

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 666.3:546.281'261]:[621.923.4:621.921.34

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА КРОМОК КОЛЕЦ ПАРЫ ТРЕНИЯ ИЗ КАРБИДА КРЕМНИЯ ДЛЯ ТОРЦЕВЫХ УПЛОТНЕНИЙ НАСОСОВ

На основе изучения особенностей формирования морфологии кромок образцов SiSiC-керамики при алмазном шлифовании определены основные виды выкрашиваний и их геометрические параметры. Выявлена взаимосвязь глубины шлифования, продольной и поперечной подач с геометрическими параметрами выкрашиваний.

**Ключевые слова:** SiSiC-керамика, алмазное шлифование, дефекты, выкрашивание, морфология кромок.

### ВВЕДЕНИЕ

Торцевое уплотнение является ответственным узлом центробежного насоса, обеспечивающим герметизацию вращающегося вала при перекачке разных жидкостей, в том числе с повышенной химической активностью и высоким содержанием абразивных частиц [1, 2]. Качество изготовления деталей торцевого уплотнения должно гарантировать длительный ресурс безотказной работы центробежного насоса и малую утечку перекачиваемой среды даже в условиях экстремальной эксплуатации: при давлении более 50 МПа, температуре выше 500 °С, скорости скольжения в паре трения выше 100 м/с [3]. Эффективность торцевого уплотнения во многом зависит от его конструкции, материалов и качества изготовления деталей, и прежде всего колец пары трения [4].

В настоящее время для изготовления колец пары трения все более широкое применение находит керамика из карбида кремния [5], обладающая высокой твердостью, прочностью, износостойкостью, термостойкостью и низким коэффициентом трения [6]. За счет этих свойств пара трения карбид кремния – карбид кремния обеспечивает требуемые эксплуатационные характеристики центробежных насосов при перекачке жидкостей с повышенной абразивной способностью. К качеству изготовления этих колец предъявляют высокие требования по точности, плоскостности, перпендикулярности, шероховатости рабочих поверхностей и качеству поверхностного слоя [2]. Однако при реализации этих требований возникает ряд технологических про-

блем, связанных с недостаточной изученностью процесса алмазного шлифования керамики из карбида кремния и отсутствием рекомендаций по контролю качества произведенных керамических колец. Частично эти проблемы изучены и проанализированы, определены возможные пути обеспечения качества поверхности образцов из карбидкремниевой керамики при шлифовании [7–14]. Однако решение этой центральной задачи не подкреплено рекомендациями по обеспечению качества кромок образцов из этой керамики, что не позволяет выполнить ряд конструктивных требований к керамическим кольцам. Более того, кромки керамических деталей являются областями интенсивного зарождения трещин при эксплуатации, которые часто приводят к локальному или полному разрушению деталей [15, 16].

В работе поставлена задача — исследовать влияние режимов алмазного шлифования образцов керамики из карбида кремния на дефектность их кромок для формирования системы технологического обеспечения качества при изготовлении колец пары трения для торцевых уплотнений центробежных насосов. Настоящая статья, в которой описаны результаты проведенной работы, завершает цикл публикаций по исследованию дефектности кромок образцов из разных керамических материалов после алмазного шлифования [17–19].

### МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования выполняли по усовершенствованной методике [17–19] с использованием колец ( $D \times d = 70 \times 30$  мм) толщиной 12 мм из карбидкремниевой керамики, изготовленных по технологии реакционной спекания (SiSiC-керамика). Физико-механические свойства керамики: предел прочности при изгибе  $\sigma_{изг}$  390 МПа,



В. В. Кузин  
E-mail: kyzena@post.ru

трещиностойкость  $K_{Ic}$  4,0 МПа·м<sup>1/2</sup>, плотность  $\rho$  3,05 г/см<sup>3</sup>, твердость 92 HRA. Структура SiSiC-керамики сформирована прочно скрепленными в «непрерывный каркас» зернами первичного карбида кремния, достигающими размера 50 мкм при их среднем размере 20–30 мкм. Между крупными зернами первичного карбида кремния равномерно распределена многокомпонентная фаза, сформированная плотноупакованными зернами вторичного карбида кремния, чистого кремния, углерода и примесями. Соотношение первичного карбида кремния и многокомпонентной фазы составляет 85 : 15 %.

