

В.В. Гусев, к.т.н., доц.
Л.П. Калафатова, д.т.н., доц.
Донецький національний технічний університет

ВПЛИВ СТАНУ РОБОЧОЇ ПОВЕРХНІ АЛМАЗНОГО ІНСТРУМЕНТА НА ПРОЦЕС ШЛІФУВАННЯ КРИХКИХ НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

Досліджено залежності складових сил шліфування від об'єму віддаленого матеріалу в умовах алмазного шліфування кераміки та ситалів. Виявлено, що затуплення алмазних кругів супроводжується зростанням нормальної складової сил різання, що призводить, у свою чергу, до зростання дефектності поверхні, яка формується. Видані рекомендації щодо призначення технологічних параметрів процесу шліфування та правки кругів, виходячи із забезпечення мінімуму дефектності поверхневого шару виробів.

Аналіз технологічних процесів механічної обробки виробів з крихких неметалевих матеріалів (КНМ), в тому числі технічного скла, ситалів, керамік, кристалю [1, 2] свідчить про значний обсяг напівчистових і чистових операцій: шліфування, полірування, алмазної доводки. Тривалість фінішних операцій визначається глибиною та структурою дефектного шару, який створюється на попередніх технологічних переходах. Причиною цього є підвищені вимоги до якості оброблюваної поверхні, бо експлуатаційні характеристики виробів із цих матеріалів безпосередньо залежать від дефектності сформованого при обробці поверхневого шару деталей. Таким чином, ефективність процесів механічної обробки КНМ пов'язана з підвищенням продуктивності чорнових операцій при умовах забезпечення дефектного шару такої глибини та структури, які гарантують мінімальну тривалість фінішних операцій.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень [3] свідчать про те, що, враховуючи особливості механізмів диспергування крихких матеріалів при абразивній обробці, такі параметри дефектності оброблюваної поверхні, як розмір, щільність, глибина проникнення дефектів, значною мірою визначаються рівнем та спрямованістю силової дії на матеріал при різанні. В свою чергу, силові характеристики процесу шліфування залежать від схеми та режимів обробки, типу та властивостей технологічного середовища, що використовується, технологічних та експлуатаційних характеристик алмазних інструментів і методів відновлення їх різальних властивостей.

Одним із факторів, які суттєво змінюють ситуацію в зоні різання, є стан робочої поверхні алмазних кругів і їх різальна спроможність, яка постійно змінюється під час обробки КНМ. Так, наприклад, при чорновому шліфуванні ситалів [4] алмазні круги через 5–10 хвилин експлуатації повністю втрачають свої різальні властивості. Стан робочої поверхні алмазних кругів визначається геометричною формою верхівок зерен і щільністю розподілу зерен по глибині робочого шару інструмента. Вихідними даними для визначення початкового стану є характеристики інструмента та умови його правки. Однак у літературі відсутній системний підхід до встановлення взаємозв'язків між характеристиками алмазного інструмента, його зносом за різних умов шліфування, силами різання, способами відновлення різальних властивостей інструмента та їх впливом на дефектність поверхневого шару виробів. Виходячи з цього, метою досліджень, результати яких надані в цій роботі, було визначення впливу стану робочої поверхні кругів на сили різання та якість поверхні, що формується при обробці.

При дослідженнях впливу зносу кругів на сили різання реалізовувалася схема плоского однопрохідного шліфування периферією круга 1A1 250×76×20 АС–6 125/100–4–М2–01. Перед початком експерименту круг заправлявся електроерозійним способом або способом з використанням вільного абразиву [5] з контролем його вихідного стану методом профілографування [6]. При шліфуванні зразки встановлювалися на динамометричному столі та замірялися тангенціальна P_t й нормальна P_n складові сили різання з їх наступною реєстрацією за допомогою підсилювача 8АНЧ–7М і самописця НЗ38–4П. Для зіставлення результатів експерименту сили різання приводилися до одиниці ширини зразка, тобто визначалися питомі значення сил різання на одиницю їх ширини.

