

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», Москва, Россия

УДК 666.3:539.422

## ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ КЕРАМИЧЕСКИХ ИЗДЕЛИЙ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ. Часть 2\*

С использованием оригинальной методики изучена кинетика изменения структуры поверхностного слоя керамического изделия вне области контактного взаимодействия при эксплуатации. Установлены основные закономерности этого процесса и выявлено влияние степени дефектности исходного поверхностного слоя на происходящие изменения.

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

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящей статье продолжено обсуждение результатов исследования изменения структуры поверхностного слоя (ПС) керамических изделий при эксплуатации. В части 1 статьи обоснована актуальность исследования, приведена оригинальная методика исследования, проанализированы результаты исследования структуры ПС керамики после алмазного шлифования и кинетика изменения структуры ПС в области контактного взаимодействия при эксплуатации [1]. В части 2 статьи проанализированы результаты исследования кинетики изменения структуры ПС керамических изделий вне области контактного взаимодействия и степень влияния дефектности исходного ПС на этот процесс при испытаниях на резание.

В экспериментах использовали две партии керамических изделий (КИ): первая партия включала КИ ВОК-71 (керамика системы  $Al_2O_3-TiC$ ) с условно «бездефектным» ПС, вторая партия — КИ ВОК-71 с «дефектным» ПС. В качестве классификационного признака степени дефектности ПС использовали средний линейный размер следующих поверхностных дефектов — вырыва, поперечной и продольной трещины (см. рис. 1 в части 1 статьи [1])

\* Окончание. Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 2 за 2020 г.



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

на произвольно выбранном участке размерами  $0,1 \times 0,1$  мм. В первую партию включали КИ ВОК-71 с числом дефектов не более пяти размерами до 10 мкм, во вторую — КИ ВОК-71 без ограничения числа дефектов размерами до 15 мкм. Допускалось также присутствие пор, вскрытых при шлифовании, в ПС КИ ВОК-71 из второй партии. КИ ВОК-71 с дефектами, размеры которых превышали указанные предельные значения, исключали из испытаний.

Исследовали кинетику изменения структуры ПС в приконтактной области (ПКО) шириной 1 мм и расположенной вне участка контактного взаимодействия КИ ВОК-71 с заготовкой. ПКО имела общую границу с площадкой износа (ПИ). Фиксировали все изменения структуры ПС, в том числе появление новых структурных элементов (дефектов разного рода), образовавшихся при эксплуатации КИ ВОК-71.

### РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На состояние ПС КИ ВОК-71 в ПКО воздействуют вибрации и тепло, распространяющееся от теплового источника на ПИ посредством теплопроводности; силовые нагрузки в этой области не действуют [2–4]. Под действием этих бесконтактных нагрузок (значительно меньших тех, которые действуют на ПИ) структура ПС в ПКО изменяется медленнее, чем на ПИ. Своеобразный эффект «замедленной съемки» процесса позволил в деталях изучить кинетику и выявить основные закономерности изменения структуры ПС КИ ВОК-71, предшествующие его частичному или полному разрушению.

Предварительные исследования показали, что степень дефектности ПС КИ ВОК-71 зна-

чительно влияет на кинетику изменения его структуры. С учетом этого обстоятельства последовательно проанализируем кинетику изменения структуры ПС керамики в ПКО, причем первоначально рассмотрим КИ ВОК-71 с бездефектным ПС, а затем с дефектным.

**Кинетика изменения структуры бездефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО**

Морфология бездефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО на расстоянии 0,1 мм от границы ПИ показана на рис. 1. Видно, что морфологический рисунок этой поверхности отличается от исходного (после шлифования) присутствием многочисленных изолированных ямок разных форм и размеров (см. рис. 1, а). Наибольшее число этих новых элементов структуры ПС имеют размеры до 1 мкм; эти ямки 1 назвали зародышевыми. Размер значительно меньшего числа ямок не превышает 5 мкм (мелкие ямки 2) и 15 мкм (крупные ямки 3). Слияние соседних ямок приводит к образованию крупных углублений 4 неправильной формы.

