<u>Шероховатость Si₃N₄-керамики</u>

Д. т. н. В. В. Кузин (🖾), к. т. н. С. Ю. Фёдоров , д. т. н. С. Н. Григорьев

ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

УДК 666.3:546.28'171]:[621.923.4:621.921.34

ВЗАИМОСВЯЗЬ РЕЖИМОВ АЛМАЗНОГО ШЛИФОВАНИЯ С СОСТОЯНИЕМ ПОВЕРХНОСТИ Si₃N₄-КЕРАМИКИ

Приведены результаты исследования влияния режимов плоского шлифования алмазными кругами на состояние поверхности Si₃N₄-керамики. Установлена взаимосвязь глубины шлифования, продольной и поперечной подач с шероховатостью, волнистостью, морфологией обработанной поверхности и структурой поверхностного слоя Si₃N₄-керамики.

Ключевые слова: шлифование, Si₃N₄-керамика, шероховатость, волнистость, морфология поверхностного слоя керамики.

введение

ерспективным материалом конструкционного и инструментального назначения является керамика на основе Si₃N₄ [1–4]. Разработка технологии серийного изготовления деталей и инструментов из этой керамики предполагает выявление степени воздействия разных параметров алмазного шлифования на состояние их поверхностного слоя [5, 6]. Практическая важность решения этой научной задачи связана с тем, что алмазное шлифование является финишной операцией в технологическом процессе их изготовления, которая формирует шероховатость, волнистость и морфологию рабочих поверхностей [7-10]. Неблагоприятные условия контакта деталей из Si₃N₄-керамики, имеющих поверхностные дефекты, с сопрягаемыми деталями в узлах приводит к локальным разрушениям керамики под действием эксплуатационных нагрузок и сокращению ресурса ответственных изделий [11-13]. Поэтому выявление закономерностей влияния алмазного шлифования на состояние поверхности Si₃N₄-керамики является актуальной научнотехнической задачей. В настоящей работе предпринята попытка комплексного исследования влияния параметров режима шлифования на состояние поверхности Si₃N₄-керамики. Настоящая статья является продолжением работ [14-16].

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Основные положения экспериментальной методики приведены в статье [14]. В работе использовали



образцы из керамики инструментального назначения РКС22 (система Si₃N₄-Y₂O₃-Al₂O₃-TiC), обладающей следующими свойствами: предел прочности при изгибе $\sigma_{_{H3r}}$ 790 МПа, трещиностойкость K_{Ic} 7,5 МПа·м^{1/2}, плотность ρ 3,4 г/см³ и твердость *HRA* 94. Эта керамика имеет высокоплотную структуру, которую формируют удлиненные зерна диаметром до 0,6 и длиной до 3 мкм (рис. 1). Керамические образцы шлифовали при следующих режимах: продольная подача $S_{np} = 5 \div 15$ м/мин, поперечная подача $S_{non} = 0,5 \div 1,5$ мм/ход, глубина шлифования $t = 0,01 \div 0,05$ мм. Скорость круга во всех экспериментах оставалась постоянной, $v_{\text{кр}} = 30$ м/с.

Состояние обработанной поверхности оценивали параметрами шероховатости *Ra* и волнистости *Wa*, а также ее морфологией. Шероховатость измеряли в продольном и поперечном направлении, волнистость оценивали в продольном направлении с использованием прибора «Hommel Tester Т8000». Морфологию обработанной поверхности и состояние поверхностного слоя изучали на ска-



Рис. 1. Структура керамики РКС22

нирующем электронном микроскопе VEGA3 LMN. Структуру поверхностного слоя керамики анализировали после скалывания фрагмента образца, которое производили методом индентирования с использованием алмазной пирамиды.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате исследования влияния режимов шлифования на параметры *Ra* шероховатости и Wa волнистости обработанной поверхности Si₃N₄керамики установлено, что интенсификация режима приводит к их возрастанию. При увеличении $S_{\text{пр}}$ в диапазоне 5–15 м/мин ($S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход, t = 0,04 мм) Ra возрастает от 0,09 до 0,15 и от 0,48 до 0,55 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно. Увеличение S_{пол} в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход (S_{пр} = 10 м/мин, *t* = 0,04 мм) приводит к росту Ra от 0,1 до 0,16 и от 0,45 до 0,54 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно. При увеличении t в диапазоне 0,01-0,05 мм ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, $S_{\text{поп}} = 1$ мм/ход) Ra возрастает от 0,1 до 0,14 и от 0,43 до 0,47 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно. Параметр Wa обработанной поверхности увеличивается от 1,2 до 2,5 мкм, от 0,9 до 2,1 мкм и от 0,8 до 2,1 мкм при повышении $S_{\rm np}$ в диапазоне 5-15 м/мин, S_{пол} в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход и t в диапазоне 0,01-0,05 мм соответственно.