Робоча поверхня круга однорідна в різних напрямках. У зв'язку з цим приймають кількість зерен на одиницю робочої поверхні інструмента n , сталими для всієї її глибини ΔR від найбільш виступаючого зерна до зв'язки. Розподіл верхівок зерен по висоті u робочої поверхні круга є нерівномірним. Відповідно до експериментальних результатів вихідний стан та зміни різновисотності верхівок алмазних зерен при обробці КНМ адекватно описуються розподілом Вейбула зі щільністю $f(u)$, що дорівнює:

$$f(u) = \frac{\delta}{\lambda} \cdot u^{\delta-1} \cdot e^{-\frac{u^\delta}{\lambda}}, \quad (1)$$

де δ і λ – параметри розподілу ($\delta > 0$, $\lambda > 0$), які в роботі визначалися експериментально за результатами профілографування круга безпосередньо на верстаті. Вони відображають результат попередньої силової дії на зерна робочої поверхні круга при правці та різанні.

При обробці кераміки та ситалів зі зростанням матеріалу припуску, який видалено, сили різання зростають (рис. 1). Зміни сил різання визначаються процесами, що відбуваються на робочій поверхні алмазного круга.

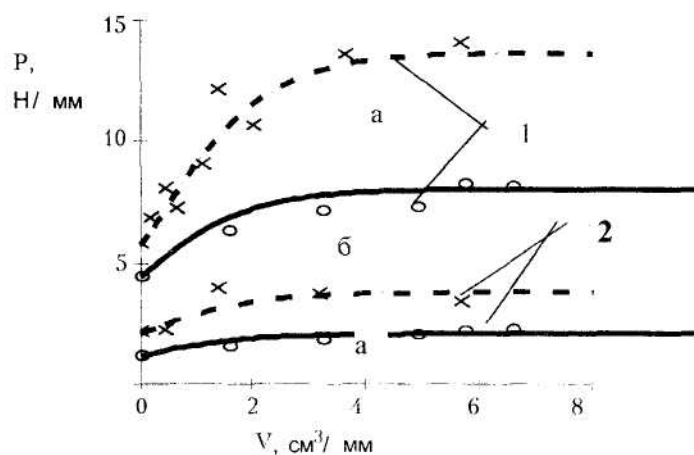


Рис. 1. Вплив об'єму видаленого матеріалу V (в см^3 на одиницю ширини шліфувального круга) на зміну питомих нормальних (1) і тангенціальних (2) складових сил різання кераміки на основі Al_2O_3 (а) і ситалу AC-370 (б) з режимами різання $V_k = 24$ м/с, $V_d = 6$ м/хв, $t = 0,1$ мм.

При шліфуванні в результаті взаємодії вихідної поверхні круга з оброблюваним матеріалом відбувається формування його робочої поверхні. Під час роботи алмазного круга мають місце наступні процеси, які впливають на його працездатність і стан робочої поверхні круга: стирання зерен об оброблювану поверхню з утворенням площадок зносу на їх поверхні (ступінь зносу залежить від оброблюваного матеріалу); крихке руйнування зерен, а також їх абразивний знос під впливом часток окремих алмазних зерен, які кришаться; виривання окремих алмазних зерен із зв'язки; вишліфовування зв'язки стружкою, яка разом із мастильно-охолоджуючим середовищем утворює абразивний потік (або вилучення її за допомогою електроерозійної, електрохімічної, механічної дії під час правки), що супроводжується випаданням зерен.

Знос кругів зазвичай не визначається тільки одним із наведених вище механізмів. При шліфуванні КНМ алмазні зерна зношуються під впливом майже всіх перерахованих причин. Дослідження поверхні площадок зносу на алмазі при обробці ситалу на металографічному мікроскопі ММР показало (рис. 2), що механізм зносу зерен комбінований: абразивно-дифузійний. На фоні блискучої гладкої поверхні площадок зносу можна бачити сліди проорювання – абразивної дії уламків зруйнованих алмазних зерен та твердих включень оброблюваного матеріалу. Останні проникають у задню поверхню алмаза та спричиняють зріз. На мікрофотографії чітко прослідковуються борозни, які з'явилися під впливом такого механізму дії часток матеріалу на розігріту поверхню площадок зносу. На задній поверхні алмаза

виникають значні нормальні напруження, які є причиною розтріскування поверхневих шарів алмаза з утворенням своєрідної мозаїки.

