Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). 2025 Том 27 № 2 с. 159–173
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-159-173

НГТУ НЭТИ

Обработка металлов
(технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Работоспособность композиционной керамики Y-TZP-Al_2O_3 при сухом высокоскоростном точении термически упрочнённой стали марки 40Х

Артём Бабаев [1, a, *], ***Николай Савченко*** [2, b], ***Виктор Козлов*** [3, c], ***Артём Семёнов*** [1, d], ***Михаил Григорьев*** [1, e]

[1] Национальный исследовательский Томский государственный университет, пр. Ленина, 36, г. Томск, 634050, Россия
[2] Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук, пр. Академический, 2/4, г. Томск, 634055, Россия
[3] Национальный исследовательский Томский политехнический университет, пр. Ленина, 30, г. Томск, 634050, Россия

[a] https://orcid.org/0000-0003-2334-1679, temkams@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-8254-5853, savnick@ispms.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-9351-5713, kozlov-viktor@bk.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-8663-4877, artems2102@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0009-4214-0312, mvgrigoriev@yandex.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 666.3-16; 621.9.025.7

История статьи:
Поступила: 21 марта 2025
Рецензирование: 10 апреля 2025
Принята к печати: 21 апреля 2025
Доступно онлайн: 15 июня 2025

Ключевые слова:
Оксидная керамика
Точение
Закаленная сталь
Износ

Финансирование
Работа выполнена в рамках государственного задания № FSWM-2025-0010 «Физико-химические закономерности формирования структурно-фазового состояния и физико-механических свойств композиционных керамических материалов, стойких к интенсивным термомеханическим воздействиям и износу».

АННОТАЦИЯ

Введение. Анализ современных данных в области материаловедения и применения керамических режущих инструментов для механической обработки труднообрабатываемых сплавов на основе железа и никеля показал, что в весьма малом количестве представлены экспериментальные данные об использовании перспективной керамики Y-TZP-Al_2O_3, в которой основой является субмикронный диоксид циркония, частично стабилизированный оксидом иттрия и армированный оксидом алюминия. **Цель работы.** Изучение поведения сменных режущих пластин формы RNGN 120400-01 из керамики Y-TZP-Al_2O_3 в условиях сухого высокоскоростного (200 м/мин) резания стали 40Х (HRC 43–48). **Методы исследования.** Изучение исходных порошков, а также спечённой керамики до и после испытаний при резании выполняли с применением рентгенофлуоресцентного и рентгеноструктурного анализа, а также на сканирующем электронном микроскопе в режиме BSE. Физико-механические свойства спечённой керамики были определены с использованием метода гидростатического взвешивания, трёхточечного изгиба, а также при оценке микротвердости и трещиностойкости по Виккерсу. Испытания при резании проводили на токарном станке повышенной жёсткости в условиях производственного цеха при высокоскоростном сухом точении закаленной стали 40Х (HRC 43–48) в два этапа. На первом этапе испытаний были установлены границы допускаемого варьирования режимами резания (скорость резания и подача), а также проведено изучение особенностей изнашивания и разрушения рабочих площадок режущих пластин. На втором этапе использовали керамические режущие пластины со сформированной на кромке фаской. **Результаты и обсуждение.** Установлено, что для керамики Y-TZP-Al_2O_3 режимы $V > 200$ м/мин; $S > 0{,}4$ мм/об; $t > 0{,}2$ мм являются нецелесообразным в виду кратковременной работы кромки режущей пластины, при этом необходимо обеспечивать принудительное притупление режущих кромок фаской. Наблюдаемый износ и анализ участков разрушения указывают на доминирующий механизм хрупкого усталостного разрушения, вызванного тепловым влиянием высокоскоростного трения в сочетании с касательными напряжениями от сходящей стружки. Сделан вывод, что керамическая композиция Y-TZP-Al_2O_3 является перспективным инструментальным материалом, предназначенным для сухого высокоскоростного точения как твёрдых сталей, так и, возможно, износостойких чугунов. На основании проведенных исследований и описанных наблюдений сформированы рекомендации по использованию керамики Y-TZP-Al_2O_3 в дальнейших работах.