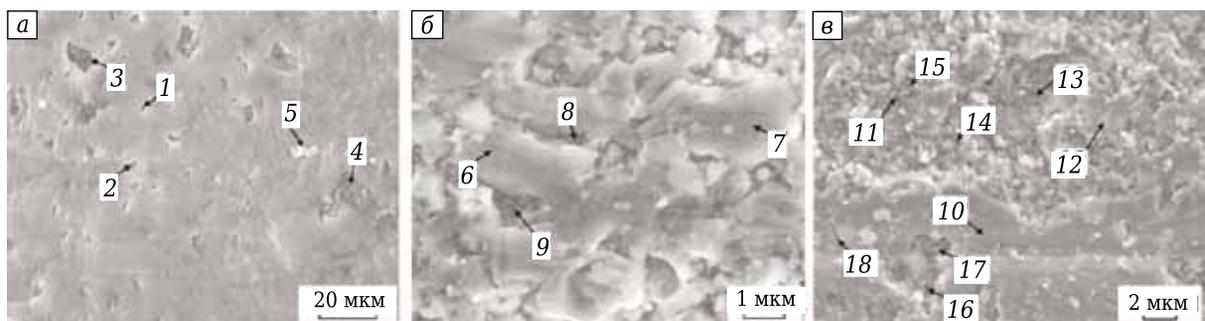
Общим признаком образовавшихся изолированных ямок является малая глубина (до 2 мкм), а основными различиями — выраженность границы, рельеф дна и боковых стенок. Как правило, зародышевые 1 и малые 2 ямки имеют сглаженные границы и внутренние поверхности, а для крупных ямок 3 и крупных углублений 4 характерны четко выраженные границы, развитый рельеф поверхности дна и наличие боковой стенки. Развитый морфологический рисунок поверхности дна этих дефектов формируют зерна размерами до 2 мкм. Продукты формирования этих структурных дефектов удаляются из ПКО или скапливаются в углублениях на поверхности ПКО в виде частиц 5 разных форм и фракций.

Два последовательных этапа в кинетике изменения структуры бездефектного ПС КИ ВОК-71 детализируют микрофотографии, показанные на рис. 1, б и в. Первоначально происходит вертикальное расслоение исходного ПС 6 путем образования хаотично ориентированных прожилков разрушения 7 глубиной до 2 мкм, делящих исходный ПС на фрагменты (см. рис.

1, б). Эти прожилки формируются трещинами, растущими из внутреннего объема ПС от границы между внутренним подслоем и переходной зоной. При прямолинейной траектории роста трещины формируются вытянутые прожилки разрушения 8, а в случае ветвления трещин — прожилки продолговатой формы 9. Полости этих трещин расширяются на поверхности за счет скалывания внешнего и внутреннего подслоев ПС. По этой причине граница между исходной и боковой поверхностью прожилков разрушения является полой.

Второй (окончательный) этап в образовании ямок заключается в повышении площади разрушенного ПС за счет увеличения ширины прожилков разрушения и их последующего слияния (см. рис. 1, в). Видно, что между исходной поверхностью 10 и дном ямки 11 формируется четко выраженная граница. Средняя высота боковой стенки составляет около 2 мкм, что означает полное разрушение внешнего и внутреннего подслоев исходного ПС, а также частичное разрушение переходной зоны. Во внутреннем пространстве ямки присутствуют выступы 12 с фрагментами исходного ПС (не более 4 % общей площади ямок), а также углубления 13, образовавшиеся в результате разрушения подповерхностного дефектного слоя зоны (не более 10 % общей площади ямок). На дне ямок обнаружены полости вытянутой формы 14 и зародышевые трещины 15. Одновременно с увеличением размера уже образовавшихся ямок и крупных углублений в исходном ПС при эксплуатации КИ ВОК-71 образуются новые ямки вытянутой 16 и продолговатой 17 формы. В непосредственной близости от новых ямок зарождаются трещины 18.