На поверхні зерна також можна побачити знос із чітко вираженими сколами. Відбувається зникнення окремих ділянок площадок зносу в результаті сколів кромки алмазного зерна. Руйнуванню за рахунок мікросколів та викрипування передують зародження та розвиток тріщин у зерні. В результаті різних видів зносу відбувається зміна параметрів розподілу Вейбула (1), які характеризують різновисотність зерен на робочій поверхні круга. Дані про це наведені в табл. 1. Деякі фізико-механічні характеристики оброблюваних матеріалів – кераміки на основі Al_2O_3 та ситалу АС-370: коефіцієнт напруження першого типу K_{I_2} відповідно 4,2 МПа·м^{0,5} та 2,1 МПа·м^{0,5}; мікротвердість HV – відповідно 14,9 ГПа та 8 ГПа.

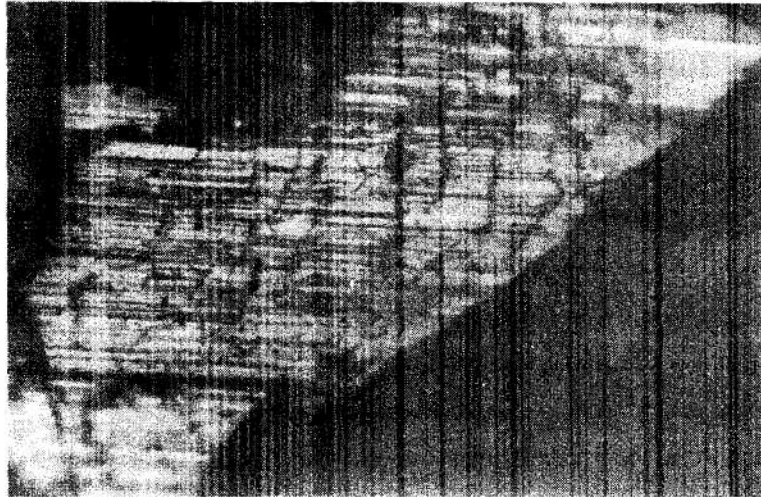


Рис. 2. Площадка зносу алмазного зерна на крузі
1A1 200×20×5×32 A 315/250-4-M1 (× 450), оброблюваний матеріал – ситал АС-418

Вихідні значення параметрів розподілу Вейбула ($\delta=2,1$; $\lambda=1648$ із середньоквадратичним відхиленням $\sigma(\delta)=0,05$; $\sigma(\lambda)=100$) після правки круга електроерозійним способом у процесі роботи поступово зменшуються. Щільність розподілу алмазних зерен по висоті набуває лівосторонньої асиметрії ($\delta=1,58$; $\sigma(\delta)=0,01$ і $\lambda=84$; $\sigma(\lambda)=10$). З наростанням зносу шліфувального круга зменшується висота робочого шару (ΔR) із 75 мкм до 35 мкм ($\sigma(\Delta R)=2$) і середня кількість алмазних зерен на одиницю робочої поверхні круга (n_s – з 21 шт./мм² до 17 шт./мм² ($\sigma(n_s)=1,5$).

Згідно з методикою роботи [7] було визначено кількість активних алмазних зерен і середній перетин зрізу на них для вихідного стану робочої поверхні (після правки круга) та після віддалення 8 см³/мм ситалу. Результати розрахунків показали, що кількість активних в міру зростання об'єму віддаленого матеріалу збільшується приблизно на 20 %. Це пов'язано із зміною характеру розподілу верхівок зерен на робочій поверхні круга. При цьому середні перетини зрізу на зерні зменшуються на 40 %. Остання обставина в сукупності з утворенням площадок зносу призводить до збільшення сил різання при шліфуванні КНМ. Особливо це стосується нормальної складової сили різання. При шліфуванні за жорсткою схемою, яка відрізняється постійними значеннями кінематичних параметрів процесу різання (рис. 1), складова P_N , що спрямована безпосередньо в оброблювану поверхню і визначає в основному рівень її дефектності, збільшується більш ніж в 3 рази.