Образцы для исследований вырезали из колец на станке модели ATM BRILLANT 230 с использованием алмазного отрезного круга. Из каждого кольца вырезали 6 образцов в форме кольцевого сегмента с углом 60° по схеме, показанной на рис. 1, а. Образцы шлифовали на станке ОШ-440 с использованием алмазного круга 1А1В2-01 100 % АС6 160/125 и смазочно-охлаждающей жидкости. Режимы шлифования: продольная подача  $S_{пр} = 5 \div 15$  м/мин, поперечная подача  $S_{поп} = 0,5 \div 1,5$  мм/ход, глубина шлифования  $t = 0,01 \div 0,05$  мм. Скорость круга во всех экспериментах оставалась постоянной,  $v_{кр} = 30$  м/с.

На образцах выделяли четыре боковые поверхности П1, П2, П3 и П4, которые при пересечении со шлифованной поверхностью (ШП) образовывали кромки К1, К2, К3 и К4 (рис. 1, б). Образцы устанавливали на столе шлифовального станка, ориентиру-

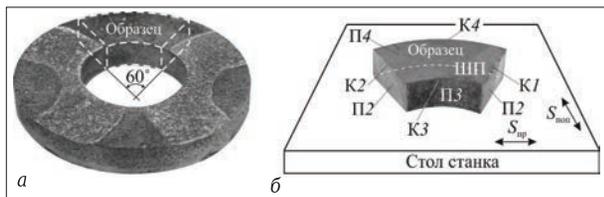


Рис. 1. Схема установки образца на столе шлифовального станка

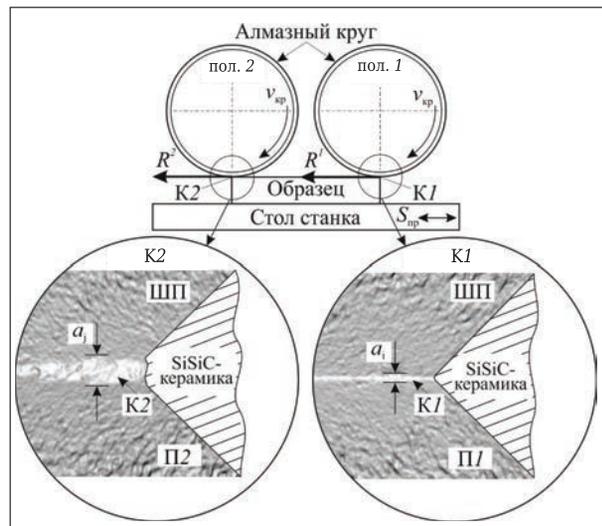


Рис. 2. Схема шлифования и визуализация выкрашиваний на кромках К1 и К2

вав их относительно продольной ( $S_{пр}$ ) и поперечной ( $S_{поп}$ ) подачи. Противоположные кромки, расположенные параллельно направлению продольной подачи стола станка, обозначены К1 / К2, а радиусные кромки, расположенные параллельно направлению поперечной подачи, — К3 / К4.