Статистический анализ ямок на момент выхода КИ ВОК-71 из работоспособного состояния показал, что их число и размеры зависят от мощности источника теплоты, действующего на ПИ, и удаленности от границы с ПИ. Установлено, что при использованном режиме эксплуатации КИ ВОК-71 (точение стали ШХ15, скорость резания  $v = 140$  м/мин, подача  $S = 0,075$  мм/об, глубина резания  $t = 1$  мм) площадь участков с измененной структурой ПС (с дефектами) не превышает 25, 10 и 2 % общей площади ПКО при



**Рис. 1.** Кинетика изменения структуры бездефектного ПС КИ ВОК-71 при эксплуатации

удалении на 0,1, 0,5 и 1 мм от границы с ПИ. В соответствии с принятой системой оценки эти изменения структуры ПС КИ ВОК-71 относятся к первому уровню (до 40 % изменений на участке размерами 0,1×0,1 мм).

Установлено, что изменение структуры бездефектного ПС в ПКО не оказывает значимого влияния на эксплуатационный ресурс КИ ВОК-71 и характер их отказов.

### Кинетика изменения структуры дефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО

Наиболее интересные результаты получены при исследовании изменения структуры дефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО. Установлено, что изменение структуры дефектного ПС влияет на ресурс КИ ВОК-71 за счет уменьшения способности керамики сопротивляться развитию трещин. Микрофотографии, показанные на рис. 2, иллюстрируют двухстадийный переход КИ ВОК-71 из работоспособного состояния в неработоспособное. На первом этапе эксплуатации происходит существенное изменение структуры ПС в ПКО (см. рис. 2, а и б), на втором этапе — разрушение КИ ВОК-71 (см. рис. 2, в и г). Проанализируем эти процессы.

На этапе приработки (приблизительно через 0,5–1 мин эксплуатации) КИ ВОК-71 с дефектным ПС активизируется процесс зональной дезинтеграции структуры ПС. Результат этого процесса — спонтанное нарушение связей между структурными элементами керамики с образованием трещин, полостей и ямок размерами до 5 мкм (меньше, чем размер зерен в ис-

ходной керамике) в замкнутой локальной зоне. Степень произошедших изменений в структуре ПС КИ ВОК-71 уже в начальный момент дезинтеграции может достигать 50 % (второй уровень изменений по принятой системе оценки).

В рассматриваемом примере (см. рис. 2, а) первичная дезинтеграция ПС происходит в зоне 1, центральная часть которой удалена на расстояние 0,6 мм от границы А между ПИ и ПКО. ПС приобретает характерную дефектную морфологию, определяемую хаотично расположенными трещинами, полостями, углублениями и ямками. Размер этой зоны через 1 мин эксплуатации КИ ВОК-71 составляет около 50 мкм. Дальнейшая эксплуатация КИ ВОК-71 приводит к увеличению ее площади и повышению насыщенности дефектами. Через 2 мин эксплуатации КИ ВОК-71 размер зоны дезинтеграции увеличивается до 60 мкм, а морфологический рисунок становится более развитым за счет роста размеров единичных дефектов. С некоторым временным запаздыванием аналогичный процесс активизируется также в зоне 2. Через 3 мин эксплуатации КИ ВОК-71 зоны 1 и 2 вытягиваются вдоль границы А и сравниваются по размеру; однако степень изменения структуры ПС в зоне 1 значительно выше, чем в зоне 2. Через 6 мин эксплуатации КИ зоны 1 и 2 объединяются и формируют вторичную зону 3 дезинтеграции размерами более 300 мкм (см. рис. 2, б). Далее зона 3 расширяется в сторону границы А, а степень дефектности ПС внутри этой зоны увеличивается и превышает 70 % (третий уровень изменений по принятой системе оценки).

