

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **М. А. Волосова**

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

УДК 666.3:539.422

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ. Часть 1

С использованием оригинальной методики исследована структура поверхностного слоя керамического изделия ВОК-71 после алмазного шлифования. Изучена кинетика изменения структуры керамики в области контактного взаимодействия при эксплуатации.

Ключевые слова: керамические изделия (КИ), поверхностный слой (ПС) керамики, разрушение керамики, область контактного взаимодействия, структурные элементы керамики, напряженно-деформированное состояние, площадка износа.

ВВЕДЕНИЕ

Под воздействием физико-химических факторов технологического и эксплуатационного характера изменяется структура поверхностного слоя (ПС) керамики, уменьшается ее сопротивляемость росту трещин, увеличивается вероятность непрогнозируемых разрушений, снижается надежность изделий [1–3]. Структура керамики изменяется как в области контактного взаимодействия с соприкасающейся деталью, так и вне этой области посредством бесконтактного воздействия эксплуатационных нагрузок [4–8].

Изменению структуры ПС керамики в области контактного взаимодействия при трении традиционно уделяется пристальное внимание, так как именно эта область порождает наибольшее число частичных или полных разрушений изделий [9–13]. Причины разрушений, связанные с изменением структуры ПС керамики вне области контактного взаимодействия, исследованы в значительно меньшей степени, а имеющиеся данные свидетельствуют о высокой сложности и стохастичности этого процесса [14]. Это не позволяет сформулировать научно обоснованные требования к финишным технологиям изготовления керамических изделий и точно прогнозировать их эксплуатационный ресурс. Результаты многолетних исследований авторов настоящей статьи позволили обоснованно подойти к решению этой актуальной задачи.

В работе поставлена цель — экспериментально изучить кинетику изменения структуры ПС керамических изделий (КИ) в разных областях контактного взаимодействия при испытаниях на резание. Результаты исследований будут опубликованы в двух частях статьи. В части 1 статьи приведены результаты исследования структуры ПС керамики после алмазного шлифования и кинетика ее изменения в области контактного взаимодействия при эксплуатации, в части 2 — вне области контактного взаимодействия.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Необходимость решения специфической задачи потребовала создания методики, способной выявить и идентифицировать элементарные акты в кинетике изменения структуры ПС КИ. Разработанная методика создана на основе системы эксплуатации КИ [15], что позволило учесть влияние неоднородности структуры керамики, концентраторов напряжений, степень дефектности ПС, специфику контактного воздействия на кинетику изменения ее структуры. Выбор керамических инструментов в качестве объекта исследования обусловлен экстремальными условиями эксплуатации и малым ресурсом (не более 60 мин).

Использовали керамические режущие пластины ВОК-71 (система Al_2O_3-TiC) формы SNGN 120408 с упрочняющей фаской, аттестованные по классу точности U (ГОСТ 25003–81). Режущие пластины закрепляли в державке резца CoroTurn RC со следующей геометрией: передний угол $\gamma = -7^\circ$, задний угол $\alpha = 7^\circ$, углы в плане $\varphi = \varphi_1 = 45^\circ$. В испытаниях использовали две партии КИ ВОК-71 по 5 шт. в каждой. Первая



В. В. Кузин
E-mail: dr.kuzinvalery@yandex.ru

партия состояла из КИ ВОК-71, имеющих «бездефектный» ПС, во вторую партию включили КИ ВОК-71 с «дефектным» ПС. На поверхности этих инструментов имелись следующие дефекты (рис. 1): область локального разрушения (вырыв) 1, пора 2 и трещина 3. Все эти дефекты разных форм и размеров находились вне области контактного взаимодействия с заготовкой (стружкой), но не более 1 мм от ее границы. Из испытаний исключали КИ ВОК-71 с поверхностными дефектами в области контактного взаимодействия с заготовкой.