В умовах реалізації пружної схеми візного торцевого шліфування ситалу АС-418 при шліфуванні кругом, який правився абразивним бруском [8] з постійним тиском 0,4 МПа, зниження продуктивності в 16 разів відбувається вже через 10 хв. роботи. Через 15–20 хв. процес шліфування при постійному тиску взагалі припиняється. Для його поновлення необхідно більш ніж в 3 рази підвищити зусилля притиску круга до зразка. Зразки, при шліфуванні яких з різним тиском і при різних різальних властивостях були досягнуті однакові значення продуктивності, були досліджені за параметрами дефектності з використанням розробленої методики [9].

Таблиця

Зміни параметрів робочої поверхні круга 1A1 200×20×32 AC6-4-M2-01-125/100 при плоскому врізному шліфуванні периферією круга ситалів і кераміки з режимами різання $V_k = 24$ м/с; $V_d = 6$ м/хв; $t = 0,1$ мм

Оброблюваний матеріал	Об'єм віддаленого матеріалу V , см ³ /мм	Питомі сили різання, Н/мм		Глибина РПК ΔR , мкм	Лінійний знос ΔL , мкм	Щільність зерен n , шт/мм ²	Параметри розподілу закону Вейбула		
		P_N	P_T				δ	λ	χ^2
Кераміка на основі Al ₂ O ₃	0	4,1	2,0	60	0	20	2,07	1220	4,14
	0,2	4,54	2,27	45	30	17,7	1,73	217	7,17
	0,7	5,3	3,15	35	51	15,8	1,69	234	7,1
	1,2	6,1	4,1	35	65	16,4	1,65	192	3,9
	2,2	13,6	6,3	35	108	16,5	1,61	130	1,68
Ситал АС-370	0	4,0	1,2	70	0	20,5	2,1	1648	8,68
	1,5	6,4	1,6	37	31	15	2,09	835	5,2
	3,2	7,2	1,9	40	81	15,8	2,01	513	5,35
	4,9	7,4	2,15	40	107	16,4	1,86	227	3,01
	5,8	7,8	2,25	40	125	16,5	1,71	190	2,1
	6,6	7,65	2,3	35	143	16,8	1,58	84	2,89

Аналіз мікрофотографій дефектної поверхні зразків ситалу показав, що втрата кругом різальної спроможності в міру затуплення не супроводжується суттєвими змінами картини дефектності обробленої поверхні за умови постійного тиску в зоні шліфування. Проте підвищення тиску, яке пов'язане з необхідністю підтримки продуктивності процесу шліфування на заданому рівні при роботі зношеним кругом супроводжується різким зростанням дефектності обробленої поверхні. В міру зростання тиску змінюється характер дефектів. Вони стають більш масивними (розміри одиничних дефектів досягають 200 мкм і більше), концентруються в основному вздовж борозн – канавок, які залишили на поверхні зразка зношені зерна інструмента, досягаючи глибини прошкнення $h_d = 180-200$ мкм. Отримані результати свідчать про необхідність введення в технологічний процес обробки відповідальних виробів з КНМ матеріалів, в першу чергу з ситалів, операції правки алмазного інструмента.

Однак ефективність різних способів правки суттєво різняться. Розроблений спосіб правки алмазних кругів вільним абразивом [5] відрізняється універсальністю відносно фізико-механічних характеристик зв'язки інструментів і дозволяє керувати величиною максимального виступу зерен над рівнем зв'язки за рахунок направленої дії на зв'язку круга по всій площині міжзернового простору. При цьому механізм формування мікрорел'єфу робочої поверхні пов'язаний з процесом вишліфовування зв'язки з міжзернового простору та заміною зношених зерен з одночасним утворенням нових різальних кромки на затуплених зернах у процесі їх контактів – ударів з правлячим інструментом (вільним абразивом).