На втором этапе эксплуатации КИ ВОК-71 последовательно происходят первичные сколы керамики с эпицентром в зоне вторичной дезинтеграции и полное разрушение КИ ВОК-71. Видно (см. рис. 2, в), что первоначально происходят сколы 4 и 5 с отделением тонких чешуек керамики и образованием на поверхности фасетчатого рельефа. Фасетки от этих двух сколов взаимно перекрываются и имеют малую глубину проникновения в ПС, что свидетельствует о практически одновременном критическом росте трещин из вторичной зоны 3 дезинтеграции, контур которой обозначен замкнутой линией Б. Затем появляется совокупность сколов керамики в области б с образованием сту-

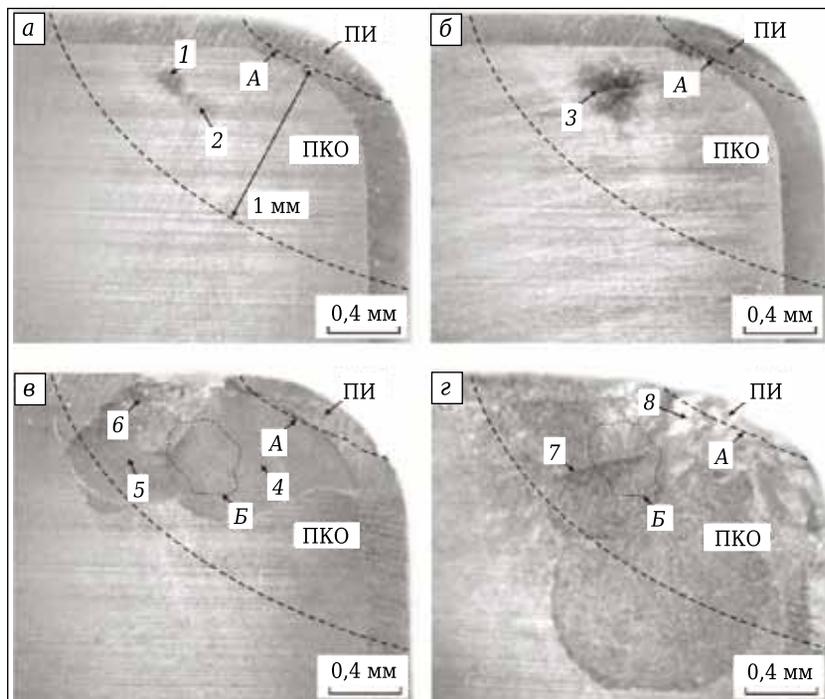


Рис. 2. Кинетика изменения морфологии дефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО через 3 (а), 6 (б), 9 (в) и 11 мин эксплуатации (г)

пенчатой поверхности. Следует отметить, что после такого рода частичных разрушений более 63 % КИ ВОК-71 оставалось в работоспособном состоянии и продолжало эксплуатироваться.

Заключительной стадией второго этапа эксплуатации является полное разрушение КИ ВОК-71 за счет большого числа «чешуйчатых» сколов (см. рис. 2, з). Следует обратить внимание на два обстоятельства, показанные на этой микрофотографии. Первое — гребень 7, образовавшийся в результате нескольких сколов, пересекает контур *Б* (бывшая вторичная зона 3 дезинтеграции) на две равные части. Второе — сколы 8 керамики, расположенные на бывшей ПИ, имеют несколько сглаженный рельеф, что является характерным признаком разрушения керамики с некоторой долей пластичности [5–7]. Эти обстоятельства можно связать с продолжением процесса изменения структуры ПС даже после первых сколов.

Приведенные результаты свидетельствуют о том, что основной причиной отказа КИ ВОК-71 с дефектным ПС является его измененная структура в результате зональной дезинтеграции. На характер зональной дезинтеграции ПС влияют внутренние (структура керамики и ПС) и внешние (бесконтактно передаваемые эксплуатационные нагрузки) факторы. Так как случаев зональной дезинтеграции в бездефектном ПС зафиксировано не было, то очевидно, что для активации этого хаотичного и неравномерного процесса необходимо определенное сочетание внутренних и внешних факторов.