Испытания КИ ВОК-71 проводили при точении внешнего кольца шарикового подшипника (наружный диаметр D 130 мм, внутренний d 106 мм, ширина B 31 мм) твердостью HRC 55–59. Кольцо закрепляли на разжимной цанговой оправке, установленной в шпинделе токарного станка CU500MRD, оснащенного системой бесступенчатого регулирования оборотов главного движения. Режим испытаний: $v = 140$ м/мин, $S = 0,075$ мм/об, $t = 0,25$ мм; смазочно-охлаждающую жидкость не использовали. Время одного цикла точения (действие силовых и тепловых нагрузок на КИ) изменяли от 5 до 70 с, после чего инструмент выводили из контакта с заготовкой и охлаждали до комнатной температуры; далее следовал следующий цикл точения. Этот режим имитировал циклический характер действия контактных нагрузок. Испытания прекращали после полного разрушения КИ ВОК-71 или его частичного разрушения при ширине участка износа на задней поверхности 0,5 мм.

Размеры областей контактного взаимодействия КИ ВОК-71 с заготовкой на задней поверхности и со стружкой на передней поверхности, а также областей с измененной структурой ПС измеряли с использованием оптического микроскопа Stereo Discovery V12 Zeiss через 5 циклов точения. Структуру ПС керамики исследовали с использованием электронного сканирующего

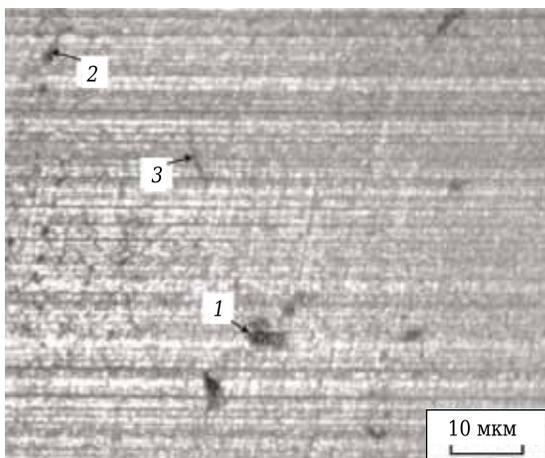


Рис. 1. Общий вид поверхности КИ ВОК-71 с поверхностными дефектами, расположенными вне области контактного взаимодействия с заготовкой

микроскопа Tescan Vega 3LMN после травли налип обрабатываемого материала по методике [16]. Использовали трехуровневую оценку выявленных изменений в структуре ПС КИ ВОК-71 на участке размерами 0,1×0,1 мм: первый уровень до 40 % изменений, второй 41–70 %, третий 71–100 %.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

После алмазного шлифования ПС КИ ВОК-71 является принципиально новым структурным элементом, который отсутствовал в керамике после спекания [17]. В соответствии с системным подходом этот структурный элемент, являющийся неотъемлемой частью изготовленного КИ, начинает взаимодействовать с другими структурными элементами керамики и влиять на состояние всей системы эксплуатации КИ. Исходя из этого положения, определены основные этапы исследований, касающиеся выявления взаимосвязей в рассматриваемой системе. В этой же последовательности будут проанализированы результаты выполненных исследований.

Исходная структура* ПС КИ ВОК-71

Установлено, что спеченная керамика ВОК-71 имеет высокоплотную структуру, которая характеризуется разнородностью зерен по форме и размеру (рис. 2, а). Основная фракция зерен 1 имеет неправильную форму с плоскими гранями и размеры 2–5 мкм, между которыми упакованы зерна 2 меньшего размера. Средний размер зерен несколько увеличивается к поверхности. На четко выраженных границах соседних зерен имеются единичные полости 3 вытянутой формы размерами до 0,5 мкм.

Морфология поверхности КИ ВОК-71 показана на рис. 2, б. Видно, что сглаженный морфологический рисунок поверхности сформирован выступами 4 и впадинами 5, на которых имеются углубления 6, области локального разрушения (вырывы) 7, поперечные 8 и продольные 9 трещины и продольные риски 10 от единичных микрорезов алмазными зернами. В отдельных областях поверхностные дефекты могут занимать до 7 % общей площади.

Поверхность КИ ВОК-71 покрыта пластически деформированным слоем 11 толщиной до 0,8 мкм (рис. 2, в), причем во впадинах этот слой распределен равномерно, а на выступах поверхность этого слоя имеет более развитую морфологию за счет волнообразных наплывов 12. Структура ПС КИ ВОК-71 существенно отличается от структуры спеченной керамики и состоит из нескольких четко различимых подслоев. Внешний подслой пластически деформированного слоя имеет аморфную структуру

* Структура после алмазного шлифования.