Для цитирования: Работоспособность композиционной керамики Y-TZP-Al_2O_3 при сухом высокоскоростном точении термически упрочнённой стали марки 40Х / А.С. Бабаев, Н.Л. Савченко, В.Н. Козлов, А.Р. Семёнов, М.В. Григорьев // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 27, № 2. – С. 159–173. – DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-159-173.

Введение

Керамики имеют серьезные ограничения с точки зрения вязкости разрушения для конструкционных и некоторых неконструкционных применений, независимо от их высокой твердости и модуля упругости [1]. Прогресс в технологии получения керамики приводит в результате

***Адрес для переписки**
Бабаев Артём Сергеевич, к.т.н.
Национальный исследовательский
Томский государственный университет,
пр. Ленина, 36,
634050, г. Томск, Россия
Тел.: +7 952 805-09-26, **e-mail:** temkams@mail.ru

к созданию нового класса керамических режущих инструментов с превосходными характеристиками, способными обеспечить интенсификацию производительности [2]. Современные керамические режущие инструменты изготавливаются из керамики на основе оксида алюминия, диоксида циркония, керметов, нитрида и карбида кремния, SiAlON и др. [2].

Мартенситное превращение из метастабильной тетрагональной фазы в стабильную моноклинную фазу создает поле напряжений вокруг распространяющихся трещин, что является ключом к явлению увеличения вязкости разрушения керамики на основе диоксида циркония за счет фазового превращения [3, 4]. Легирующие примеси, такие как Y_2O_3, обычно добавляются для стабилизации высокотемпературной тетрагональной и (или) кубической фазы в микроструктуре спеченной керамики [3, 5]. Несмотря на превосходные механические свойства, использование тетрагонального поликристаллического диоксида циркония (Y-TZP) для износостойких применений ограничено из-за его низкой твердости [5]. Однако, например, микроразмерные концевые фрезы, изготовленные из керамики Y-TZP, показали наилучшие результаты среди керамических материалов с точки зрения остроты режущих кромок инструмента. Стоит отметить зафиксированные факты увеличения сопротивления износу в испытаниях по микрофрезерованию с применением инструмента из Y-TZP [6], при котором, как известно, размерные эффекты микрогеометрии режущих кромок, такие как отношение толщины срезаемого слоя к радиусу округления режущей кромки, приводят к высоким механическим напряжениям [6].

Керамические композиты с высокой твердостью и матрицей из оксида алюминия с включениями диоксида циркония, повышающими его вязкость разрушения (ZTA), широко используются в качестве керамических режущих инструментов для обработки твердых и износостойких материалов [2, 7–16]. В работе [12] впервые были исследованы высокопроизводительные керамические режущие инструменты сложной формы из ZTA, оснащенные стружколомом. Исследуемые образцы были изготовлены методом 3D-печати на основе фотополимеризации в ванне в сочетании с процессом горячего изостатического спекания. Были получены режущие инструменты с относительной плотностью 99,34 %, твердостью по Виккерсу 17,98 ± 0,20 ГПа, прочностью на изгиб 779 ± 47 МПа и вязкостью разрушения 5,41 ± 0,29 МПа $м^{1/2}$. Было исследовано влияние трех параметров резания, а именно скорости резания, подачи и глубины резания, на характеристики режущих инструментов, а также были изучены механизмы износа режущих инструментов. Опубликованное в [13] исследование демонстрирует потенциал режущих инструментов из композитов ZTA с in situ сформированным $SrAl_{12}O_{19}$ в качестве решения для деревообрабатывающей промышленности, предлагая альтернативу обычным инструментам из однокарбидных твердых сплавов (группа WC+Co). В работе [14] изучены режущие характеристики и механизмы отказа керамических режущих пластин ZTA-MgO (ZTA/MgO/MWCNT), армированных многослойными углеродными нанотрубками (MWCNT), во время непрерывной сухой токарной обработки закаленной стали AISI-4340 (≈40 HRC) на высоких скоростях резания. Инструменты ZTA/MgO/MWCNT продемонстрировали повышенную производительность по сравнению с инструментами ZTA/MgO, особенно в диапазоне скоростей резания 200…300 м/мин. Повышенные микротвердость, нанотвердость и вязкость разрушения инструментов ZTA/MgO/MWCNT способствовали значительному улучшению производительности резания, особенно при высоких скоростях резания, низких скоростях подачи и минимальной глубине резания. В [15] была разработана новая самосмазывающаяся керамическая режущая пластина путем включения 10 масс. % молибдена (Mo) в композит ZTA посредством спекания без давления. Температуры, возникающие во время высокоскоростной токарной обработки стали AISI 4340, привели к образованию тонких смазочных трибопленок оксидов Mo (MoO_2 и MoO_3) в зоне контакта. Самосмазывающиеся свойства разработанной пластины успешно противостоят истиранию и обеспечивают рост срока службы инструмента на 11 % по сравнению с распространенными режущими инструментами. Сингх и др. [16] изучали обработку стали AISI 4340 с использованием горячепрессованных пластин ZTA и ZTA-CuO при оптимизированных условиях резания: скорость резания = 300 м/мин, скорость подачи 0,16 мм/об и глубина резания 0,5 мм.

