

Д. т. н. **В. В. Кузин** (✉), д. т. н. **С. Н. Григорьев**, к. т. н. **С. Ю. Федоров**

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

УДК 666.3:546.831-31+669.14-62-436.1].017:539.92

## ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОЙ ПАРЫ ТРЕНИЯ Y-TZP-КЕРАМИКА – ЗАКАЛЕННАЯ СТАЛЬ

Установлена взаимосвязь параметров режима шлифования с характером фрикционного взаимодействия и трибологическими характеристикам гибридной пары трения образец Y-TZP-керамики – стальной шарик на этапе приработки. Показано, что механизм влияния технологии изготовления керамической детали на условия фрикционного взаимодействия, коэффициент трения, ширину и состояние дорожки трения базируется на изменении шероховатости и морфологии шлифованной поверхности керамики после финишной обработки. С использованием выявленных закономерностей разработаны технологические рекомендации по изготовлению керамических деталей для гибридных трибоузлов.

**Ключевые слова:** Y-TZP-керамика, режим шлифования, шероховатость, морфология поверхности, трение, трибологические характеристики, перенос материала, износ.

### ВВЕДЕНИЕ

**Н**адежность гибридных узлов трения при проектировании обеспечивается за счет выполнения триботехнических требований, сформулированных на основе экспериментально установленных трибологических характеристик для пары металл – керамика, а при изготовлении — безусловным выполнением требований по точности деталей и качеству их поверхности [1, 2]. Практика создания и эксплуатации этих узлов трения показывает, что для керамических деталей, имеющих повышенную чувствительность к условиям эксплуатации, целесообразно объединить исследовательские, конструкторские и технологические процедуры в единую систему принятия рациональных решений в условиях недостаточной информации о поведении гибридных узлов трения при эксплуатации [3].

В настоящее время этот подход фрагментарно используется при создании керамических материалов трибологического назначения и изготовлении деталей из них. Например, в статьях [4–7] показано, что управление трибологическими характеристиками пары циркониевая керамика (Y-TZP-керамика) – металл позволяет повысить эффективность узлов трения из этих

материалов. Установлена [8, 9] связь условий шлифования с качеством рабочих поверхностей, со степенью дефектности поверхностного слоя, с коэффициентом трения и интенсивностью износа деталей из  $Al_2O_3$ - и SiSiC-керамики. Вопросы роста износостойкости Y-TZP-керамики за счет повышения однородности структуры, минимизации дефектов, введения в ее состав наноразмерных волокон и пластин графена обсуждаются в публикациях [10–17]. В статьях [18–22] показана перспективность управления трибологическими характеристиками деталей из Y-TZP-керамики за счет их эффективной механической обработки и структурной модификации поверхностного слоя. Механизм износа рабочих поверхностей трибопары шарик из Y-TZP-керамики – покрытие AlCrN на нержавеющей стали при разных скоростях трения изучен авторами статьи [23]. Несмотря на очевидную актуальность этого научного подхода, многочисленные связи в цепочке исследование – проектирование – изготовление – эксплуатация для керамических деталей остаются неопределенными, что замедляет темпы внедрения гибридных узлов трения.

В настоящей работе поставлена цель — изучить влияние параметров режима шлифования поверхности образцов Y-TZP-керамики на характер фрикционного взаимодействия и трибологические характеристики гибридной пары трения Y-TZP-керамика – закаленная сталь на этапе приработки.



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

## МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Трибологические характеристики пары трения Y-TZP-керамика – закаленная сталь исследовали по кинематической схеме неподвижный шарик – плоская поверхность вращающегося образца на трибометре Basalt-2N. В испытаниях фиксировали тангенциальную силу  $F_{тр}$  и коэффициент трения  $\mu$ , а после окончания испытаний измеряли ширину дорожки трения  $b$  на образце в восьми симметрично расположенных точках с последующим нахождением среднего значения, площадь  $s$  налипov на дорожке трения (в процентах от ее общей площади) и исследовали ее морфологию.