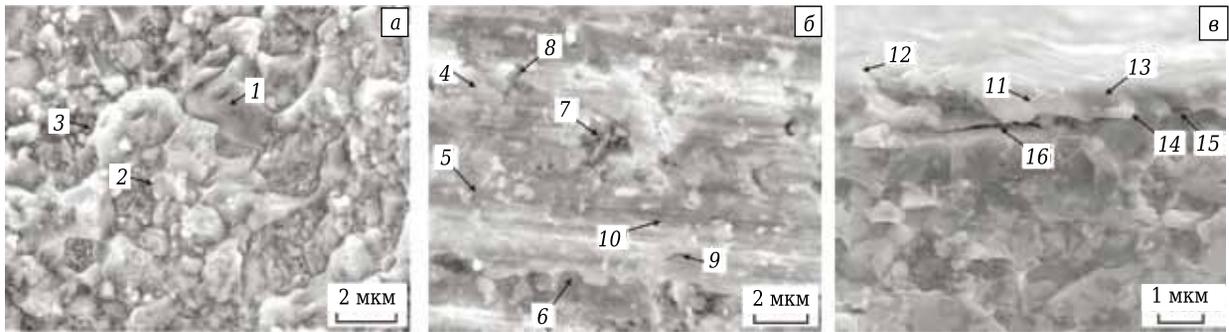


Рис. 2. Структура керамики (а), морфология рабочей поверхности (б) и структура ПС КИ ВОК-71 (в)

13, а его внутренний подслоя, примыкающий к керамике, образован аморфно-кристаллической структурой 14. Толщины этих подслоев примерно одинаковы и не превышают 0,5 мкм. Между ПС и керамикой имеется переходная зона 15 толщиной не более 2 мкм, в которой обнаружены дефекты 16 разного вида (поры, вытянутые полости, трещины). Установлено, что длина трещин, образовавшихся и растущих в переходной зоне в параллельном направлении (вдоль выступов и впадин), в 2–3 раза больше, чем в поперечном (поперек выступов и впадин).

В подповерхностном слое керамики, расположенном ниже переходной зоны, обнаружена разветвленная сеть поверхностных трещин, распространяющихся во внутренний объем керамики «от поверхности». Выявлено уменьшение среднего размера зерен керамики в этом слое по сравнению с первоначальным размером за счет роста микротрещин, приводящего к их фрагментации. Этот подповерхностный дефектный слой, сформировавшийся при шлифовании, покрывает исходную структуру спеченной керамики ВОК-71.

Природа происхождения столь сложного по строению и дефектного ПС, включающего два подслоя, переходную зону и подповерхностный дефектный слой, определяется действием специфического комплекса тепловых и силовых нагрузок. Этот комплекс генерируется в области контактного взаимодействия рабочей поверхности алмазного круга с поверхностью керамики при одновременной реализации двух стохастических процессов. Первый (основной) процесс — хрупкое разрушение срезаемого припуска за счет массового внедрения алмазных зерен, перемещающихся со скоростью 30–50 м/с на глубину 100–300 мкм в поверхность керамики. При ее разрушении на траектории перемещения алмазного зерна образуются диспергированные частицы (стружка) размерами до 20 мкм. Одновременно с этим трещины, образовавшиеся при скалывании частиц, распространяются во внутренний объем керамики. Рост наиболее крупных и ветвящихся трещин приводит к об-

разованию вырывов. Второй процесс — высокоскоростное трение рабочей поверхности круга о поверхность керамики с образованием экстремально мощного источника теплоты, формирование высокой температуры, приводящей к расплавлению керамики. Алмазный круг «размазывает» этот пластичный слой керамики по хрупко разрушенной поверхности керамической заготовки, который маскирует ранее образовавшиеся поверхностные дефекты. После остывания «размазанный» слой превращается во внешний подслоя пластически деформированного слоя.