Досліджувалися спосіб правки абразивними брусками, який найбільш розповсюджений на підприємствах, що займаються обробкою КНМ; і спосіб правки вільним абразивом. Обидва варіанти правки реалізовувалися на робочих частотах обертання шпинделя станка, для способу з використанням вільного абразиву була розроблена спеціальна установка. Її конструкція передбачає можливість подачі абразивної суспензії в зазор між кругом, що правиться, та притиром. Змінюючи розмір зазору та зернистість шліфувального порошку, можна забезпечити потрібну величину міжзернового простору в алмазозносному шарі круга, при якому досягається потрібний рівень продуктивності процесу абразивної обробки.

Кількісний аналіз профілографів робочої поверхні кругів для обох способів правки показав наступне. Правка вільним абразивом у порівнянні з правкою абразивними брусками забезпечує більш розвинений профіль різальної поверхні круга (в середньому виступ алмазних зерен в 1,5 раза більше при зростанні на 30 % кількості активних зерен на одиниці довжини траси профілографування). Процес відновлення мікропрофілю круга йде більш інтенсивно.

Як наслідок – умови роботи кругів, правлених двома наведеними способами, не однакові. При шліфуванні цими кругами з однаковим тиском через те, що кількість зерен, їх конфігурація, величина виступу над рівнем зв'язки різні, зусилля на кожному окремому зерні та, як наслідок, рівень їх силової дії на оброблювану поверхню буде також різним, що вплине на картину дефектності поверхневого шару оброблюваного матеріалу (рис. 3).

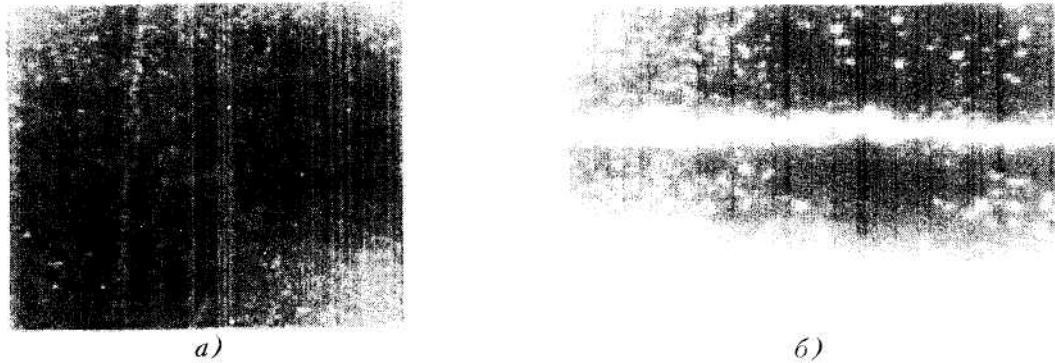


Рис. 3. Мікрофотографії дефектної поверхні зразків ситала АС-418 при шліфуванні кругами 12 А2 200×76×20×5 АС6 100/80-4-М2-01 з різальною здатністю, яка забезпечує однакову продуктивність процесу, правленими: 1 – вільним абразивом; 2 – абразивними брусками. Тиск в зоні обробки $p = 1,2$ МПа; глибина проникнення дефектів $h_d = 60$ мкм ($\times 100$).