Использовали образцы Y-TZP-керамики ( $\sigma_{изг} = 950$  МПа,  $K_{1с} = 9,0$  МПа·м<sup>1/2</sup>,  $\rho = 6,0$  г/см<sup>3</sup>) размерами 25×25×5 мм с разной шероховатостью и морфологией поверхностей, а также шарики диаметром 6 мм из стали ШХ15 (63 HRC, класс точности 40), неподвижно закрепленные в цанговом патроне трибометра. Условия трения: частота вращения образца  $\omega$  50 мин<sup>-1</sup>, нормальная сила прижима  $F_n$  20 Н, диаметр дорожки трения 18 мм, длина пути  $L$  200 м. Разные значения шероховатости  $Ra$  и морфологии поверхности на образцах создавали за счет изменения параметров режима плоского шлифования алмазным кругом 1A1B2-01 100 % AC6 160/125 на станке модели ОШ-440. Образцы шлифовали при девяти режимах; изменяли продольную подачу  $S_{пр}$  в диапазоне 5–15 м/мин, поперечную подачу  $S_{поп}$  в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход, глубину шлифования  $t$  в диапазоне 0,01–0,05 мм. Скорость круга  $v_{кр}$  в этих экспериментах оставалась неизменной и составляла 30 м/с.

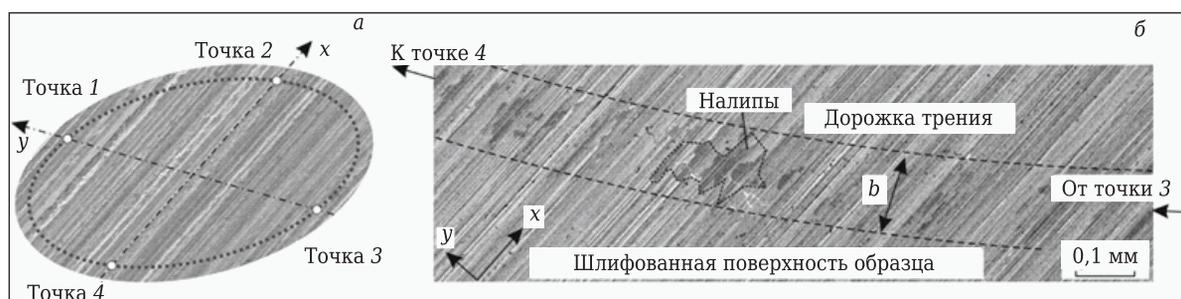
Шероховатость поверхности керамических образцов измеряли на приборе Hommel Tester T8000 по осям  $x$  и  $y$ , причем ось  $x$  соответствовала продольному направлению шлифования и, соответственно, направлению выступов на поверхности, ось  $y$  — поперечному направлению шлифования и, соответственно, поперечному направлению выступов. Параметры  $b$  и  $s$  измеряли на оптическом микроскопе Stereo Discovery V12 (Zeiss). Морфологию шлифованной поверхности керамики и дорожек трения изучали на

сканирующем электронном микроскопе VEGA 3 LMH после нанесения токопроводящей пленки в установке катодного распыления Quorum Q150R ES.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В начальный момент фрикционного взаимодействия микровыступы на поверхности шарика контактируют с гребнями выступов на поверхности образца. Общий вид траектории перемещения шарика по поверхности образца и фрагмент дорожки трения, показанные на рис. 1, свидетельствуют о сложном характере фрикционного взаимодействия в этой трибопаре из-за ориентированного (по оси  $x$ ) морфологического рисунка поверхности образца. Установлено, что в точках 1 и 3 траектория скольжения шарика совпадает с направлением гребней (см. рис. 1,  $a$ ), в точках 2 и 4 шарик скользит поперек гребней, а в четырех секторах между этими точками угол преодоления шариком гребней изменяется. Одновременно с этим изменяется значение фактической площади контакта шарика и образца на одном обороте заготовки; в точках 1 и 3 это значение является наименьшим, в точках 2 и 4 — наибольшим.

На следующем этапе приработки гибридной пары трения состояние контактирующих поверхностей ее элементов изменяется: на шарике образуется площадка износа, а на образце формируется дорожка трения, частично покрытая налипками стали. Появление наливов связано с переносом стали на керамику в результате срезания микростружки с шарика заостренными гребнями образца и последующего «размазывания» части этой микростружки по шероховатой поверхности керамики из-за образующихся адгезионных мостиков связи между сталью и керамикой. Основной объем налива равномерно размещается между выступами на поверхности образца, причем толщина налива определяется размерами поперечного профиля поверхности образца. Установлено, что с ростом длительности трения площадь, занимаемая налипками на дорожке трения, постепенно увеличивается.