Другой не менее важной особенностью в состоянии ПС КИ ВОК-71 является нестабильность его параметров; они изменяются в широком диапазоне даже в соседних областях. Главным источником этой нестабильности является рабочая поверхность шлифовального круга, состоящая из зерен 1 разных форм и размеров, стохастично распределенных по поверхности и заделанных в связку 2 на разную глубину (рис. 3). Как правило, кроме основной фракции зерен, использованной при изготовлении круга, в составе алмазных порошков содержатся побочные фракции. Морфологический рисунок рабочей поверхности алмазного круга значительно усложняется за счет попавшего шлама

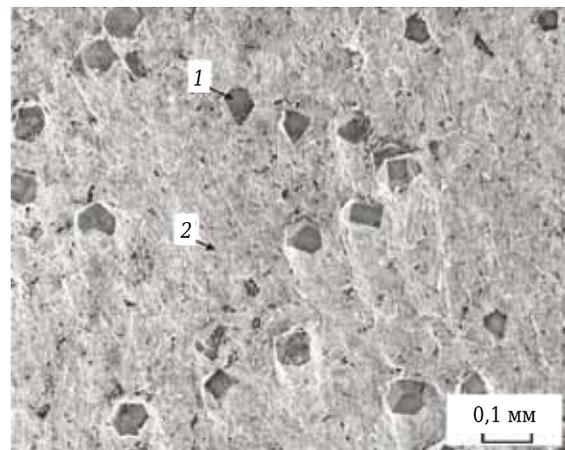


Рис. 3. Общий вид рабочей поверхности алмазного круга

в пространство между кругом и заготовкой при шлифовании. Дополнительный фактор нестабильности ПС керамики — неравномерный износ круга. Технологические возможности регулирования числа, распределения и глубины проникновения алмазных зерен в ПС заготовки в настоящее время отсутствуют.

Высокая степень развитости рабочей поверхности алмазного круга, зависящая от формы и глубины заделки единичных зерен, их износа и морфологии поверхности связки, определяет хаотичность процесса разрушения керамики перед каждым зерном, нестабильность размеров образовавшихся трещин после прохождения зерен по поверхности и существенную вариацию сил и теплоты, генерируемых единичным зерном.

Присутствие структурно неоднородного, нестабильного и дефектного ПС на КИ ВОК-71 является одной из причин их недостаточной надежности. Другие негативные последствия формирования локальной неоднородности свойств ПС на разных керамических материалах приведены в статьях [18, 19]. В частности, установлено, что шлифование керамических образцов при наиболее интенсивных режимах приводит к снижению их прочности до 12 % с одновременным увеличением разброса ее значений; выявлено также уменьшение до 25 % трещиностойкости ПС шлифованных керамических образцов по сравнению с нешлифованными.

Кинетика изменения структуры ПС КИ ВОК-71 в области контактного взаимодействия

По классификации специалистов, область контактного взаимодействия состоит из двух зон. В первой зоне реализуется контакт между задней поверхностью КИ ВОК-71 и обрабатываемой заготовкой с образованием фаски износа 1 (рис. 4, а, пунктирная линия). Как правило, на фаске износа имеются сколы 2. Во второй зоне передняя поверхность КИ ВОК-71 контактирует со стружкой с образованием лунки износа 3 (рис. 4, б, пунктирная линия). В общем случае условия

взаимодействия в этих зонах различаются, но эти различия при рассмотрении выявленных закономерностей не имеют принципиального значения. Поэтому будем считать, что эти две зоны образуют общую область контактного взаимодействия КИ ВОК-71 с заготовкой, в результате чего формируется единая площадка износа.

На площадке износа образуется налип обрабатываемого материала, который имеет важное значение в изменении структуры керамики в области контактного взаимодействия. На рис. 4, а показан налип обрабатываемого материала с вертикальными рисками, образование которого связано с тем, что область контактного взаимодействия при резании является диссипативной системой, в которой подводимая энергия поглощается ее основными элементами. В результате этого обрабатываемый материал в зоне резания сильно нагревается и его контактный слой переходит в вязко-текучее состояние. При этом внешнее трение между КИ ВОК-71 и заготовкой частично трансформируется во внутреннее трение; контактный слой обрабатываемого материала затормаживается на поверхности керамики и заполняет все имеющиеся углубления на площадке износа. Заторможенный слой играет двоякую роль. С одной стороны, он выступает в качестве третьей среды между трущимися поверхностями и уменьшает трение, с другой — активизирует высокотемпературные химические процессы на поверхности керамики, а его фрагменты, заполнявшие углубления и полости, выступают в роли «клина», подводящего дополнительную энергию к поверхностным дефектам керамики.