Благодаря повышенной вязкости разрушения армированная CuO режущая пластина ZTA достигла более длительного срока службы инструмента (20 мин) в сочетании с 20%-м снижением износа по задней поверхности в конце обработки по сравнению с монолитной пластиной.

Во время сухой обработки резанием максимальная температура может превышать 1000 °C [16]. Большинство быстрорежущих сталей и режущих инструментов из твердого сплава не работают в таких условиях из-за чрезмерного износа, что приводит к низкому сроку службы инструмента [16]. Вместе с тем сухая обработка является перспективным подходом к экономичной, эффективной и безопасной обработке. Эффективное внедрение сухой обработки требует исследования и оценки механизма процесса резания, конструкции и материала режущего инструмента, а также оборудования, связанного с процессом обработки [2, 15, 17, 18]. Инновации в области самосмазывающихся режущих пластин позиционируют сухую обработку как привлекательную технологию производства с минимальным воздействием на окружающую среду, учитывая при этом гамму положительных экологических последствий [15]. Керамические инструменты из ZTA-керамики при сухой обработке резанием продемонстрировали исключительную высокотемпературную стабильность, вязкость разрушения, химическую стабильность и усталостную ударную прочность, а также повышенную скорость съема материала при высоких температурах [19].

При анализе опубликованных статей обращает на себя внимание отсутствие информации о режущих свойствах керамических композитов Y-TZP/Al_2O_3, содержащих от 5 до 40 масс. % $A1_2O_3$. Вместе с тем известно, что по сравнению с Y-TZP такие композитные материалы имеют более высокую прочность на изгиб при комнатной температуре (до 1400 МПа), а также сохраняют повышенную прочность при высокой температуре [4]. Присутствие второй фазы в виде Al_2O_3 в композитах Y-TZP/Al_2O_3 отвечает за дополнительный механизм упрочнения, связанный с термическими остаточными напряжениями, которые возникают из-за разницы коэффициента термического расширения между двумя фазами [20–22]. Дисперсные включения $A1_2O_3$ в матрице Y-TZP приводят к повышению твердости, модуля упругости и улучшенным высокотемпературным механическим свойствам, включая высокое значение вязкости разрушения [4]. Эти композиты являются перспективными материалами для лезвийной обработки в экстремальных условиях [23–25].