**Рис. 1.** Траектория взаимного перемещения стального шарика и образца Y-TZP-керамики (а) и состояние дорожки трения (б) на этапе приработки

Наибольшая интенсивность процесса образования налипov зафиксирована в центральной части дорожки трения на поверхности образцов, шлифованных на наиболее интенсивных режимах и имеющих остроконечные зазубренные гребни. По периметру дорожки трения налипov распределены неравномерно; наибольшая интенсивность образования налипov зафиксирована в точках 2 и 4, в которых шарик скользит поперек гребней, наименьшая — в точках 1 и 3, в которых шарик скользит вдоль рисок. В качестве примера на рис. 1, б показаны налипov стали, образовавшиеся на участке дорожки трения между точками 3 и 4.

На внешней поверхности налипov имеются многочисленные риски 1, ориентированные в направлении скольжения шарика и свидетельствующие о действии абразивного процесса в зоне фрикционного взаимодействия гибридной пары трения (рис. 2). Под действием циклических силовых и тепловых нагрузок на внешнюю поверхность налипov, инициируемых скользящим шариком, в налипках образуются и растут многочисленные трещины 2, приводящие к разрушению 3 и отслоению 4 их фрагментов. Образование сетки крупных трещин 5 способно инициировать полное разрушение налипa, причем его фрагменты оказывают как абразивное воздействие с образованием рисок на внешнюю поверхность налипov и исходную шлифованную поверхность керамики, так и способны шаржироваться в соседний налип 6. В результате полного или частичного разрушения налипov обнажается исходная шлифованная поверхность Y-TZP-керамики. Совместное действие адгезионного и абразивного механизмов износа приводит к зарождению эксплуатационных дефектов в поверхностном слое Y-TZP-керамики.

Налипov на дорожке трения оказывают двойственное влияние на трибологические характеристики гибридной пары трения. С одной стороны, сглаживают поверхности трения, увеличивают прилегание их друг к другу при тре-

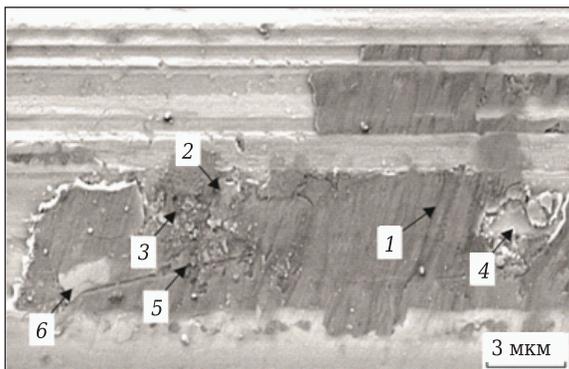


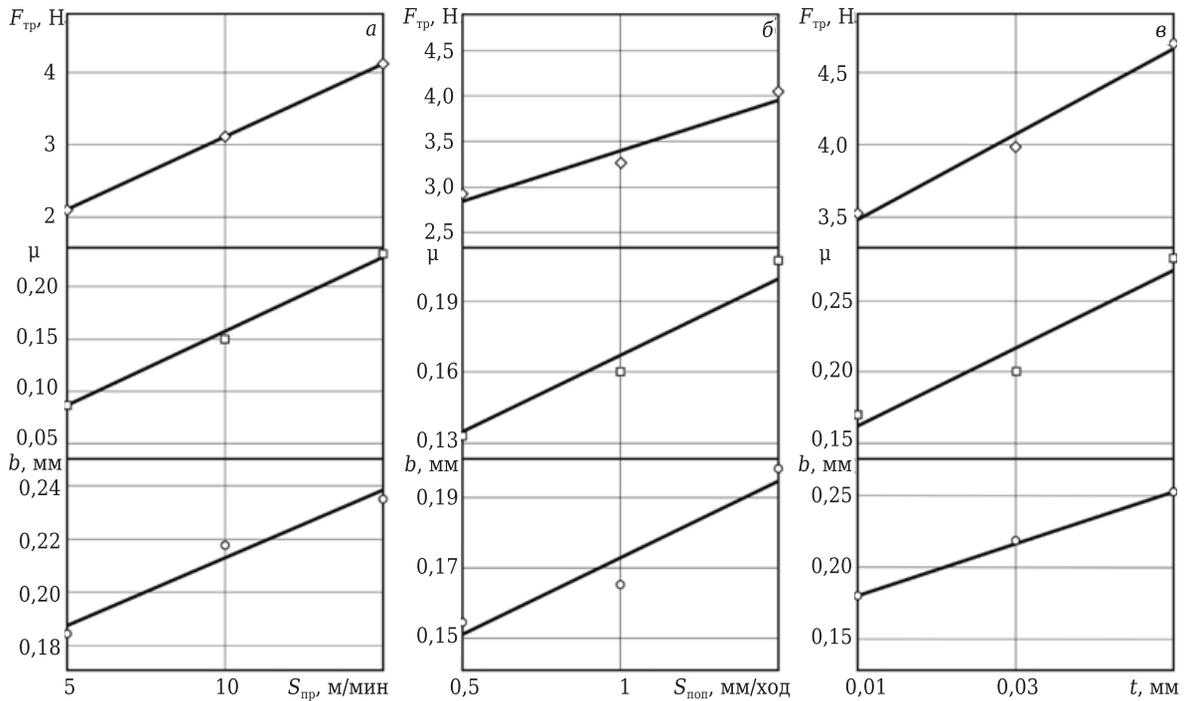
Рис. 2. Характер образования и разрушения налипov на дорожке трения образца Y-TZP-керамики