Выявлено существенное влияние параметров режима алмазного шлифования на морфологию поверхности образцов РКС22. В качестве примера на рис. 2 показаны характерная морфология поверхности и структура поверхностного слоя этих образцов после шлифования. Видно, что поверхность образована пластически деформированным слоем, морфологический рисунок которого определяется равномерным чередованием пологих впадин 1 и выступов 2 (см. рис. 2, а). На обработанной поверхности присутствуют также области локального разрушения 3 керамики, которые в отдельных случаях соединяются в цепочки, «чешуйчатые» наплывы 4, трещины 5 (продольные и поперечные) со сглаженным устьем и углубления 6. Области локального разрушения керамики и цепочки, образованные этими областями, как правило, локализуются преимущественно на выступах, и их дно формирует исходная структура керамики.

Покрывающий поверхность керамики после шлифования пластически деформированный слой толщиной t, образовавшийся в результате высокотемпературного нагрева и последующего быстрого охлаждения, имеет сложную структуру (см. рис. 2, б). Он состоит из двух слоев толщиной t_1 и t_2 , граница между которыми не имеет явных признаков, кроме хорошо выраженных трещин 7. Наружный слой 8 толщиной t₁ до 0,5 мкм имеет достаточно рыхлую структуру из-за окисления нитрида кремния (наличие большого объема кислорода в этом слое подтверждено результатами исследования его химического состава). Модифицированный (внутренний) слой 9 толшиной t₂ до 3 мкм сформирован зернами вытянутой формы, большая ось которых ориентирована нормально к обработанной поверхности. С интенсификацией режимов шлифования глубины t, t₁ и t₂ увеличиваются.

В качестве примера существенного влияния параметров режима алмазного шлифования на морфологию поверхности образцов РКС22 на рис. З показаны микрофотографии, характеризующие влияние поперечной подачи. Видно, что после шлифования при $S_{\text{поп}} = 0,5$ мм/ход ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, t = 0,04 мм) на поверхности образуются впадины и выступы шириной до 8 мкм, а малые значения глубины впадин и высоты выступов придают поверхности сглаженный рельеф. На этой поверхности практически отсутствуют области локального разрушения керамики, а на отдельных выступах имеются чешуйчатые наплывы размером до 5 мкм. Толщина t_1 внешнего слоя не превышает 0,6 мкм, а толщина t_2 модифицированного слоя 1,2 мкм.

После шлифования Si_3N_4 -керамики при $S_{non} = 1$ мм/ход ($S_{np} = 10$ м/мин, t = 0,04 мм) ширина впадин и выступов увеличивается до 10 мкм, возрастает также размер чешуйчатых наплывов до 9 мкм. На выступах имеются многочисленные области локального разрушения керамики шириной до 8 мкм, причем в отдельных случаях отмечено их



Рис. 2. Морфология поверхности и структура поверхностного слоя Si₃N₄-керамики после шлифования

68

Рис. 3. Влияние S_{пол} на морфологию шлифованной поверхности керамических образцов. ×2000

«слияние» в цепочки длиной до 50 мкм, что придает этой поверхности более выраженный рельеф по сравнению с предыдущим режимом шлифования. Толщина t₁ увеличивается до 1 мкм, а t₂ до 2,5 мкм.

Увеличение поперечной подачи до $S_{\text{поп}} = 1,5$ мм/ход ($S_{\text{пр}} = 10$ м/мин, t = 0.04 мм) при шлифовании приводит к образованию наиболее развитой поверхности на образцах РКС22. Во-первых, это связано со значительным увеличением числа областей локального разрушения керамики и, соответственно, общей площади, занимаемой ими. В этом случае практически все образовавшиеся участки локального разрушения керамики соединены в цепочки, длина которых увеличивается до 70 мкм. Во-вторых, заметно увеличиваются ширина впадин и выступов (до 12 мкм) при одновременном возрастании их глубины и высоты, а также размер чешуйчатых наплывов. Установлено, что при шлифовании при этом режиме образуется пластически деформированный слой толщиной t до 6 мкм, причем t_1 составляет 1,5–2 мкм, а t_2 до 4 мкм.

