

УДК 621.9

Вадим Ступницький, д.т.н., проф.; Тарас Оленюк

Національний університет «Львівська політехніка», Україна

ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАМІНИ ОПЕРАЦІЇ КООРДИНАТНОГО ШЛІФУВАННЯ НА ОПЕРАЦІЮ ЧИСТОВОГО РОЗТОЧУВАННЯ ПІДЧАС ОБРОБЛЕННЯ ГАРТОВАНОЇ ЗАГОТОВКИ

Анотація. У тексті обґрунтовано заміну координатного шліфування чистовим розточуванням під час обробки точних отворів у загартованих деталях. Показано, що сучасні верстати з ЧПК та надтверді інструментальні матеріали можуть забезпечити необхідну точність і якість поверхні. Такий підхід є особливо доцільним для одиничного й дрібносерійного виробництва, оскільки зменшує витрати, кількість установок і залежність від спеціалізованого обладнання та висококваліфікованого персоналу.

Ключові слова. Лезова обробка, шліфування, точність, чистове розточування.

Vadym Stupnytskyi, Taras Oleniuk

JUSTIFICATION FOR REPLACING COORDINATE GRINDING WITH FINISH BORING DURING THE MACHINING OF HARDENED WORKPIECES

Abstract. The text justifies replacing coordinate grinding with finish boring during the machining of precision holes in hardened parts. It is shown that modern CNC machines and superhard tool materials can ensure the required accuracy and surface quality. This approach is particularly suitable for single-unit and small-batch production, as it reduces costs, the number of setups, and dependence on specialized equipment and highly skilled grinders.

Keywords. Edge machining, grinding, accuracy, finish boring.

У сучасному машинобудуванні обробка точних отворів належить до найбільш відповідальних технологічних операцій, оскільки саме отвори часто виконують роль базових, напрямних або спряжуваних поверхонь у деталях машин, пресформах, штампах, корпусних елементах, плитах, матрицях та інших високоточних виробках. Особливо складною є обробка отворів у загартованих заготовках, коли після термічної обробки необхідно забезпечити не лише заданий діаметр, а й високу точність форми, співвісність, перпендикулярність, циліндричність, шорсткість поверхні та точні міжцентрові відстані. Традиційно такі завдання розв'язуються із застосуванням координатного шліфування, яке тривалий час вважалося одним із основних методів фінішної обробки високоточних отворів у загартованих деталях [1], [2].

Координатне шліфування забезпечує високу точність обробки завдяки поєднанню абразивного різання, прецизійної кінематики верстата та можливості точної прив'язки інструмента до системи координат деталі. Цей метод особливо ефективний у випадках, коли необхідно отримати отвори з дуже малими допусками, складним просторовим розташуванням або високими вимогами до геометричної точності. Сучасні системи координатного шліфування здатні забезпечувати мікронний рівень точності позиціонування та високі показники шорсткості, що підтверджує їхню доцільність у високоточному інструментальному виробництві. Водночас цей метод має суттєві організаційні, економічні та технологічні обмеження, які особливо відчутні в умовах одиничного та дрібносерійного виробництва.

Запропонована заміна операції координатного шліфування операцією чистового розточування ґрунтується на сучасному розвитку лезової обробки загартованих сталей. Якщо раніше обробка матеріалів після термічного зміцнення майже автоматично

асоціювалася з абразивними методами, то сьогодні завдяки появі надтвердих інструментальних матеріалів, зокрема кераміки, CBN та PCBN, значна частина фінішних операцій може виконуватися лезовим інструментом. У літературі цей напрям часто розглядається як *hard machining* або *hard turning* – обробка загартованих матеріалів різанням, яка в багатьох випадках дає змогу замінити або скоротити обсяг шліфувальних операцій [3], [4]. Зокрема, сучасні PCBN-інструменти широко застосовуються для сухої обробки загартованих сталей твердістю приблизно 50–60 HRC і вище, а тверде точіння розглядається як економічно ефективна альтернатива шліфуванню для фінішної та напівфінішної обробки.

У межах одиничного та малосерійного виробництва, особливо під час виготовлення пресформ, штампів, технологічного оснащення, ремонтних деталей і спеціальних елементів машин, економічна доцільність використання координатного шліфування не завжди є очевидною. Основна проблема полягає в тому, що координатно-шліфувальні верстати є вузькоспеціалізованим і дорогим обладнанням. Їх ефективне використання можливе лише за умови стабільного завантаження високоточними роботами. У реальних виробничих умовах України така умова виконується не завжди. Значна частина наявного парку координатно-шліфувальних верстатів є морально та фізично застарілою, часто походить ще з радянського періоду, має обмежені можливості автоматизації, зношені напрямні, шпиндельні вузли та системи відліку. Сучасні імпорتنі координатно-шліфувальні верстати мають дуже високу вартість, а їх придбання для підприємств із нерегулярним потоком таких замовлень є економічно ризикованим.