нии и снижают интенсивность износа шарика. С другой стороны, образовавшиеся налипov усложняют характер фрикционного взаимодействия шарика и образца за счет: 1 — чередования участков, на которых реализуется трение сталь — керамика и сталь — сталь; 2 — увеличения площади фактического контакта шарика и образца и повышения мощности теплового источника; 3 — периодических разрушений налипov, генерирующих дополнительные циклические нагрузки, негативно влияющие на состояние поверхностного слоя керамики.

Результаты исследования трибологических характеристик скользящего контакта стального шарика с образцом Y-TZP-керамики на этапе приработки показаны на рис. 3. Представление экспериментальных данных в виде зависимостей параметр режима шлифования — трибологические характеристики позволило оценить влияние шероховатости и морфологии поверхности образцов на фрикционное взаимодействие гибридной пары трения.

Установлено, что наименьшие значения трибологических характеристик  $F_{тр}$ ,  $\mu$  и  $b$  гибридной трибопары Y-TZP-керамика — сталь зафиксированы при испытании образцов, шлифованных при менее интенсивных режимах. Повышение  $S_{пр}$  в диапазоне 5–15 м/мин ( $S_{поп}$  1 мм/ход и  $t$  0,04 мм) приводит к увеличению  $F_{тр}$  от 2,1 до 4,1 Н,  $\mu$  от 0,09 до 0,23,  $b$  от 0,19 до 0,24 мм (см. рис. 3, а). При возрастании  $S_{поп}$  в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход ( $S_{пр}$  10 м/мин и  $t$  0,04 мм)  $F_{тр}$  увеличивается от 2,9 до 4 Н,  $\mu$  от 0,14 до 0,21,  $b$  от 0,16 до 0,23 мм (см. рис. 3, б). Повышение  $t$  в диапазоне 0,01–0,05 мм ( $S_{пр}$  = 10 м/мин и  $S_{поп}$  = 1 мм/ход) приводит к увеличению  $F_{тр}$  от 3,5 до 4,8 Н,  $\mu$  от 0,17 до 0,28,  $b$  от 0,18 до 0,25 мм (см. рис. 3, в). Наибольшее влияние на трибологические характеристики шлифования оказывает глубина шлифования.

Характер изменения трибологических характеристик гибридной трибопары Y-TZP-керамика — сталь в зависимости от параметров режима шлифования в полной мере коррелирует с изменением шероховатости шлифованной поверхности керамики. Установлено, что увеличение  $S_{пр}$ ,  $S_{поп}$  и  $t$  приводит к повышению параметра  $Ra$ , измеренного как вдоль, так и поперек направления шлифования, причем значения  $Ra$ , измеренного поперек шлифования, выше, чем вдоль шлифования. Установлено, что при повышении  $S_{пр}$  в диапазоне 5–15 м/мин ( $S_{поп}$  = 1 мм/ход и  $t$  = 0,04 мм)  $Ra$  увеличивается от 0,09 до 0,14 и от 0,44 до 0,53 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно. При увеличении  $S_{поп}$  в диапазоне 0,5–1,5 мм/ход ( $S_{пр}$  = 10 м/мин и  $t$  = 0,04 мм)  $Ra$  увеличивается от 0,12 до 0,20 и от 0,49 до 0,57 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно. При повышении  $t$  в диапазоне