Продольная подача также существенно влияет на морфологию шлифованной поверхности образцов керамики РКС22. После шлифования при $S_{\rm np} = 5$ м/мин ($S_{\rm non} = 1$ мм/ход, t = 0,04 мм) поверхность образцов имеет сглаженный рельеф за счет минимальной глубины и высоты впадин и выступов, ширина которых не превышает 6 мкм. На этой поверхности обнаружены отдельные области локального разрушения керамики, не объединенные в цепочки. Толщина t_1 не превышает 0,5 мкм, а толщина t_2 1 мкм.

После шлифования образцов керамики РКС22 при $S_{\rm np} = 10$ м/мин ($S_{\rm non} = 1$ мм/ход, t = 0,04 мм) рельеф поверхности имеет более выраженный рисунок за счет увеличения ширины впадин и выступов до 9 мкм, а также глубины и высоты. Размеры продольных рисок и наплывов не изменяются, однако увеличивается ширина углублений до 8 мкм с одновременным объединением их в цепочки длиной до 40 мкм. На поверхности образуются немногочисленные и не связанные между собой области локального разрушения керамики. Толщина t_1 не превышает 0,9 мкм, а t_2 1,5 мкм.

При шлифовании образцов с наибольшей продольной подачей S_{пр} = 15 м/мин (S_{пол} = 1 мм/ход, t = 0,04 мм) развитость рельефа поверхности Si₃N₄керамики значительно возрастает за счет увеличения ширины впадин и выступов до 12 мкм, а также их глубины и высоты соответственно. На поверхности имеются чешуйчатые наплывы размером до 15 мкм, а также области локального разрушения керамики, образующие цепочки длиной 50 мкм. Толщина t_1 увеличивается до 1,2 мкм, t_2 до 2,5 мкм.

Глубина шлифования меньше влияет на морфологию обработанной поверхности Si₃N₄керамики по сравнению с другими параметрами режима. Установлено, что при шлифовании при t = 0,01 мм (S_{пр} = 10 м/мин, S_{поп} = 1 мм/ход) формируется поверхность со сглаженным рельефом, который характеризуется присутствием пологих впадин и выступов шириной до 5 мкм. На поверхности имеются изолированные области локального разрушения и чешуйчатые наплывы размером 6 мкм. Исходную структуру керамики покрывает слой со следующими параметрами: t₁ до 0,4 мкм, t₂ до 0,9 мкм. При увеличении глубины шлифования до t = 0,03 мм ($S_{пр} = 10$ м/мин, $S_{поп} = 1$ мм/ход) возрастает ширина впадин и выступов до 7 мкм с одновременным увеличением их глубины и высоты. Число и размеры чешуйчатых наплывов практически не изменяются. Длина цепочек, образованных областями локального разрушения керамики, достигает 30 мкм. Толщина t₁ не превышает 0,9 мкм, t₂ 2 мкм.

После шлифования с наибольшей глубиной t = 0,05 мм ($S_{np} = 10$ м/мин, $S_{non} = 1$ мм/ход) толщина t_1 не превышает 1,2 мкм, а t_2 2,3 мкм. Ширина впадин и выступов достигает 7 мкм с одновременным повышением их глубины и высоты. Увеличение числа n размеров чешуйчатых наплывов не изменяется по сравнению с предыдущим режимом шлифования. При этом развитость рельефа несколько возрастает за счет роста числа образовавшихся областей локального разрушения керамики, соединяющихся в цепочки длиной до 40 мкм.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что увеличение $S_{\rm np}$ от 5 до 15 м/мин, $S_{\rm non}$ от 0,5 до 1,5 мм/ход и t от 0,01 до 0,05 мм при плоском алмазном шлифовании Si₃N₄-керамики (РКС22) приводит к возрастанию Ra в 1,4–1,6 раза в продольном направлении и в 1,1–1,2 раза в поперечном. При этом *Wa* возрастает в 2, 2,3 и 2,6 раза в указанных диапазонах соответственно. Морфология шлифованной поверхности образцов РКС22 характеризуется чередующимися впадинами и выступами, причем на поверхности выступов формируются области локального разрушения керамики, соединяющиеся в вытянутые цепочки. На поверхности впадин также образуются чешуйчатые наплывы. Параметры режима шлифования существенно влияют на размеры и число этих элементов морфологического рисунка поверхности Si₃N₄-керамики. Ин-

Библиографический список

1. **Zhu, Xinwen.** Effects of processing method and additive composition on microstructure and thermal conductivity of Si_3N_4 ceramics / Xinwen Zhu, You Zhou, Kiyoshi Hirao // J. Europ. Ceram. Soc. — 2006. — Vol. 26. — P. 711–718.

