1]. У той же час ультразвукові коливання дозволяють не тільки виключити утворення на алмазних зернах площин зносу, але і забезпечити безперервне формування на них мікро- і субмікрорельєфу, що в кінцевому підсумку дозволяє забезпечити високу інтенсивність знімання припуску. Таким чином, методологія управління ріжучими властивостями кругів в процесі шліфування повинна базуватися на формуванні і підтримці протягом всього періоду обробки енергетично несталих станів зерен і їх структури шляхом дозованого впливу, спрямованого на запобігання топографічній та структурній пристосованості РПК. Досягти цього простим вибором характеристики кругів та режимів шліфування практично неможливо.

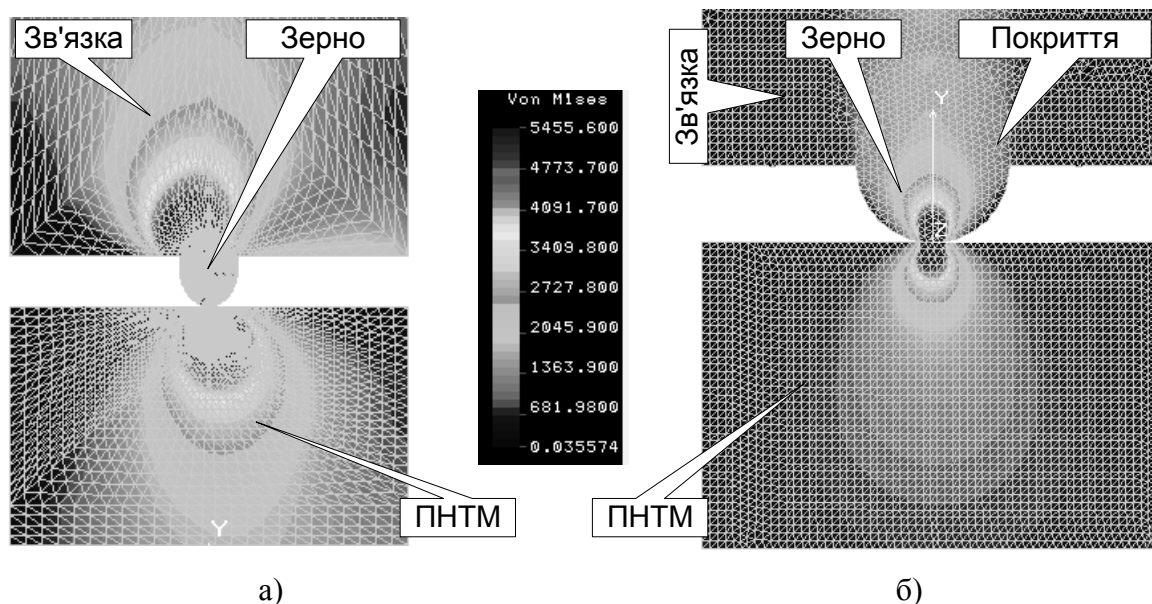


Рис. 1. Візуалізація впливу покриття на 3D НДС в системі:
а) – зерно без покриття; б) – зерно з покриттям на заставі Ni

Примусове формування різального субмікрорельєфа алмазних зерен. Оскільки головною причиною втрати ріжучих властивостей алмазними кругами при шліфуванні ПНТМ є масове утворення на зернах площин зносу, основним способом підвищення ефективності процесу є формування на зернах необхідних параметрів мікро- і субмікрорельєфу. Ідея високої ефективності використання ультразвукових коливань в умовах високошвидкісної контактної взаємодії двох однотвердих тіл (зерен круга і ПНТМ) базується на попередніх дослідженнях [2], у ході яких шліфування виконували з перемінним (з частотою $f < 15$ Гц) тиском в контакт в умовах управління ріжучим рельєфом кругів. Було встановлено, що таких процес шліфування має високі перспективи навіть при низьких (інфразвукових) частотах навантаження, що прикладається. При цьому продуктивність процесу зростає, а значення питомої витрати алмазів і питомої собівартості знижуються в декілька разів. Достатньо позитивні результати були отримані нами навіть при використанні коливань системи «електродвигун приводу головного руху – муфта з пружним елементом – шпindel верстата – шліфувальний круг» (пат. № 81400, Україна).