Дефектность кромок, образованных шлифованной поверхностью (ШП) и боковыми поверхностями П1, П2, П3 и П4 образцов, характеризовали шириной  $a$  выкрашиваний и углом  $\beta$  скалывания (рис. 2). Значения  $a$  и  $\beta$  измеряли на приборе «MikroCAD premium» на всей длине кромок с интервалом 0,3 мм. Среднее значение ширины выкрашиваний на каждой кромке рассчитывали по результатам 200 измерений (40 измерений на каждом образце  $\times$  5 образцов). Морфологию поверхности выкрашиваний на кромках образцов изучали с использованием сканирующего электронного микроскопа VEGA 3 LMN.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На первом этапе исследований анализировали морфологию боковых поверхностей образцов, учитывая разные технологические процессы их формирования. Установлено, что поверхности П1 и П2 после алмазной резки имели весьма развитый рельеф, являющийся традиционным для этого вида обработки. На хаотично чередующихся участках с развитым (шагреновым) и сглаженным (глянцевым) рельефами присутствуют четко выраженные дугообразные риски от отрезного круга. На поверхностях имеются многочисленные дефекты разных формы и размеров. Поверхности П3 и П4, сформированные при спекании колец, образованы гладкой пленкой, на которой имеется большое число возвышенностей и углублений. На боковых поверхностях возвышенностей присутствуют многочисленные трещины, а на отдельных возвышенностях имеются кратеры с кристаллическими включениями.

Анализ состояния кромок образцов SiSiC-керамики после шлифования, выполненный на втором этапе исследований, показал минимальное число дефектов на кромках К3 и К4 и высокую дефектность кромок К1 и К2 из-за присутствия на них многочисленных выкрашиваний разной ширины. На кромках К3 и К4, образованных пересечением ШП с боковыми поверхностями П3 и П4 после спекания, обнаружены единичные выкрашивания шириной до 15 мкм, которые не нарушают их целостность и правильную геометрическую форму. Размер этих выкрашиваний свидетельствует об отсутствии вырывов целых зерен первичного SiC из-за их прочного удержания в каркасе поверхностной пленкой, не ослабленной дефектами, образующимися в поверхностном слое керамики при алмазном шлифовании. Образование единичных выкрашиваний на этих кромках можно связать с частичным разрушением круп-

ных зерен SiC в результате ударного воздействия на них единичных алмазных зерен. Разница в степени дефектности кромок К3 и К4 не выявлена.

Кромки К1 и К2, образованные пересечением ШП с П1 и П2 после алмазной обработки, являются весьма дефектными, причем ширина выкрашиваний на этих кромках изменяется в широком диапазоне. На размер выкрашиваний существенно влияют напряженно-деформированное состояние локальных объемов керамики на кромках образца при входе (выходе) алмазного круга в контакт с ним, а также режим шлифования. Последовательно проанализируем эти факторы.

Установлено, что ширина выкрашиваний на кромке К1 значительно меньше, чем на кромке К2 (см. рис. 2); столь существенная разница становится понятной при анализе схемы шлифования, показанной на рис. 2. Алмазный круг, вращающийся по часовой стрелке, входит в контакт с образцом SiSiC-керамики, закрепленным на столе станка, движущемуся первоначально слева направо и на обратном (реверсивном) ходе справа налево. На первом проходе алмазный круг входит в контакт с образцом по кромке К1 в положении 1 (пол. 1) и выходит из контакта с ним по кромке К2 в положении 2 (пол. 2). На обратном проходе круг входит в контакт с образцом в пол. 2 и выходит из контакта в пол. 1. При этом на кромках К1 и К2 формируются принципиально разные напряженно-деформированные состояния локальных объемов керамики под действием тангенциальной силы  $R$  шлифования.

Под действием силы  $R^1$  в локальном объеме керамики на кромке К1 образца в пол. 1 формируются сжимающие напряжения, которые эффективно воспринимаются керамическими материалами. При этом средняя ширина выкрашиваний составляет  $a_i$ . В локальном объеме керамики на кромке К2 образца в пол. 2 под действием  $R^2$  формируются растягивающие напряжения из-за отсутствия опоры у «крайних» зерен в керамике. Эти напряжения оказывают крайне негативное воздействие на керамические материалы и приводят к зарождению и интенсивному росту трещин в их локальных объемах. Усиливает отрицательную роль растягивающих напряжений эффект вырыва крайних зерен из керамического каркаса. Результатом этой совокупности факторов является образование на кромке К2 выкрашиваний размером  $a_j$ , многократно превосходящим размер выкрашиваний  $a_i$  на кромке К1. Аналогичные явления происходят при реверсивном перемещении образцов.