2. *Zheng, Guangming.* Thermal shock and thermal fatigue resistance of Sialon-Si₃N₄ graded composite ceramic materials / *Guangming Zheng, Jun Zhao, Chao Jia* [et al.] // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. -2012. - Vol. 35. - P. 55–61.

3. **Кузин, В. В.** Инструментальное обеспечение высокоскоростной обработки резанием / В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, М. Ю. Федоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2005. — № 9. — С. 46-50.

Kuzin, V. V. Tooling for high-speed cutting / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, M. Yu. Fedorov* [et al.] / Russian Engineering Research. — 2005. — Vol. 25, № 9. — P. 20–25.

4. **Döblinger**, **M**. Structural and compositional comparison of Si_3N_4 ceramics with different fracture modes / *M*. Döblinger, *G*. *B*. Winkelman, *C*. Dwyer [et al.] // Acta Materialia. — 2006. — Vol. 54. — P. 1949–1956.

5. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37-41.

Kuzin, V. V. Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.

6. *Xie, Zong-Han.* Role of microstructure in the grinding and polishing of α -sialon ceramics / *Zong-Han Xie, Robert J. Moon, Mark Hoffman* [et al.] // J. Europ. Ceram. Soc. — 2003. — Vol. 23. — P. 2351–2360.

7. *Kuzin, V.* Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / *V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov //* Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vols. 752/753. – P. 402–406.

8. **Кузин, В. В.** Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на основе нитрида кремния / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2006. — № 8. — С. 19–24.

Kuzin, V. V. Technology for machining highrefractory ceramic parts based on silicon nitride / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2006. — Vol. 47, \mathbb{N} 4. — P. 204–208.

9. *Kuzin V.* A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / *V. Kuzin //* Key Engineering Materials. Precision Machining. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.

тенсификация режима шлифования приводит к увеличению ширины впадин и выступов, их глубины и высоты, а также числа и размеров чешуйчатых наплывов и размеров областей локального разрушения керамики. При шлифовании Si₃N₄керамики образуется пластически деформированный слой, толщина которого увеличивается при интенсификации режима.

* * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности.

10. *Liu, Wei.* Effects of grinding parameters on surface quality in silicon nitride grinding / *Wei Liu, Zhaohui Deng, Yuanyuan Shang, Linlin Wan //* Ceram. Int. — 2017. — Vol. 43, Part B. — P. 1571–1577.

11. **Кузин, В. В.** Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2003. — № 12. — С. 41-45.

Kuzin, V. V. Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 32–36.

12. *Huang, Changming.* Study on friction characterization and wear-resistance properties of Si_3N_4 ceramic sliding against different high-temperature alloys / *Changming Huang, Bin Zou, Yanan Liu* [et al.] // Ceram. Int. — 2016. — Vol. 42. — P. 17210–17221.

 Кузин, В. В. Влияние режимов алмазного шлифования на триботехнические характеристики керамики на основе оксида алюминия / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, А. Е. Селезнев // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 475-481.

Kuzin, V. V. Effect of conditions of diamond grinding on tribological behavior of alumina-based ceramics / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, A. E. Seleznev* // Journal of Friction and Wear. — 2016. — Vol. 37, № 4. — P. 371–376.

14. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al₂O₃-керамики / *В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров* // Новые огнеупоры. — 2016. — № 7. — С. 65-70.

Kuzin, V. V. Roughness of high hardness ceramic correlation of diamond grinding regimes with Al₂O₃-ceramic surface condition / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov //* Refractories and Industrial Ceramics. — 2016. — Vol. 57, № 4. — P. 388–393.

15. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности Al₂O₃-TiCкерамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 9. — С. 63-68.

16. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности керамики на основе диоксида циркония / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров // Новые огнеупоры. — 2016. — № 11. — С. 60-65.

> Получено 27.12.16 © В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев, 2017 г.

70