Эти условия (специфическое напряженное состояние ПС и присутствие некоторых скрытых дефектов, имеющих высокую плотность) могут быть созданы при шлифовании [8–10]. Высокая нестабильность шлифования, локальный нагрев ПС заготовки до критической температуры под воздействием интенсивного источника тепла, образующегося в зоне контакта шлифовального круга с заготовкой, вполне могут создать эти условия. Например, при шлифовании стальных заготовок твердым абразивным кругом при интенсивном режиме и без использования достаточного объема смазочно-охлаждающей жидкости на их поверхности образуются термические трещины и происходит локальное изменение структуры ПС (прижог). Эти дефекты, хаотично расположенные на шлифованных поверхностях стальных заготовок, хорошо различимы даже без оптических приборов. Однако упоминания о проявлении аналогичного эффекта при шлифовании керамических заготовок в научной литературе отсутствуют. Это определило необходимость выявления возможной связи этого термического эффекта при шлифовании с зональной дезинтеграцией структуры ПС КИ ВОК-71. Дополнительный анализ шлифованной поверхности и результатов численного модели-

рования показал, что в объеме столь сложного по архитектуре и дефектного ПС, включающего два подслоя, переходную зону и подповерхностный дефектный слой, вполне могут быть созданы условия для последующей (при эксплуатации) зональной дезинтеграции ПС КИ ВОК-71.

Установлено, что переход структуры ПС КИ ВОК-71 из исходного состояния в измененное происходит лавинообразно на разных участках ПКО с небольшими временными интервалами. Первичный результат зональной дезинтеграции ПС в единичной замкнутой зоне показан на рис. 3. Видно, что в исходном ПС 1 образовались изолированная зона 2 с хаотичной границей, внутри которой располагаются многочисленные трещины 3, полости 4 и одиночные ямки 5, а также объединенные ямки 6. Размеры этих дефектов постепенно увеличиваются при эксплуатации КИ ВОК-71 за счет сколов внешнего и внутреннего подслоев исходного ПС при росте трещин в исходном ПС КИ. Интенсивность образования замкнутых зон дезинтеграции ПС уменьшается по мере удаления от ПИ и повышается при увеличении длительности эксплуатации КИ ВОК-71. Наличие многочисленных дефектов разной формы определяет развитый морфологический рисунок внутри границы зоны дезинтеграции ПС.

Образовавшиеся зоны дезинтеграции ПС являются очагами дальнейшего изменения структуры ПС. Постепенно этот процесс приводит к образованию изолированных зон с полностью разрушенным ПС и развитой морфологией поверхности дна. На этих поверхностях обнаружено большое число хаотично ориентированных трещин разного размера. Их дальнейший рост и многократное ветвление приводят к сколам ПС КИ ВОК-71. Изменение структуры дефектного ПС в ПКО оказывает решающее влияние на эксплуатационный ресурс КИ ВОК-71 и характер их отказов.

Выявленные особенности изменения структуры ПС при эксплуатации КИ ВОК-71 имеют

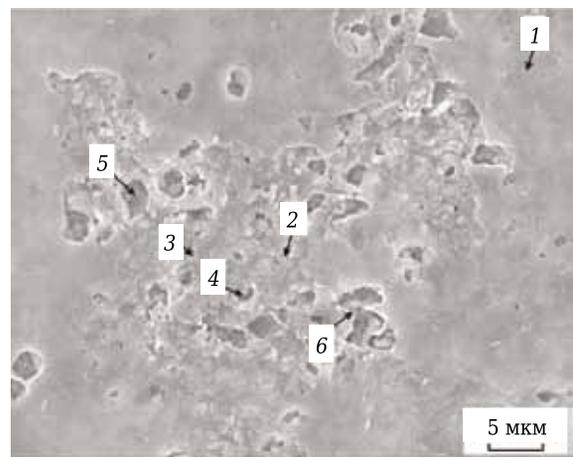


Рис. 3. Первичный результат зональной дезинтеграции дефектного ПС КИ ВОК-71

важное прикладное значение для системной оценки эффективности разных технологических методов изготовления КИ [11]. Предполагается использовать установленные закономерности для формулирования дополнительных требований на проектирование технологических процессов изготовления КИ.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании результатов проведенных исследований сделаны следующие выводы:

- **по части 1 статьи.** С использованием разработанной методики установлено, что под действием специфического комплекса тепловых и силовых нагрузок при шлифовании КИ ВОК-71 на его поверхности формируется сложный по архитектуре ПС, включающий внешний и внутренний подслои, переходную зону и подповерхностный дефектный слой. Каждый из этих слоев имеет специфическую структуру и характеризуется определенной совокупностью дефектов. ПС является новым структурным элементом керамики и неотъемлемой частью изготовленного КИ, существенно влияющим на его эксплуатационные характеристики.