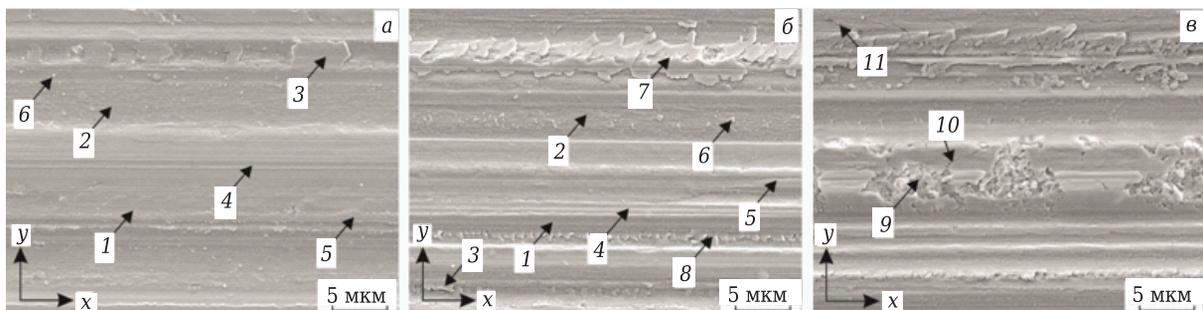


**Рис. 3.** Влияние  $S_{пр}$  (а),  $S_{поп}$  (б) и  $t$  (в) на трибологические характеристики гибридной трибопары Y-TZP-керамика – сталь

0,01–0,05 мм ( $S_{пр} = 10$  м/мин и  $S_{поп} = 1$  мм/ход)  $Ra$  увеличивается от 0,1 до 0,15 и от 0,42 до 0,54 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно.

Выявленное изменение шероховатости свидетельствует о трансформации морфологии шлифованной поверхности образцов Y-TZP-керамики при изменении режима шлифования. На основе анализа морфологических рисунков поверхностей, шлифованных при разных режимах и приведенных в статьях [24, 25], выделены три характерных морфологии, отражающих специфику их сложной рельефной анизотропии. Фрагмент поверхности со сглаженной морфологией, образующейся при наименее интенсивных режимах шлифования, показан на рис. 4, а, с развитой морфологией, образующейся при средних режимах шлифования, — на рис. 4, б, с грубой морфологией, образующейся при интенсивных режимах шлифования, — на рис. 4, в.

Основными элементами базового морфологического рисунка этих поверхностей являются чередующиеся выступы 1 и впадины 2, создающие условия для срезания микростружки с шарика и образования наливов на дорожке трения. Размеры и частота чередования выступов существенно зависят от параметров режима шлифования: например, с увеличением  $t$  значительно повышается контрастность рельефа шлифованной поверхности. Специфические особенности в эти морфологические рисунки вносят дополнительные элементы, к которым относятся продольные риски и наплывы, каплеобразные частицы, чешуйчатые наплывы, создающие ступенчатые перепады на выступах, а также разнонаправленные трещины и зоны локального разрушения. Появление этих дополнительных элементов в базовом морфологическом рисунке поверхности происходит под действием определенной совокупности силовых и тепловых на-



**Рис. 4.** Влияние режима шлифования на морфологию поверхности образцов Y-TZP-керамики

грузок, характерных для конкретного режима шлифования.

Установлено, что поверхности первого вида со сглаженной морфологией характеризуются равномерным волнообразным рельефом, образованным выступами 1 со скругленными гребнями и впадинами 2 (см. рис. 4, а). Внутреннее пространство впадин заполняют многочисленные чешуйчатые наплывы 3, а на поверхности выступов имеются продольные риски 4, продольные наплывы 5 и хаотично расположенные каплеобразные частицы 6. На поверхности Y-TZP-керамики со сглаженной морфологией не обнаружены трещины и зоны локального разрушения. Значения  $Ra$  для морфологии этого вида не превышают 0,1 и 0,4 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно.