В детализированном виде морфология кромки К1 и К2 показана

на рис. 3. Видно, что на кромке К1 имеются многочисленные выкрашивания минимальных размеров, что придает ей «зазубренный» рельеф. Анализ профилограмм разных участков кромки К1 позволил идентифицировать выкрашивания как 1 — единичный скол вдоль боковой поверхности; 2 — совокупность мелких сколов; 3 — единичный скол вдоль ШП. Угол скалывания этих выкрашиваний изменяется в диапазоне  $\beta = 45\div 60^\circ$  (см. рис. 3, а). Морфология кромки К2 имеет принципиально другой вид, чем у кромки К1. Кромка К2 характеризуется чередованием крупных выкрашиваний размерами до 150 мкм. Выкрашивания на кромке К2 можно определить как 4 — совокупность мелких сколов, образующих округление кромки; 5 — крупные сколы со сглаженной поверхностью; 6 — крупные сколы с развитой поверхностью (см. рис. 3, б). Эти выкрашивания характеризуются  $\beta = 35\div 70^\circ$ .

Интенсификация режима шлифования не оказывает существенного влияния на морфологию кромок К1 и К2 и угол скалывания  $\beta$ , но значительно увеличивает ширину выкрашиваний на них. Влияние режимов шлифования на среднюю ширину  $a$  выкрашиваний на кромках К1 и К2 показано на рис. 4. Установлено, что с увеличением  $S_{np}$  в диапазоне 5–15 м/мин ( $S_{поп} = 0,8$  мм/ход,  $t = 0,04$  мм)  $a$  повышается от 36 до 53 и с 88 до 100 мкм на К1 и К2 соответственно (см. рис. 4, а). При увеличении  $S_{поп}$  в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход ( $S_{np} = 12$  м/мин,  $t = 0,04$  мм)  $a$  возрастает от 32 до 40 и от 80 до 95 мкм на К1 и К2 соответственно (см. рис. 4, б). С повышением  $t$  в диапазоне 0,01–0,05 мм ( $S_{np} = 12$  м/мин,  $S_{поп} = 0,8$  мм/ход)  $a$  увеличивается от 35 до 46 и от 85 до 94 мкм на К1 и К2 соответственно (см. рис. 4, в). Физическая природа столь существенной разницы в значениях средней ширины выкрашиваний на кромках К1 и К2 образцов SiSiC-керамики базируется на действии разных ведущих механизмов формирования морфологии этих кромок. Этот тезис иллюстрируют микрофотографии, показанные на рис. 5.

Ведущим механизмом формирования морфологии кромки К1 является разрушение много-

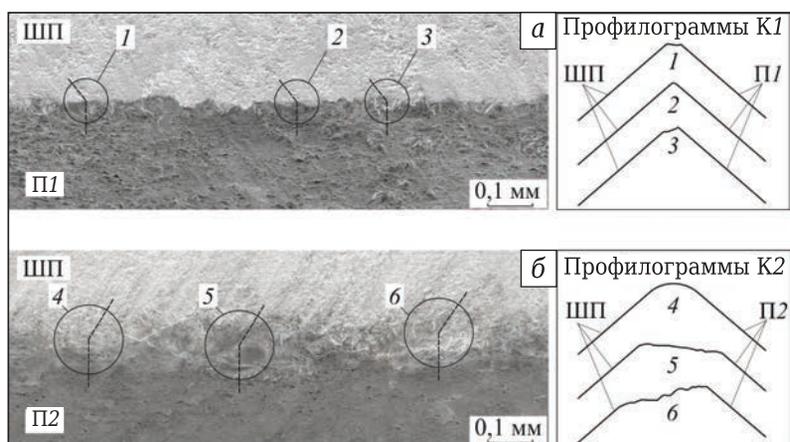


Рис. 3. Морфология и профилограммы кромок К1 (а) и К2 (б)