Установлено, что площадка износа на КИ ВОК-71 образуется в результате последовательно происходящих элементарных актов разрушения керамики в локальных и постоянно обновляемых областях ПС, интенсивность которых зависит от степени дискретности контакта и условий трения. С одной стороны, эти элементарные акты являются результатом специфического напряженно-деформированного состояния ПС КИ ВОК-71, определяемого структурной неоднородностью напряжений на границах

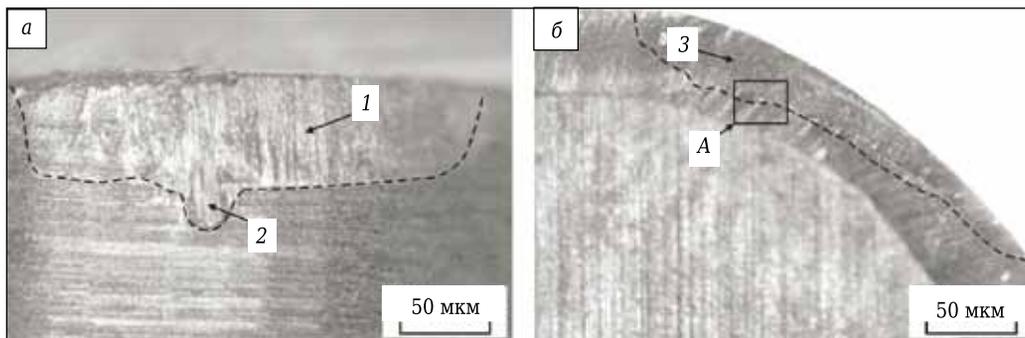


Рис. 4. Общий вид областей контактного взаимодействия КИ ВОК-71 с заготовкой (а) и со стружкой (б) до удаления налива обрабатываемого материала; А — участок на площадке износа

структурных элементов керамики и концентраторами напряжений вокруг дефектов [20, 21]. С другой стороны, последствия этих элементарных актов формируют постоянно обновляемые варианты напряженно-деформированного состояния, создающие предпосылки для последующих элементарных актов разрушения керамики. Усугубляет эту картину заторможенный слой, который выступает в рассматриваемой системе в качестве нового структурного элемента.

Взаимосвязанная цепочка «специфическое напряженно-деформированное состояние — элементарный акт разрушения» определяет кинетику изменения структуры КИ ВОК-71 на площадке износа. В этой цепочке выделены три основных этапа: первый — разрушение ПС, сформировавшегося при шлифовании; второй — разрушение подповерхностного дефектного слоя, сформировавшегося при шлифовании; третий — разрушение подповерхностного бездефектного слоя, имеющего структуру спеченной керамики ВОК-71. Несмотря на общие закономерности в изменении структуры поверхности керамики, выявлены особенности протекания каждого из этих этапов, связанные с присутствием в структуре керамики определенных дефектов. Каждый из этих этапов сопровождается специфическими эффектами, существенно воздействующими на его кинетику и последствия.

В начальный период эксплуатации КИ ВОК-71 (этап приработки) исходный ПС керамики разрушается по механизму отслоения крупных и тонких пластинчатых фрагментов, причем через 2 мин площадь разрушенного ПС занимает 90–95 % площадки износа. Процесс разрушения керамики локализуется в ПС толщиной не более 2 мкм. Это позволяет отметить активную роль трещин и полостей, образовавшихся в переходной зоне при шлифовании, в изменении структуры керамики на этой стадии. Образовавшиеся плоские и неглубокие вырвы сразу заполняют обрабатываемый материал, который активизирует высокотемпературные химические процессы на поверхности керамики и подводит дополнительную энергию к поверхностным дефектам. Выявленные признаки в кинетике изменения структуры керамики на площадке износа КИ ВОК-71 на первом этапе подтверждают ранее приведенные данные о низких показателях прочности и трещиностойкости исходного ПС КИ ВОК-71.