Дані експериментів свідчать про те, що в умовах взаємодії двох матеріалів, що мають граничну твердість, саме змінне навантаження на алмазні зерна здатне ефективно забезпечувати безперервність процесу їх самозаточування, що, як зазначалося вище, є важливою умовою стабілізації процесу обробки в цілому. У зв'язку з викладеним було висунуто припущення про те, що в умовах безперервного електрохімічного видалення зв'язки круга найбільш доцільно управляти формуванням субмікрорельєфу на зернах круга за допомогою ультразвукових коливань, які можна реалізувати як у зоні обробки, так і в автономній зоні. У першому випадку в якості ударника виступає сам оброблюваний ПНТМ (рис. 2), а у другому спеціальний інструмент-ударник, наприклад, з міцними і дрібними алмазними зернами.

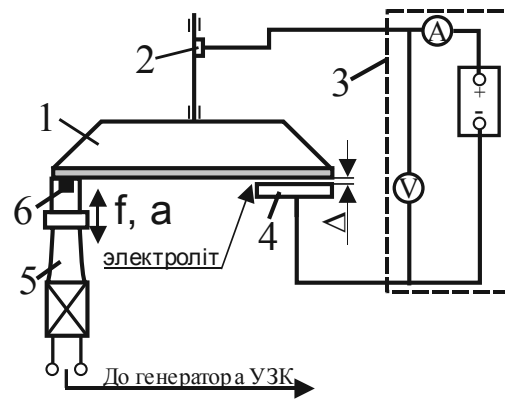


Рис. 2. Схема способу ультразвукового алмазного шліфування з управлінням РПК:
1 – алмазний круг; 2 – струмознімач; 3 – джерело живлення; 4 – правлячий катод; 5 – пристрій ультразвукової правки; 6 – ПНТМ

Нами встановлено, що найбільш ефективним представляється спосіб ультразвукового шліфування з поперечними коливаннями, які створюють додаткові ударні навантаження в контакті «зерно – ПНТМ». Це забезпечує процес формування на поверхнях зносу зерен ріжучого мікро- і субмікрорельєфу, а, отже, інтенсифікує процес знімання припуску. Природно, такий спосіб ефективний тільки в тих випадках, коли додаткова енергія ультразвуку, що надходить до зони шліфування, не буде призводити до утворення дефектного шару в оброблювальному матеріалі. Численні модельні експерименти показали, що формування на зернах мікро- та субмікрорельєфу є фактором підвищення як коефіцієнта використання алмазних зерен (тому що алмазне зерно залишається активно працюючим протягом більш тривалого часу), так і продуктивності процесу шліфування ПНТМ в цілому.

Експериментально встановлено, що стосовно до обробки ПНТМ на основі алмазу використання енергії коливань в поєднанні з безперервною електрохімічною правкою круга дозволяє до семи разів підвищити продуктивність шліфування при одночасному зниженні питомої витрати алмазів круга до десяти разів. Це пояснюється тим, що в роботі бере участь гранично можлива кількість зерен круга, а оптимальне значення сили в ланцюзі управління зсувається в більшу сторону (з 55 до 100 А).

Виконані дослідження дозволили розробити автоматичну систему безперервної підтримки різального рельєфу та профілю круга в необхідному стані практично на протязі всього періоду його роботи. Це особливо важливо у випадку застосування складнопрофільних кругів.

Особливістю електрохімічного способу (рис. 3) є те, що в його основу закладено п'ять принципів, спрямованих на досягнення максимально можливої точності профілювання РПК: 1 – застосування струмопровідних алмазних кругів, внаслідок чого забезпечується можливість реалізації малих значень міжелектродного зазору; 2 – використання кругів із заздалегідь сформованим профілем, що дозволяє вважати площу в зоні управління величиною постійною; 3 – забезпечення рівноважного міжелектродного зазору перед початком електрохімічної дії на РПК за рахунок правки (корекції) профілю катода робочим кругом на зворотній полярності; 4 – використання датчика електропровідності ЗОТС (електроліту) для урахування можливого факту зміни електропровідності електроліту в процесі формоутворення РПК; 5 – використання автоматичної слідкуючої системи.