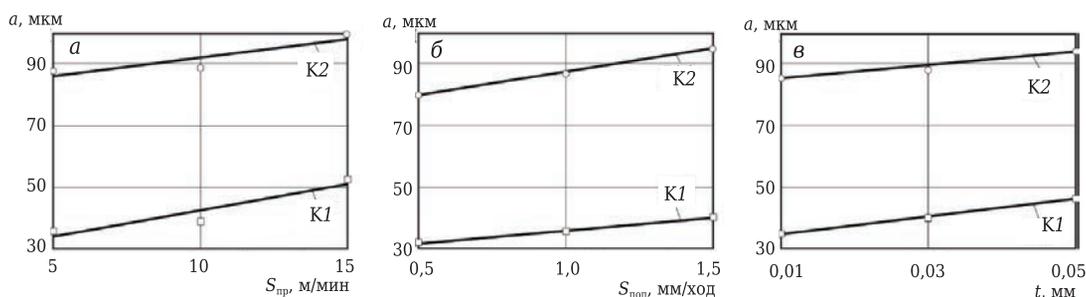


Рис. 4. Влияние  $S_{пр}$  (а),  $S_{поп}$  (б) и  $t$  (в) на среднюю ширину  $a$  выкрашиваний на кромках K1 и K2

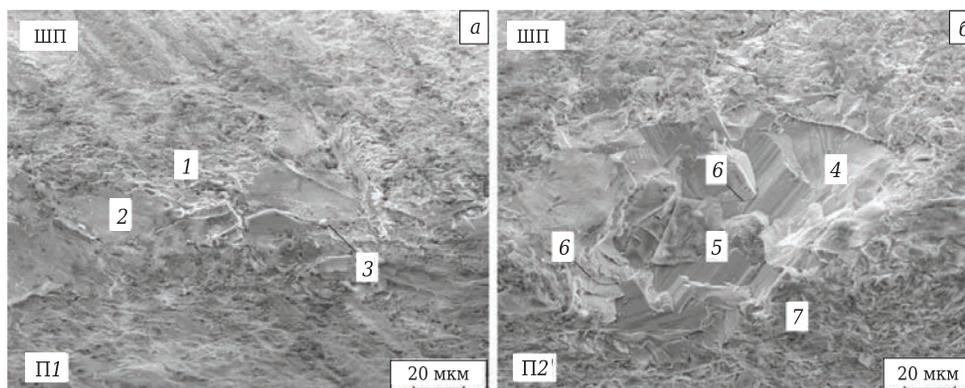


Рис. 5. Характерные фрагменты кромок K1 (а) и K2 (б)

компонентной фазы 1 при межкристаллитном развитии трещин (см. рис. 5, а). Области, образовавшиеся под действием этого механизма, имеют хаотичный морфологический рисунок, сравнимый с исходной структурой SiSiC-керамики. Эти области, как правило, обрамляют разрушенные вершины зерен первичного SiC в виде фасетчатых сколов 2, размеры которых в 1,5–2,0 раза меньше среднего размера зерен SiC. Вокруг фасетчатых сколов обнаружены разнонаправленные трещины 3 со стохастической траекторией роста. Это свидетельствует о том, что ведущий механизм сопровождается фрагментарным разрушением крупных зерен SiC при образовании кромки K1 образцов SiSiC-керамики.

Формирование более развитой морфологии кромки K2 происходит за счет образования поверхностных сколов, размеры которых значительно больше, чем размеры зерен первичного SiC (см. рис. 5, б). Боковые поверхности этих сколов 4 и остаточные фрагменты 5 разрушенного зерна имеют правильную огранку. На дне поверхностных сколов собираются осколки зерен, диспергированных при шлифовании. Это свидетельствует о том, что ведущий механизм формирования морфологии кромки K2 основан на вырывах частично или полностью разрушенных поверхностных зерен первичного SiC в условиях транскристаллитного роста трещин 6. Вторичным механизмом, задействованным в образовании морфологии кромки K2, является хрупкое разрушение многокомпонентной фазы 7, прилегающей к частично или полностью разрушенным зернам SiC. Дополнительную развитость рельефа кромке K2 прида-

ет разнонаправленность остаточных фрагментов 5 разрушенного зерна и разнообразный морфологический рисунок их поверхностей. Выявлены гладкие поверхности, ступенчатые поверхности, поверхности со столбчатыми выступами и впадинами, а также поверхности с ручьистым узором.