Второй этап в кинетике изменения структуры керамики на площадке износа КИ ВОК-71 может быть идентифицирован по активному влиянию поверхностных («шлифовочных») дефектов на разрушение переходной зоны и подповерхностного дефектного слоя. Особая роль в этом процессе принадлежит полостям вытянутой формы размерами до 0,5 мкм и разветвленной сети микротрещин. Сущность этого этапа иллюстрирует рис. 5, на котором показан участок

А на площадке износа, выделенный рамкой (см. рис. 4). Этот участок показывает состояние границы, обозначенной пунктирной линией, между площадкой вне области контактного взаимодействия 1 и площадкой износа 2 после удаления налипшего обрабатываемого материала. Видно, что ПС КИ ВОК-71 вне области контактного взаимодействия с заготовкой полностью сохранил исходный сглаженный морфологический рисунок с характерными выступами 3 и впадинами 4. Морфологический рисунок площадки износа, характеризующийся волнообразными ступеньками 5, сформировался в результате сложного сочетания механических и физико-химических явлений. Развитый рельеф площадки износа дополняют сглаженные выступы размерами до 1 мкм, свидетельствующие о фрагментации зерен и высокотемпературном химическом взаимодействии поверхности керамики с обрабатываемым материалом. На площадке износа 2 полностью отсутствуют следы исходного ПС, а ее глубина увеличивается при удалении от показанной границы.

Взаимосвязь исходного ПС с вновь образовавшейся структурой керамики на площадке износа можно оценить по следующим признакам. Впадина 6 на площадке износа является фактическим продолжением впадины 4 на исходном ПС. Более того, продолжением впадины 6 является каскад полостей 7, происхождение которых можно связать с формированием ПС при шлифовании. Ориентация этого каскада полостей указывает на траекторию дальнейших разрушений на площадке износа из-за того, что каждая полость является концентратором напряжений и инициирует зарождение микротрещин, рост которых приводит к разрушению поверхности керамики с отделением частиц 8 разных форм и размеров. Крупные частицы (конгломераты зерен) после разрушения выносятся обрабатываемым материалом за пределы площадки износа, а мелкие осколки 9 скапливаются в углублениях.

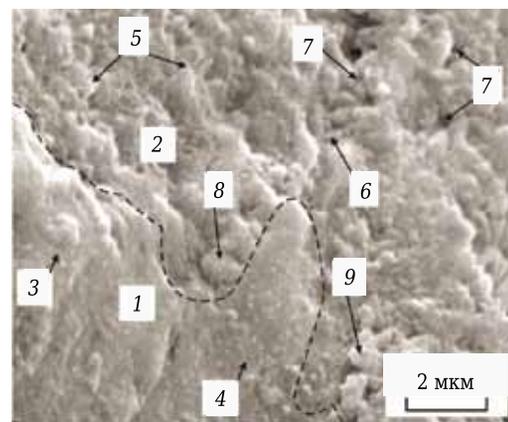


Рис. 5. Структура КИ ВОК-71 на площадке износа (участок А, см. рис. 4) через 3 мин эксплуатации

При повышении длительности эксплуатации КИ ВОК-71 размер площадки износа увеличивается, а влияние переходной зоны и подповерхностного дефектного слоя на изменения в структуре керамики уменьшается. При этом основным результатом второго этапа в кинетике изменения структуры керамики на площадке износа КИ ВОК-71 является образование высокоплотной, стабильной и практически бездефектной структуры. Однако в отдельных случаях происходят интенсивный рост и слияние микротрещин с образованием критических трещин; об этом свидетельствуют случаи частичного и даже полного разрушения КИ ВОК-71 на этом этапе.

Третий этап в изменении структуры керамики на площадке износа КИ ВОК-71 определяют постоянно повторяющиеся элементарные акты разрушения (сколы) ПС керамики. Сколы приводят к отделению зерен (их конгломератов), выносу их с площадки износа или скапливанию в углублениях. Исходный ПС КИ ВОК-71 не влияет на изменение структуры керамики на площадке износа из-за практически полного отсутствия дефектов технологического происхождения.