Цель настоящей работы: изучение поведения сменных режущих пластин из керамики Y-TZP-$A1_2O_3$ в условиях сухого высокоскоростного (200 м/мин) резания стали 40Х (HRC 43–48). Для достижения указанной цели решались следующие ***задачи*:**

- проверка гипотезы о возможности использования керамики Y-TZP-Al_2O_3 в качестве инструментального материала для обработки резанием термически упрочнённой низколегированной стали марки 40Х;
- изготовление и исследование образцов в виде круглых керамических режущих пластин методами порошковой металлургии из коммерческого порошка марки TZ-3Y20AB;
- проведение испытаний на работоспособность в широком диапазоне режимов резания (скорость, подача) в условиях сухого высокоскоростного продольного точения без ударов;
- установление технологических ограничений по режимам резания при использовании керамических режущих пластин, а также изучение особенностей разрушения и износа контактных площадок.

Обозначения

HV, HRC – твердость по шкале Виккерса и Роквелла соответственно;

ρ – плотность, г/см^3;

$d_{зерен}$ – диаметр зёрен, мкм;

$\sigma_и$ – прочность при изгибе, МПа;

K_{1c} – трещиностойкость, МПа·м$^{1/2}$;

V – скорость резания, м/мин;

S – подача, мм/об;

t – глубина резания, мм;

L – путь резания, мм.

Методика исследований

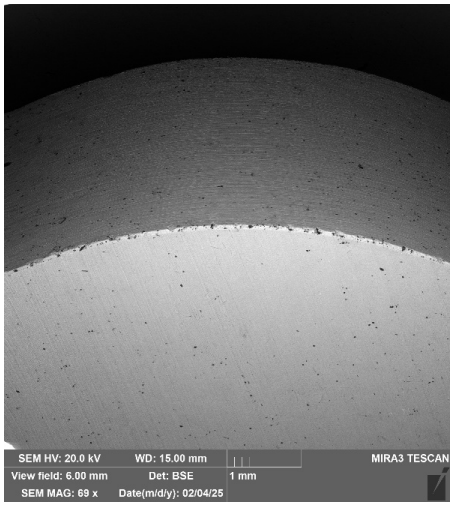
Заготовку из стали марки 40Х для проведения испытаний изготавливали из прутка круглого сечения диаметром 130 мм. Стальная заготовка имела общую длину 350 мм. Термическую

обработку (объемную закалку) выполняли на конвенциональных режимах, учитывая при этом длительное время выдержки с целью равномерного нагрева всей заготовки по сечению от периферии к будущей оси вращения. Термически обработанная сталь 40Х была принята в связи с поставленной производственной задачей по интенсификации обработки шеек корпусов режущих инструментов в условиях ООО «ПК МИОН» (г. Томск). Из литературы также известно, что керамики на основе оксидных соединений широко применяются при резании термически упрочнённых и износостойких сплавов на основе железа [8, 9, 14, 26].

В качестве сырья для изготовления заготовок опытных образцов керамических пластин был использован коммерческий порошок, имеющий обозначение TZ-3Y20AB, произведённый фирмой Tosoh (Япония). Технологический процесс получения заготовок-полуфабрикатов в виде цилиндрических стержней длиной 120 мм включал в себя следующие технологические операции: холодное изостатическое прессование порошка в силиконовой форме при давлении 200…300 МПа; предварительное спекание (утильный отжиг) в воздушной среде; черновая токарная обработка с допуском по наружному диаметру h9; окончательное спекание в вакуумной высокотемпературной печи; круглое шлифование в окончательный размер с допуском по диаметру h6; алмазная резка прутка на заготовки с припуском на толщину; плоское шлифование в окончательный размер по толщине.

Конструктивно режущая пластина имела круглую форму и буквенно-цифровое обозначение RNGN 120400-01 согласно ГОСТ 25003–81 «Пластины режущие сменные многогранные керамические. Технические условия», что соответствует толщине 4,76 мм и диаметру 12,70 мм без дополнительных фасок и уступов на передней поверхности. Всего было изготовлено пять пластин, которые предварительно шлифовали с каждого торца на плоскошлифовальном станке модели 3Д711АФ11 с использованием алмазного круга 1А1 250×20×5×76 АС4 125/100 100 % В2-01, специальной многоместной оснастки и обильной подачи смазочно-охлаждающей жидкости на водной основе. Визуальный контроль на наличие поверхностных трещин выполняли посредством лупы с увеличением ×20, а выборочный контроль проводили в процессе оценки исходного состояния пластин с помощью растрового электронного микроскопа на увеличениях ×500 и более (рис. 1).