Кинетику изменения структуры ПС КИ ВОК-71 в области контактного взаимодействия с образованием площадки износа определяет взаимосвязанная цепочка «специфическое напряженно-деформированное состояние – элементарный акт разрушения». Специфику напряженно-деформированного состояния ПС КИ ВОК-71 определяют неоднородность напряжений на границах структурных элементов керамики и концентраторы напряжений вокруг дефектов. Кинетика изменения структуры ПС включает три основных этапа: первый — разрушение ПС, сформировавшегося при шлифовании; второй — разрушение подповерхностного дефектного слоя, сформировавшегося при шлифовании; третий — разрушение подповерх-

ностного бездефектного слоя, имеющего структуру спеченной керамики ВОК-71. Несмотря на общие закономерности в изменении структуры поверхности керамики каждый из этих этапов сопровождается специфическими эффектами, существенно воздействующими на его кинетику и последствия;

- **по части 2 статьи.** Изменение структуры бездефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО включает два этапа. Первый этап — вертикальное расслоение исходного ПС за счет образования хаотично ориентированных прожилок разрушения глубиной до 2 мкм, второй этап — образование дефектов в виде ямок за счет увеличения ширины прожилок разрушения и их последующего слияния. Изменение структуры бездефектного ПС в ПКО не оказывает значимого влияния на эксплуатационный ресурс КИ ВОК-71 и характер их отказов.

В основе изменения структуры дефектного ПС КИ ВОК-71 в ПКО лежит процесс зональной дезинтеграции структуры ПС, результатом которого является спонтанное нарушение связей между структурными элементами керамики с образованием трещин, полостей и ямок размерами до 5 мкм в замкнутой локальной зоне. Степень произошедших изменений в структуре ПС КИ ВОК-71 уже в начальный момент дезинтеграции может достигать 50 %. Столь существенное изменение структуры ПС уменьшает способность керамики сопротивляться росту трещин, что приводит к частичному, а затем к полному разрушению КИ ВОК-71. Изменение структуры дефектного ПС в ПКО оказывает решающее влияние на эксплуатационный ресурс КИ ВОК-71 и характер их отказов.

\*\*\*

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

## Библиографический список

1. Кузин, В. В. Изменение структуры поверхностного слоя керамических изделий при эксплуатации. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2020. — № 2. — С. 39–45.
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.

6. **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.

7. **Kuzin, V.** Tool life and wear mechanism of coated  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic tools in turning grey cast iron / V. Kuzin, S. Grigoriev // Key Eng. Mater. — 2014. — Vol. 581. — P. 14–17.

8. **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.

9. **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.

**Кузин, В. В.** Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на осно-

ве нитрида кремния / В. В. Кузин // Новые огнеупоры. — 2006. — № 8. — С. 19–24.

10. **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.

11. **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.

**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. ■

Получено 02.03.20

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

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Ceramics 2020

6<sup>th</sup> International Conference and Expo on

## CERAMICS AND COMPOSITE MATERIALS

Международная конференция и выставка по  
КЕРАМИКЕ И КОМПОЗИТНЫМ  
МАТЕРИАЛАМ

8–9 июня 2020 г. г. Франкфурт, Германия

**Тематика:**

- Биокерамика и ее клиническое применение
- Инновационная обработка керамики
- Передовая керамика: синтез, свойства и применение
- Характеристика и моделирование материалов
- Передовые материалы для преобразования солнечной энергии
- Сверхвысокотемпературный керамический матричный композит
- Современные композитные материалы
- Структурные керамические композиты
- Сверхвысокотемпературные композиты
- Инновационные волокна

[www.ceramics.insightconferences.com](http://www.ceramics.insightconferences.com)