Правка абразивним бруском деформує поверхні абразивних зерен, знижує кількість робочих зерен, збільшує площадки контакту окремих зерен із поверхнею обробки при загальному зниженні їх кількості, наслідком чого є погіршення умов різання. При цьому зростають навантаження на оброблюваний матеріал і його дефектність. Дефекти концентруються вздовж рисок, залишених на поверхні зразка плоскими поверхнями зерен інструмента (рис. 3, б). Їх середні розміри знаходяться в діапазоні 70–100 мкм і проникають на глибину до 200 мкм. При використанні кругів, правлених вільним абразивом (рис. 3, а), оброблювану поверхню зразків на всіх глибинах залягання відрізняє висока щільність і малі розміри окремих дефектів (до 20 мкм), які наближуються за розміром до дефектів структури ситалу. В цьому випадку дефектна область – результат взаємодії багатьох гострих алмазних зерен з поверхнею ситалу. Наслідком цього є рівномірний розподіл питомого тиску вздовж поверхні контакту круга та зразка при зменшенні його рівня. Глибина залягання дефектів, які з'явилися внаслідок обробки, не перебільшує 120 мкм, що в 1,5 раза менше у порівнянні з результатами обробки кругами, які були заправлені абразивними брусками.

Таким чином, можна зробити висновок про те, що на операціях напівчистового та чистового шліфування виробів з КНМ, де остаточно формується дефектна структура порушеного обробкою шару матеріалу, з метою зниження трудомісткості наступних довідних операцій бажано передбачати періодичну правку алмазних кругів. При цьому ефективність способу правки, яка використовується, безпосередньо пов'язана з рівнем якості оброблюваної поверхні виробів.

ЛІТЕРАТУРА:

1. Калафатова Л.П. Резание стекломатериалов // Машиностроение: Энциклопедия / Технология изготовления деталей машин. – М.: Машиностроение. – 2000. – С. 142–145.
2. Хрульков В.А., Тародей В.А. Механическая обработка деталей из керамики и ситаллов. – Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1975. – 185 с.
3. Калафатова Л.П. Влияние технологической наследственности на эффективность процессов механической обработки стекломатериалов // Инженерный журнал: Справочник. – М.: Машиностроение. – 1997. – № 9. – С. 7–11.
4. Бурмистров В.В., Калафатова Л.П., Феник Л.Н. Основы разработки рациональных технологических процессов обработки изделий из материалов на основе стекла //

- Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов. – Донецк: ДонГТУ. – 1994. – Вып. 1. – С. 25–36.
5. А.с. 1839393 СССР, МКИ В 24 В 53/00. Способ правки абразивного инструмента / В.В. Бурмистров, А.В. Байков, А.Н. Емельянов, Л.П. Калафатова, А.Д. Хроменко (СССР). – № 4765299. Заявлено 14.12.89. Опубл. 30.12.93. – Бюл. – № 47–48.
 6. *Гусев В.В., Молчанов А.Д.* К определению микрогеометрии рабочей поверхности шлифовального круга в статике // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – Харків: ХДТУСГ. – 2002. – Вип. 10. – Підвищення надійності відновлювальних деталей машин. Фізичні та комп'ютерні технології. – С. 379–384.
 7. *Гусев В.В.* Влияние на качество поверхностного слоя технической керамики износа алмазного шлифовального круга // Надійність інструмента та оптимізація технологічних систем: Збірник наукових праць. – Краматорськ: ДДМА. – 2002. Вип. 12. – С. 234–241.
 8. *Калафатова Л.П.* Влияние эффективности способа правки инструмента на дефектность шлифованной поверхности изделий из ситаллов // Резание и инструмент в технологических системах: Междунар. научно-техн. сб. – Харьков: ХГПУ. – 1999. – Вып. 54. – С. 122–124.
 9. *Калафатова Л.П.* Диагностика дефектности обработанной поверхности технических ситаллов // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Междунар. сб. научн. трудов. – Донецк: ДонГТУ. – 1997. – Вып. 4. – С. 66–75.

ГУСЄВ Володимир Владіленович – кандидат технічних наук, доцент кафедри металорізальних верстатів та інструментів Донецького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- підвищення ефективності процесів абразивної обробки крихких неметалевих матеріалів типу технічних та конструкційних керамік, ситалів.

КАЛАФАТОВА Людмила Павлівна – доктор технічних наук, професор кафедри металорізальних верстатів та інструментів Донецького національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- підвищення ефективності технологічних процесів абразивної обробки крихких неметалевих матеріалів типу технічного скла, ситалів, керамік, кристалу.

Подано 11.08.2003