Обобщение выявленных особенностей морфологии кромок образцов SiSiC-керамики после шлифования свидетельствует о высокой сложности явлений, происходящих при высокоскоростном контакте алмазного круга с крупнозернистой поверхностью этой керамики. Специфика этих явлений определяется многочисленными факторами, среди которых особое место занимают силовые нагрузки, определяемые режимом шлифования. Следует отметить, что эти специфические явления не характерны для процесса шлифования керамических образцов на основе оксида алюминия, диоксида циркония и нитрида кремния [17–19]. Этот факт свидетельствует о значительном влиянии структуры керамики на состояние ее поверхностного слоя после шлифования.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании проведенных экспериментальных исследований образцов, вырезанных из колец, изготовленных из карбидкремниевой керамики по технологии реакционного спекания, установлено, что кромки образцов SiSiC-керамики имеют высокую дефектность после алмазного шлифования. На морфологию кромок, а также форму и размеры выкрашиваний существенно влияют состояние боковых поверхностей образца, напряженно-

деформированное состояние локальных объемов керамики на кромках образца, сформированное под действием нагрузок, генерируемых в зоне контакта алмазного круга с обрабатываемой поверхностью, и режимы шлифования.

Выявлено, что на кромках К3 и К4, образованных на пересечении ШП с П3 и П4, не подвергавшимися механической обработке после спекания керамических колец, зафиксировано минимальное число выкрашиваний. Наиболее интенсивное появление выкрашиваний обнаружено на кромках К1 и К2, образованных на пересечении ШП с П1 и П2, которые были сформированы в результате алмазного резания. На кромке К1 имеются многочисленные выкрашивания минимальных размеров, что придает ей «зазубренный» рельеф. Угол скалывания этих выкрашиваний  $\beta = 45\div 60^\circ$ . Кромка К2 характеризуется развитой морфологией, сформированной чередующимися крупными выкрашиваниями размерами до 150 мкм и  $\beta = 35\div 70^\circ$ . Средняя ширина выкрашиваний на кромке К1 в 2,0–2,5 раза меньше, чем на кромке К2.

#### Библиографический список

1. **Баткис, Г. С.** Торцевые уплотнения нового поколения для центробежных и винтовых компрессоров / Г. С. Баткис, Н. М. Лившиц, В. К. Хайсанов [и др.] // Вестник казанского технологического университета. — 2010. — № 9. — С. 408–417.
2. **Кириллов, Н. П.** Конструкции торцовых уплотнений для вращающихся валов центробежных насосов систем заправки ракет / Н. П. Кириллов, В. В. Буренин, В. И. Полянский [и др.] // Вестник московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). — 2012. — № 1. — С. 18–22.
3. **Голубев, А. И.** Торцевые уплотнения вращающихся валов / А. И. Голубев. — М.: Машиностроение, 1974. — 212 с.
4. ОСТ 26-06-1493–87. Уплотнения торцевые валов насосов. Типы. Основные параметры и размеры.
5. **Душко, О. В.** Композиционные износостойкие материалы на основе карбида кремния / О. В. Душко, А. П. Уманский, Д. О. Пушкарев // Огнеупоры и техническая керамика. — 2005. — № 2. — С. 22–24.
6. **Параносенков, В. П.** Конструкционные материалы на основе самосвязанного карбида кремния / В. П. Параносенков, А. А. Чикина, М. А. Андреев // Огнеупоры и техническая керамика. — 2006. — № 7. — С. 37–40.
7. **Кузин, В. В.** Взаимосвязь режимов алмазного шлифования с состоянием поверхности SiSiC-керамики / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 3. — С. 179–185.
8. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regimes with SiSiC-ceramic surface condition journal / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 58, № 2. — P. 214–219.
9. **Dai, Jianbo.** The influence of grain geometry and wear conditions on the material removal mechanism in silicon carbide grinding with single grain / Jianbo Dai, Honghua Su, Hao Hu [et al.] // Ceramics International. — 2017. — Vol. 43, № 15. — P. 11973–11980.
10. **Agarwal, Sanjay.** Optimizing machining parameters to combine high productivity with high surface integrity in grinding silicon carbide ceramics / Sanjay Agarwal // Ceram. Int. — 2016. — Vol. 42, № 15. — P. 6244–6262.
11. **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. — 2012. — Vol. 496. Precision Machining. — P. 127–131.