Поверхности второго вида с развитой морфологией характеризуются волнообразным рельефом с нестабильной частотой чередования выступов 1 с угловатыми гребнями и впадинами 2 (см. рис. 4, б). Чешуйчатые наплывы 3, продольные многочисленные риски 4 и продольные наплывы 5, образующие ступенчатые переходы от выступа к впадине, придают дополнительную развитость и разновысотный профиль поверхностям этого вида. На поверхности этого вида также присутствуют скопления каплеобразных частиц 6, продольные гребнеобразные выступы 7 и складчатые разрывы 8; трещины и области локального разрушения отсутствуют. Значения  $Ra$  для морфологии этого вида изменяются в диапазонах 0,1–0,3 и 0,3–0,5 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно.

Поверхности третьего вида с грубой морфологией имеют все элементы морфологического рисунка, присущие уже проанализированным поверхностям, а также многочисленные зоны локального разрушения 9, образовавшиеся в результате отслоения фрагментов дефектного поверхностного слоя на гребне выступов (см. рис. 4, в). От зон локального разрушения растут многочисленные поперечные трещины 10, а от продольных гребнеобразных выступов развиваются продольные трещины 11. Поверхности с этим типом морфологии имеют наиболее разновысотный профиль при увеличенной ширине впадин и выступов; значения  $Ra$  превышают 0,3 и 0,5 мкм в продольном и поперечном направлении соответственно.

Сопоставление зависимостей, описывающих связи параметров режима шлифования с трибологическими характеристиками и с морфологией шлифованной поверхности образцов, показало, что механизм влияния технологии изготовления керамической детали на условия фрикционного взаимодействия, коэффициент трения, ширину и состояние дорожки трения базируется на изменениях

шероховатости и морфологии шлифованной поверхности керамики после финишной обработки. С интенсификацией режима шлифования возрастает число и высота выступов на поверхности, по которым происходит контактное взаимодействие стального шарика в первоначальный момент трения. В результате интенсификации режимов шлифования увеличивается высота поперечного профиля поверхности образцов и формируются заостренные гребни, ступенчатые перепады и зоны локального разрушения. Эти изменения существенно влияют на характер фрикционного взаимодействия шарика и образца, так как являются препятствиями для свободного скольжения шарика, инициируют многочисленные акты схватывания контактирующих поверхностей, увеличивают размеры и толщину налипов, а также неоднородность их распределения на дорожке трения. В совокупности с режимом трения эти взаимосвязанные факторы порождают эффект скачкообразного движения и генерируют нестационарные силовые и тепловые нагрузки, негативно влияющие на состояние поверхностного слоя керамики. В наибольшей степени негативность этих факторов проявляется при трении шарика и поверхности третьего вида; при длине трения  $L$  200 м обнаружено появление новых очагов разрушения поверхностного слоя керамики на дорожке трения. В двух других случаях изменений в состоянии поверхностного слоя керамики на дорожке трения не зафиксировано.

## **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В результате проведенных исследований вскрыта природа связи параметров режима шлифования образцов Y-TZP-керамики с характером фрикционного взаимодействия и трибологическими характеристиками гибридной пары трения Y-TZP-керамика – закаленная сталь на этапе приработки. Установлено, что шероховатость и морфология поверхности керамических образцов, определяемые режимом шлифования, приводят к увеличению тангенциальной силы, коэффициента трения, ширины дорожки трения, размеров налипов и неоднородности их распределения на дорожке трения. С использованием выявленных закономерностей разработаны технологические рекомендации по изготовлению керамических деталей для гибридных трибоузлов, обеспечивающие более полное использование их потенциальных возможностей. Основное положение предложенных рекомендаций — обоснованная целесообразность применения для финишной обработки рабочих поверхностей керамических деталей гибридных узлов трения технологиче-

ских методов, создающих разнонаправленный морфологический рисунок с минимальной высотой профиля.