Новизна способу полягає в тому, що перед формоутворенням струмопровідного круга (що вже має заданий точний профіль) включають «зворотну полярність (круг — «—»,

а катод — «+») джерела живлення 6 і з допомогою цього круга підправляють робочу поверхню катода, попередній профіль якої близький до свого остаточного стану. При цьому режими корегування профілю катода 2, встановленого на напрямних 5, аналогічні робочим режимам правки круга 1. Це дозволяє вирішити два важливі завдання: по-перше, отримати необхідний профіль катода (який розрахунковим методом отримати досить складно) з одночасною компенсацією різного роду похибок (наприклад, похибки установки), а по-друге, забезпечити рівноважний МЕЗ.

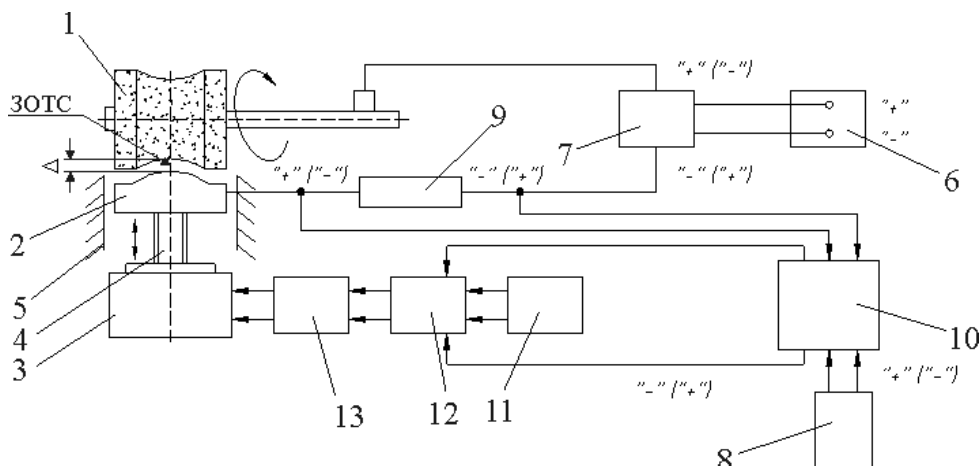


Рис. 3. Принципова схема шліфування ПНТМ з одночасним електрохімічним профілюванням РПК:

- 1 – круг; 2 – катод; 3 – реверсивний електродвигун; 4, 5 – механізм передачі; 6 – джерело живлення; 7 – реверсивний перемикач; 8 – шунт; 10 – джерело стабілізованої напруги; 11 – датчик електропровідності електроліту; 12 – суматор; 13 – електронний підсилювач

Потім здійснюють робочий процес правки круга на «прямій» полярності, для чого використовується реверсивний перемикач 7. Особливістю цього способу є те, що, по-перше, у процесі правки катода встановлюється МЕЗ, що має однакову електричну провідність, а, отже, і однакову щільність струму практично в будь-якій його точці. По мірі зносу круга цей зазор підтримується незмінним за допомогою реверсивного електродвигуна 3, керованого блоком автоматики, за допомогою пари «гвинт-гайка», що також не допускає можливості підшліфовки профілю робочої поверхні катода в результаті кругом.

Ще однією важливою особливістю даного способу є те, що в електричну схему введений датчик електропровідності електроліту 11, що дозволяє істотно підвищити надійність процесу. Сигнали від шунта 9 і джерела стабілізованої напруги 8 порівнюються в пристрої 10. Результуючий сигнал надходить до суматора 12, де коригується залежно від величини сигналу з датчика 11. Це продиктовано тим, що як вже зазначалося вище, зі зміною температури електроліту змінюється його електропровідність, а, отже, і щільність технологічного струму. В іншому випадку звичайний блок автоматики відреагує на цей факт зміною величини МЕЗ, що в свою чергу може порушити точність профілю круга. Результуючий сигнал з блоку 12 посилюється підсилювачем 13 і в залежності від полярності цього сигналу, електродвигун обертається в одну або іншу сторону, підтримуючи (по мірі зносу круга і зміни електропровідності електроліту) величину МЕЗ в заданих межах. Практика використання запропонованого способу у виробничих умовах підтвердила його високу ефективність.