Интенсификация режима шлифования приводит к увеличению среднего значения ширины выкрашиваний на всех кромках образцов SiSiC-керамики. В наибольшей степени этот эффект проявляется на кромках К1 и К2. С увеличением  $S_{пр}$  от 5 до 15 м/мин значение  $a$  увеличивается на К1 в 1,5 раза, на К2 в 1,1 раза. Увеличение  $S_{поп}$  от 0,5 до 1,5 мм/ход приводит к возрастанию  $a$  в 1,2 раза на обеих кромках образцов. Увеличение  $t$  от 0,01 до 0,05 мм приводит к возрастанию  $a$  в 1,3 и 1,1 раза на кромках К1 и К2 соответственно.

Систематизированные результаты этих экспериментальных исследований использованы для формирования системы технологического обеспечения качества при изготовлении колец пары трения из SiC для торцевых уплотнений центробежных насосов.

\*\*\*

*Настоящая работа поддерживается Министерством образования и науки Российской Федерации в рамках государственного задания МГТУ «СТАНКИН» в сфере научной деятельности (задание 9.1372.2017/4.6).*

11. **Zhang, Quanli.** Surface generation mechanism of WC/Co and RB–SiC/Si composites under high spindle speed grinding (HSSG) / Quanli Zhang, Suet To, Qingliang Zhao [et al.] // Int. J. Refract. Met. Hard Mater. — 2016. — Vol. 56. — P. 123–131.
12. **Cao, Jianguo.** Material removal behavior in ultrasonic-assisted scratching of SiC ceramics with a single diamond tool / Jianguo Cao, Yongbo Wu, Dong Lu [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2014. — Vol. 79. — P. 49–61.
13. **Душко, О. В.** Алмазное шлифование карбидокремниевой керамики для машиностроения / О. В. Душко, В. М. Шумячер. — Волгоград: ВолгГАСУ, 2009. — 80 с.
14. **Zhang, Quanli.** Amorphization and segregation based surface generation of reaction-bonded Si/SiC composites under micro grinding / Quanli Zhang, Suet To, Qingliang Zhao [et al.] // International Journal of Machine Tools and Manufacture. — 2015. — Vol. 95. — P. 78–81.
15. **Kuzin, V.** Designing of detailstaking into account degradation of structural ceramics at exploitation / V. Kuzin, S. Grigor'ev, M. Volosova, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 268–271.
16. **Kuzin, V.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / V. Kuzin, S. Grigor'ev, S. Fedorov, M. Fedorov // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 402–406.
17. **Кузин, В. В.** Закономерности формирования морфологии кромок образцов  $Al_2O_3$ -TiC-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 5. — С. 63–67.
18. **Kuzin, V. V.** Features of  $Al_2O_3$ -TiC-ceramic specimen edge morphology formation during diamond grinding / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refractories and Industrial Ceramics. — 2017. — Vol. 58, № 3. — P. 319–323.
19. **Кузин, В. В.** Закономерности формирования морфологии кромок образцов Y-TZP-керамики при алмазном шлифовании / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 7. — С. 63–65.
20. **Кузин, В. В.** Уровень дефектности кромок образцов  $Si_3N_4$ -керамики после алмазного шлифования / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 9. — С. 65–68. ■

Получено 25.10.17

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