**Библиографический список**

1. **Garg, H. C.** Performance of slot-entry hybrid journal bearings considering combined influences of thermal effects and non-Newtonian behavior of lubricant / *H. C. Garg, V. Kumar, H. B. Sharda* // Tribology International. — 2010. — Vol. 43, № 8. — P. 1518–1531.
2. **ГОСТ Р 50740–95** Триботехнические требования и показатели. Принципы обеспечения. Общие положения. Дата введения 01-01-1996.
3. **Kuzin, V. V.** Service-induced damages of the ceramic thrust bearing pivot in the seal section of electrical centrifugal pump system / *V. V. Kuzin, S. Y. Fedorov, V. L. Reutov, V. V. Koshcheev* // Refract. Ind. Ceram. — 2019. — Vol. 59, № 5. — P. 564–568.  
**Кузин, В. В.** Эксплуатационные повреждения пяты упорного керамического подшипника в узле гидрозашиты установки электроцентробежных насосов / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, В. Л. Реутов, В. В. Кошчев* // Новые огнеупоры. — 2018. — № 1. — С. 63–67.
4. **Birkby, I.** The effect of surface transformation on the wear behaviour of zirconia TZP ceramics / *I. Birkby, P. Harrison, R. Stevens* // J. Eur. Ceram. Soc. — 1989. — Vol. 5, № 1. — P. 37–45.
5. **Novak, S.** Structural changes in ZrO<sub>2</sub> ceramics during sliding under various environments / *S. Novak, G. Drazic, M. Kalin* // Wear. — 2005. — Vol. 259, № 1–6. — P. 562–568.
6. **Tucci, A.** Microstructure and tribological properties of ZrO<sub>2</sub> ceramics / *A. Tucci, L. Esposito* // Wear. — 1994. — Vol. 172, № 2. — P. 111–119.
7. **Woydt, M.** Unlubricated sliding behaviour of various zirconia-based ceramics / *M. Woydt, J. Kadoori, K.-H. Habig, H. Hausner* // J. Eur. Ceram. Soc. — 1991. — Vol. 7, № 3. — P. 135–145.
8. **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.  
**Кузин, В. В.** Влияние режимов алмазного шлифования на трибологические характеристики керамики на основе оксида алюминия / *В. В. Кузин, С. Ю. Федоров, А. Е. Селезнев* // Трение и износ. — 2016. — Т. 37, № 4. — С. 475–481.
9. **Марков, М. А.** Трибологические экспресс-исследования износостойкой керамики на основе Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> с волокнами SiC в паре трения со сталью / *М. А. Марков, Д. В. Смирничков, А. В. Красиков* // Вопросы материаловедения. — 2016. — № 3 (87). — С. 97–103.
10. **Madhav Reddy, K.** Microstructure-mechanical-tribological property correlation of multistage spark plasma sintered tetragonal ZrO<sub>2</sub> / *K. Madhav Reddy, Amartya Mukhopadhyay, Bikramjit Basu* // J. Eur. Ceram. Soc. — 2010. — Vol. 30, № 16. — P. 3363–3375.
11. **Venkata Manoj Kumar, B.** Effect of grain size on wear behavior in Y-TZP ceramics / *B. Venkata Manoj Kumar, Won-Sik Kim, Seong-Hyeon Hong, Hung-Tak Bae, Dae-Soon Lim* // Mater. Sci. Eng., A. — 2010. — Vol. 527, № 3. — P. 474–479.
12. **Hvizdoš, P.** Effect of heat treatment on wear damage mechanisms in 3Y-TZP ceramics / *Pavol Hvizdoš, Álvaro*