Особенностями процесса изменения структуры керамики на площадке износа на этом этапе являются появление и накопление эксплуатационных дефектов, главным образом дискообразной и вытянутой формы. Этот процесс определяется уровнем структурной неоднородности напряжений и концентраторами напряжений, сформировавшихся в ПС КИ ВОК-71 под действием эксплуатационных нагрузок [22, 23]. Дефекты и стабильно растущие трещины, являясь концентраторами напряжений, образуют «ослабленные» локальные области в поверхности керами-

ки. Под действием эксплуатационных нагрузок эти области через стабильно растущие трещины начинают взаимодействовать с внутренними «замороженными» дефектами с образованием сколов (более подробно эта фаза в изменении структуры керамики рассмотрена в статье [24]). Этот достаточно длительный процесс качественно изменяется в момент образования критической трещины, приводящей к частичному или полному разрушению КИ ВОК-71. Однако этот момент не поддается точному определению или прогнозированию. Более того, выявить стабильно растущие трещины и сколы можно только в лабораторных исследованиях КИ после стравливания налива обрабатываемого материала с площадки износа; в производственных условиях такая диагностика не представляется возможной.

Опыт показывает, что выявленная кинетика изменения структуры ПС КИ ВОК-71 характерна и для других керамических изделий, эксплуатируемых в условиях высокотемпературного трения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С использованием оригинальной методики исследована структура ПС КИ ВОК-71 после алмазного шлифования и изучена кинетика изменения структуры керамики в области контактного взаимодействия (площадки износа) при эксплуатации.

(Продолжение следует)

Настоящая работа финансируется в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSFS-2020-0025).

Библиографический список

1. **Llorca, J.** Toughness and microstructural degradation at high temperature in SiC fiber-reinforced ceramics / *J. Llorca, M. Elices, J. A. Celemín* // Acta Mater. — 1998. — Vol. 46, № 7. — P. 2441–2453.
2. **Waser, R.** Degradation of dielectric ceramics / *R. Waser, T. Baiatu, K. H. Härdt* [et al.] // Mater. Sci. Eng., A. — 1989. — Vol. 109. — P. 171–182.
3. **Jensen, M. S.** Degradation of TiB₂ ceramics in liquid aluminum / *M. S. Jensen, M. Pezzotta, Z. L. Zhang* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2008. — Vol. 28, № 16. — P. 3155–3164.
4. **Promsawat, Methee.** Effects of temperature on aging degradation of soft and hard lead zirconate titanate ceramics / *Methee Promsawat, Boonruang Marungsri, Napatporn Promsawat* [et al.] // Ceram. Int. — 2017. — Vol. 43, № 13. — P. 9709–9714.
5. **Schröder, Christian.** Assessment of low-temperature degradation of Y-TZP ceramics based on Raman-spectroscopic analysis and hardness indentation / *Christian Schröder, Alexander Renz, Christof Koplín* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2014. — Vol. 34, № 16. — P. 4311–4319.
6. **Liu, Meng.** Investigation of strength degradation and strength recovery via short time heating for ground

alumina ceramics with different grain size / *Meng Liu, Jun-Ichiro Takagi, Akira Tsukuda* // J. Mater. Process. Technol. — 2004. — Vol. 145, № 3. — P. 276–280.

7. **Lawson, Simon.** Environmental degradation of zirconia ceramics / *Simon Lawson* // J. Eur. Ceram. Soc. — 1995. — Vol. 15, № 6. — P. 485–502.

8. **Никитина, Е. В.** Исследование деградационных процессов керамики на основе оксида магния, оксида алюминия и нитрида кремния в расплаве хлоридов лития и калия / *Е. В. Никитина, Н. А. Казаковцева, Е. А. Никоненко* [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. — 2018. — Т. 9, № 1/2. — С. 421–425.

9. **Щербаков, И. П.** Деградация кристаллической структуры керамики ZnS при абразивном повреждении / *И. П. Щербаков, А. А. Дунаев, А. Е. Чмель* // Журнал технической физики. — 2018. — Т. 88, № 4. — С. 631–633.

10. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 1. Макроуровень / *В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова* // Трение и износ. — 2014. — № 6. — С. 728–734.