Окремо слід відзначити кадровий чинник. Координатне шліфування вимагає високої кваліфікації оператора, значного практичного досвіду, розуміння особливостей абразивного інструменту, режимів шліфування, припусків, теплових деформацій, правки круга та точного базування деталі. Помилки на цій операції можуть призвести до браку вже практично готової деталі, яка пройшла термічну обробку та попередні етапи виготовлення. У сучасних умовах дефіциту кваліфікованих робітників така залежність від вузькопрофільного спеціаліста є суттєвим недоліком класичного технологічного маршруту.

Альтернативою є виконання фінішної обробки отворів після термічної обробки методом чистового розточування на сучасному фрезерному або багатоцільовому оброблювальному центрі з ЧПК. Суть такого підходу полягає в тому, що після термообробки деталей встановлюється на оброблювальному центрі, де за одну установку можуть бути виконані фінішне розточування точних отворів, чистова обробка базових поверхонь, фрезерування площин, зняття мінімальних припусків, а також контрольні або коригувальні переходи. Це дає змогу значно скоротити кількість установок, зменшити похибки базування та підвищити загальну технологічну стабільність процесу.

Важливою перевагою чистового розточування є те, що точність взаємного розташування отворів у цьому випадку забезпечується не ручною прив'язкою на координатно-шліфувальному верстаті, а системою координат верстата з ЧПК. Сучасні оброблювальні центри, оснащені кульково-гвинтовими передачами з попереднім натягом, жорсткими напрямними, термокомпенсацією та оптичними або лінійними системами відліку, здатні забезпечувати дуже високу точність позиціонування. Застосування лінійних еncoderів зменшує вплив теплового розширення кульково-гвинтової передачі на положення робочого органу, що є важливим чинником для точного позиціонування в координатній обробці.

Сучасні розточувальні різці зі змінними пластинами з PCBN, кераміки або високоякісних твердих сплавів дають змогу виконувати обробку загартованих сталей

твердістю до 60–62 HRC. При цьому чистове розточування може забезпечувати стабільну геометрію отвору, достатньо низьку шорсткість поверхні та високу повторюваність розміру. У порівнянні зі шліфуванням, лезова обробка має вищу продуктивність, простішу автоматизацію та краще інтегрується у загальний цикл обробки на верстаті з ЧПК. У працях, присвячених обробці загартованих сталей, зазначається, що тверде точіння та споріднені методи лезової обробки можуть замінювати шліфування в тих випадках, коли вимоги до шорсткості, точності форми та стану поверхневого шару не перевищують технологічних можливостей процесу [3]–[6].

Особливо переконливою така заміна є тоді, коли отвір не потребує наднизької шорсткості рівня дзеркального шліфування, а основними вимогами є точний діаметр, правильна форма та точне координатне розташування. У цьому випадку чистове розточування дозволяє отримати необхідний результат без залучення окремого координатно-шліфувального верстата. Крім того, на оброблювальному центрі можна виконати попередню пробну обробку, вимірювання, корекцію радіуса інструмента або траєкторії та повторний фінішний прохід. Такий підхід добре відповідає логіці сучасного гнучкого виробництва, де важливо не лише досягти точності, а й забезпечити швидку переналаджованість, скорочення допоміжного часу та зменшення кількості міжопераційних переміщень деталі.

Суттєвою технологічною перевагою є також відсутність додаткової похибки повторного базування. У класичному маршруті деталь після попередньої механічної обробки та термічного зміцнення повинна бути встановлена на координатно-шліфувальний верстат, точно вивірена, зорієнтована та прив'язана до системи координат. Кожна така операція створює ризик появи похибки базування або похибки прив'язки. Якщо ж фінішна обробка отворів і прилеглих поверхонь виконується на одному оброблювальному центрі в межах однієї установки, то похибки взаємного розташування поверхонь істотно зменшуються.

Ще одним аргументом на користь чистового розточування є зменшення проблем, пов'язаних із засалюванням абразивного інструменту. Після термічної обробки на внутрішніх поверхнях отворів можуть залишатися окалина, нагар або інші продукти термічного впливу. Під час шліфування такі забруднення можуть спричинити інтенсивне засалювання абразивного круга, погіршення різальної здатності, підвищення температури в зоні різання та нестабільність якості поверхні. У ряді випадків це вимагає попереднього очищення або піскоструминної обробки внутрішніх поверхонь. При використанні розточування ця проблема зменшується, оскільки лезовий інструмент працює за іншим механізмом зняття припуску, а невеликі залишки поверхневого забруднення можуть бути видалені під час попереднього або напівчистового проходу.