- Mestra, Marc Anglada* // Wear. — 2010. — Vol. 269, № 1/2. — P. 2–30.
13. **Zhang, Fei.** High-translucent yttria-stabilized zirconia ceramics are wear-resistant and antagonist-friendly / *Fei Zhang, Benedikt C. Spies, Jef Vleugels* [et al.] // Dental Materials. — 2019. — Vol. 35, № 12. — P. 1776–1790.
14. **Schiltz, Jessica.** Wear of structural oxide ceramics produced through additive manufacturing / *Jessica Schiltz, Andrew Rosenberger, Todd Render* [et al.] // Procedia Manufacturing. — 2019. — Vol. 34. — P. 780–788.
15. **Lu, Chen.** Microstructure and tribological properties of ZrO<sub>2</sub>(Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-graphite composite ceramic fabricated by milling with graphite balls / *Chen Lu, Yunlong Ai, Weihua Chen* [et al.] // Tribology International. — 2019. — Vol. 140. — P. 105874.
16. **Harrer, Walter.** Failure analysis of a ceramic ball race bearing made of Y-TZP zirconia / *Walter Harrer, Marco Deluca, Roger Morrell* // Engineering Failure Analysis. — 2014. — Vol. 36. — P. 262–268.
17. **Rodríguez-Rojas, Fernando.** Effect of 1-D and 2-D carbon-based nano-reinforcements on the dry sliding-wear behaviour of 3Y-TZP ceramics / *Fernando Rodríguez-Rojas, Rafael Cano-Crespo, Oscar Borrero-López* [et al.] // J. Eur. Ceram. Soc. — 2021. — Vol. 41, № 6. — P. 3595–3602.
18. **Pereira, G. K. R.** The effect of grinding on the mechanical behavior of Y-TZP ceramics: A systematic review and meta-analyses / *G. K. R. Pereira, S. Fraga, A. F. Montagner* [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2016. — Vol. 63. — P. 417–442.
19. **Buciumeanu, M.** The effect of surface treatment on the friction and wear behavior of dental Y-TZP ceramic against human enamel / *M. Buciumeanu, J. R. C. Queiroz, A. E. Martinelli* [et al.] // Tribology International. — 2017. — Vol. 116. — P. 192–198.
20. **Pereira, G. K. R.** Effect of grinding with diamond-disc and -bur on the mechanical behavior of a Y-TZP ceramic / *G. K. R. Pereira, M. Amaral, R. Simoneti* [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2014. — Vol. 37. — P. 133–140.
21. **Scatimburgo Polli, Gabriela.** Fatigue behavior and surface characterization of a Y-TZP after laboratory grinding and regeneration firing / *Gabriela Scatimburgo Polli, Gabriel Rodrigues Hatanaka, Filipe de Oliveira Abi-Rached* [et al.] // Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials. — 2018. — Vol. 88. — P. 305–312.
22. **Yan, Shuai.** Fabrication and tribological characterization of laser textured engineering ceramics: Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, SiC and ZrO<sub>2</sub> / *Shuai Yan, Chibin Wei, Hongbo Zou* [et al.] // Ceram. Int. — 2021. — Vol. 47, № 10. — P. 13789–13805.
23. **Antonov, M.** The effect of temperature and sliding speed on friction and wear of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, and ZrO<sub>2</sub> balls tested against AlCrN PVD coating / *M. Antonov, H. Afshari, J. Baronins* [et al.] // Tribology International. — 2018. — Vol. 118. — P. 500–514.
24. **Kuzin, V. V.** Correlation of diamond grinding regime with surface condition of ceramic based on zirconium dioxide / *V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev* // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 57, № 6. — P. 625–630.

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

25. **Kuzin, V. V.** Level of Y-TZP ceramic specimen edge defects after diamond machining / V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov, S. N. Grigor'ev // Refract. Ind. Ceram. — 2017. — Vol. 58, № 4. — P. 415–417.

**Кузин, В. В.** Уровень дефектности кромок образцов Y-TZP-керамики после алмазного шлифования / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, С. Н. Григорьев // Новые огнеупоры. — 2017. — № 7. — С. 63–65. ■

Получено 30.12.21

© В. В. Кузин, С. Н. Григорьев,  
С. Ю. Фёдоров, 2022 г.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКАЯ ИНФОРМАЦИЯ

## Тесна 2022 — 27-я международная выставка технологий и оборудования для керамической промышленности

27–30 сентября 2022 г.

г. Римини, Италия

**Tecnargilla** будет проходить в выставочном центре Римини в соответствии с традицией, которая существовала ранее. Принимая во внимание текущую международную ситуацию, единственный способ обеспечить высокий уровень ведущей мировой выставкой керамических технологий — это поддержание ее обычного двухгодичного формата. По этой причине было принято решение не изменять двухгодичную периодичность выставки, которая традиционно проводится в Римини в четные годы. **Tecnargilla**, организованная Итальянской выставочной группой в сотрудничестве с **Acimas**, меняет свое название на **Tecna**.



### Секторы выставки:

- Сырье и массы, химические изделия и добавки
- Добыча сырья и подготовка, взвешивание и дозирование
- Прессование, формование и литье
- Сушка, обжиг и тепловые системы
- Сортировка, упаковка и паллетизация
- Качество и управление производственным процессом
- Обработка поверхности, инструменты для окончательной обработки и принадлежности
- Лабораторное и измерительное оборудование
- Приспособления для применения сжатого воздуха, электричества, электронной и нагревательной системы
- Огнеупорные материалы, ролики, печная фурнитура и плиты
- Инструменты, запасные части и принадлежности
- Разное: проектирование, консультационные услуги издательства, торговые ассоциации, разные организации и т. д.

<https://en.tecnaexpo.com/>