Висновки. Таким чином, проведені дослідження дозволили в значній мірі вирішити проблему обробки важкооброблюваних матеріалів, в тому числі і полікристалічних надтвердих матеріалів на основі алмазу і щільних модифікацій нітриду бору. Надалі представляють інтерес дослідження напружено-деформованого стану системи «ПНТМ – алмазне зерно – зв'язка круга» в умовах накладення ультразвукових коливань з метою встановлення на цій основі оптимальних режимів шліфування.

Література

1. Грабченко, А.И. Расширение технологических возможностей алмазного шлифования [Текст] / А.И. Грабченко. – Х: Вища шк., 1985. – 184 с.
2. Грабченко, А.И. Повышение режущей способности токопроводящих алмазных кругов в комбинированных процессах шлифования ПСТМ [Текст] / А.И. Грабченко, И.Н. Пыжов, Д.М. Алексеенко // Вісник Сумського держ. ун-ту. Серія «Технічні науки». – 2011. – Т. 1. – № 1. – С. 105–116.
3. Гаврилов, А.Н. Точность производства в машиностроении и приборостроении [Текст] / А.Н. Гаврилов, Н.А. Бородачев, Р.М. Абдрашитов и др.; под ред. А.Н. Гаврилова. – М.: Машиностроение, 1973. – 567 с.
4. Сизый, Ю.А. Основы научных исследований в технологии машиностроения [Текст]: учеб. пособие / Ю.А. Сизый, Д.В. Сталинский. – Х: УкрГНТЦ «Енергосталь», САГА, – 2007. – 212 с.
5. Грабченко, А.И. Особенности использования микропорошков алмаза в кругах на металлических связках [Текст] / А.И. Грабченко, В.Л. Доброскок, И.Н. Пыжов, В.А. Федорович // Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем: зб. наук. пр. / Донбаська держ. машинобудівна акад. – Краматорськ: ДДМА, 2010. – Вип. 27. – С. 3–11.
6. Кумабэ, Д. Вибрационное резание [Текст]: пер. с яп. С.Л. Масленникова / Под ред. И.И. Портнова, В.В. Белова. – М.: Машиностроение, 1985. – 424 с.

© В.О. Федорович, І.М. Пижов, Є.О. Бабенко, В.Г. Клименко

В.А. Федорович, д.т.н., проф., И.Н. Пыжов, д.т.н., проф., Е.А. Бабенко, асп.

Национальный технический университет «ХПИ»

В.Г. Клименко, ст. преп.

Полтавский национальный технический университет им. Юрия Кондратюка

ОБЕСПЕЧЕНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ ПРОЦЕССА АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ СВЕРХТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены результаты теоретико-экспериментальных работ, посвященных разработке и исследованию прогрессивных комбинированных процессов шлифования, обеспечивающих устойчивость процесса обработки труднообрабатываемых материалов, в том числе и поликристаллических сверхтвердых материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитридов бора.

Ключевые слова: обрабатываемый материал, комбинированный процесс шлифования, алмазный круг, рабочая поверхность круга, автономная зона, металлическая связка круга, правящий катод, ультразвуковые колебания, межэлектродный зазор.

V.A. Fedorovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, I.N. Pyzhov, Doctor of Technical Sciences, Professor, Ye.A. Babenko, Post-graduate

National Technical University «Kharkyv Polytechnic Institute»

V.G. Klimenko, Senior Lecturer

Poltava National Technical Yuri Kondratyuk University

DIAMOND GRINDING POLYCRYSTALLINE SUPERHARD MATERIALS

Presents the results of theoretical and experimental works devoted to the development and research of progressive combined sanding process, to ensure the stability of the processing of composite materials, including polycrystalline superhard materials based on diamond and dense modifications boron nitride.

Keywords: the processed material combined the process of grinding, diamond circle, the working surface of the circle, Autonomous zone, metal bunch round, the ruling cathode, ultrasonic vibrations, spark plug gap.