З економічного погляду переваги чистового розточування є ще більш очевидними. Оброблювальні центри з ЧПК сьогодні значно поширеніші, ніж координатно-шліфувальні верстати. Вони є універсальним обладнанням і можуть використовуватися для широкого спектра операцій: фрезерування, свердління, розточування, різьбонарізання, координатної обробки, виготовлення складних контурів та обробки деталей різної номенклатури. Тому навіть у разі відсутності постійного потоку високоточних отворів таке обладнання не простоює, а може бути завантажено іншими виробничими завданнями. Координатно-шліфувальний верстат, навпаки, має значно вужчу сферу застосування, що ускладнює його економічне обґрунтування для малого або середнього підприємства.

Водночас слід зазначити, що заміна координатного шліфування чистовим розточуванням не є універсальною для всіх випадків. Якщо до отвору висуваються надзвичайно високі вимоги щодо шорсткості, круглості, циліндричності або якщо

необхідно отримати поверхню з мінімальним рівнем мікронерівностей, координатне шліфування може залишатися доцільним або навіть незамінним. Також слід враховувати жорсткість системи «верстат — пристрій — інструмент — деталь», довжину вильоту розточувальної оправки, діаметр отвору, стабільність припуску, твердість матеріалу після термообробки та можливість виникнення вібрацій. Для глибоких або малодіаметральних отворів із великим відношенням довжини до діаметра розточування може бути ускладненим через недостатню жорсткість інструмента. Тому рішення про заміну операції повинно прийматися на основі аналізу конкретної деталі, допусків, матеріалу, твердості, вимог до поверхні та наявного обладнання.

У практичному технологічному процесі доцільно передбачати таку схему: після термічної обробки залишати мінімальний, але стабільний припуск на фінішне розточування; застосовувати жорстку розточувальну оправку мінімально можливої довжини; використовувати пластини з PCBN або іншим матеріалом, придатним для обробки загартованої сталі; виконувати попередній контроль твердості; забезпечувати стабільне базування деталі; проводити контроль першої деталі та, за необхідності, вводити корекцію інструмента.

Загалом сучасні напрями розвитку українського машинобудування, особливо в умовах повномасштабної війни, дефіциту кваліфікованих кадрів, обмеженості інвестиційних ресурсів і потреби у швидкому виготовленні технологічного оснащення, диктують необхідність ширшого застосування гнучких, продуктивних і менш капіталомістких методів обробки. У таких умовах технологічні рішення повинні оцінюватися не лише за максимально можливою точністю, а й за критеріями доступності обладнання, собівартості, часу виконання, універсальності, кадрового забезпечення та ремонтпридатності виробничої системи.

Отже, для одиничного та дрібносерійного виробництва, зокрема під час виготовлення пресформ, штампів і високоточних деталей технологічного оснащення, заміна операції координатного шліфування операцією чистового розточування є технічно та економічно обґрунтованою. Такий підхід дозволяє використовувати поширені оброблювальні центри з ЧПК, скорочувати кількість установок, зменшувати похибки базування, підвищувати продуктивність і знижувати залежність від унікального обладнання та вузькопрофільних спеціалістів. При правильному виборі інструменту, режимів різання та умов базування чистове розточування загартованих отворів може бути ефективною альтернативою координатному шліфуванню в тих випадках, коли вимоги до точності та якості поверхні відповідають технологічним можливостям лезової фінішної обробки.

Перелік посилань

1. S. Malkin and C. Guo, Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives, 2nd ed. New York: Industrial Press, 2008.
2. I. D. Marinescu, W. B. Rowe, B. Dimitrov, and I. Inasaki, Tribology of Abrasive Machining Processes, 2nd ed. Norwich, NY: William Andrew, 2012.
3. J. P. Davim, Ed., Machining of Hard Materials. London: Springer, 2011.
4. J. P. Davim, Ed., Modern Machining Technology: A Practical Guide. Cambridge: Woodhead Publishing, 2011.
5. W. Grzesik, Advanced Machining Processes of Metallic Materials: Theory, Modelling and Applications, 2nd ed. Amsterdam: Elsevier, 2017.
6. G. Byrne, D. Dornfeld, and B. Denkena, "Advancing cutting technology," CIRP Annals, vol. 52, no. 2, pp. 483–507, 2003.