Kuzin, V. V. The role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools: Part 1. Macrolevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. A. Volosova // Journal of Friction and Wear. — 2014. — Vol. 35, № 6. — P. 505–510.

11. **Кузин, В. В.** Роль теплового фактора в механизме износа керамических инструментов. Часть 2. Микроуровень / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2015. — № 1. — С. 50–55.

Kuzin, V. V. Role of the thermal factor in the wear mechanism of ceramic tools. Part 2. Microlevel / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, M. Yu. Fedorov // Journal of Friction and Wear. — 2015. — Vol. 36, № 1. — P. 40–44.

12. **Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated Si₃N₄ ceramic tools in turning grey cast iron / V. Kuzin, S. Grigoriev // Key Eng. Mater. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.

13. **Кузин, В. В.** Износ инструментов из нитридной керамики при обработке никелевых сплавов / В. В. Кузин, М. А. Волосова, М. Ю. Федоров // Трение и износ. — 2013. — Т. 34, № 3. — С. 265–271.

Kuzin, V. V. Wear of tools from nitride ceramics when machining nickel-based alloys / V. V. Kuzin, M. A. Volosova, M. Yu. Fedorov // Journal of Friction and Wear. — 2013. — Vol. 34, № 3. — P. 199–203.

14. **Гветадзе, Р. Ш.** Исследования старения, усталости и деградации с целью повышения надежности стоматологической циркониевой керамики: обзор статей в мировых журналах / Р. Ш. Гветадзе, Е. Е. Дьяконенко, И. Ю. Лебедево // Стоматология. — 2016. — № 95 (6). — С. 51–60.

15. **Кузин, В. В.** Введение в микромеханику керамики. Система эксплуатации керамических изделий / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Аникин // Новые огнеупоры. — 2019. — № 2. — С. 60–64.

Kuzin, V. V. Introduction to ceramic micromechanics. Ceramic object operating system / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, V. N. Anikin // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 60, № 1. — P. 120–123.

16. **Волосова, М. А.** Закономерности изнашивания режущих пластин из оксидной и нитридной керамики / М. А. Волосова, В. В. Кузин // Металловедение и термическая обработка. — 2012. — № 1. — С. 40–46.

Volosova, M. A. Regular features of wear of cutting plates from oxide and nitride ceramics / M. A. Volosova, V. V. Kuzin // Met. Sci. Heat Treat. — 2012. — Vol. 54, № 1/2. — P. 41–46.

17. **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 high-refractory ceramic parts based on silicon nitride / V. V. Kuzin // Refract. Ind. Ceram. — 2006. — Vol. 47, № 4. — P. 204–208.

18. **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.

19. **Kuzin, V.** Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov [et al.] // Applied Mechanics and Materials. — 2015. — Vols. 752/753. — P. 402–406.

20. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 1. Влияние сложного механического нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 10. — С. 47–51.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 1. Effect of complex mechanical loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, V. N. Ermolin // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 5. — P. 416–419.

21. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние теплового нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.

Kuzin, V. V. Stress inhomogeneity in a ceramic surface layer under action of an external load. Part 2. Effect of thermal loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigoriev, V. N. Ermolin // Refract. Ind. Ceram. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.

22. **Григорьев, С. Н.** Влияние силовых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из оксидной керамики / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 1. — С. 67–71.

Grigoriev, S. N. Influence of loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, M. N. Morgan, A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 1. — P. 61–67.

23. **Григорьев, С. Н.** Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, А. Д. Батако [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.

Grigoriev, S. N. Influence of thermal loads on the stress-strain state of aluminum-oxide ceramic cutting plates / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin, M. A. D. Batako [et al.] // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 5. — P. 473–477.

24. **Кузин, В. В.** Особенности изнашивания и разрушения керамических режущих пластин / В. В. Кузин, В. Н. Аникин, С. Ю. Федоров [и др.] // Вестник машиностроения. — 2010. — № 11. — С. 50–56.

Kuzin, V. V. Wear and failure of ceramic cutting plates / V. V. Kuzin, V. N. Anikin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Russian Engineering Research. — 2010. — Vol. 30, № 11. — P. 1116–1123. ■

Получено 09.01.20

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова, 2020 г.