а



б

Рис. 1. Внешний вид керамических пластин (*а*) и электронная микроскопия режущей кромки (*б*) в исходном состоянии

Fig. 1. Ceramic inserts (*а*) and electron microscopy of the cutting edge (*б*) in the initial state

Крепление керамических пластин осуществляли в державке CRDNN 2525M 12-ID фирмы Sandvik Coromant (Швейцария) с использованием твёрдосплавной подкладной пластины путём прижима сверху (рис. 2).

Изучение исходных керамических порошков и спечённых из них изделий проводили на аттестованном оборудовании. Элементный состав определяли на рентгенофлуоресцентном волнодисперсионном спектрометре XRF-1800 фирмы Shimadzu (Япония). Внешний вид порошков и их гранулометрический состав изучали на сканирующем электронном микроскопе Mira 3LMU фирмы Tescan (Чехия). Рентгеноструктурный анализ

Рис. 2. Внешний вид оправки с закрепленной керамической пластиной

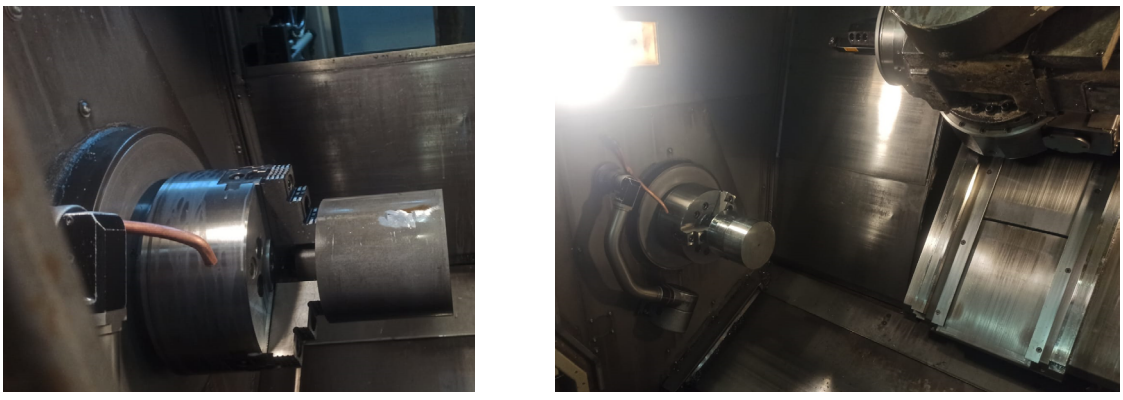
Fig. 2. Mandrel with a ceramic insert attached

проводили на рентгеновском дифрактометре модели ДРОН 8Н фирмы АО «ИЦ «Буревестник» (г. Санкт-Петербург), оснащенном микрополосным рентгеновским детектором Mythen 2R 1D фирмы Dectris (Япония). Съемка рентгенограмм выполнялась на CuKα-излучении (λ = 0,15406 нм) в диапазоне углов 2θ 20…90°. Шаг сканирования детектора составлял 0,1°, время сбора данных – 30 с. Удельную площадь поверхности исходных порошков определяли на приборе модели СОРБИ-М фирмы ООО «МЕТА» (г. Новосибирск) по адсорбции азота четырехточечным методом Брунауэра – Эммета – Тейлора (теория полимолекулярной адсорбции). Насыпную площадь порошков определяли посредством измерения объема порошка известной массы в градуированном сосуде цилиндрической формы.

После спекания образцы-представители шлифовали на алмазном круге и полировали с использованием стандартной металлографической технологии. Плотность образцов после спекания измеряли методом гидростатического взвешивания. Средний размер зерен спеченных образцов вычисляли методом секущих по оптическим фотографиям термически травленой поверхности. Прочность определяли методом трехточечного изгиба шлифованных образцов размером 4±0,1 × 3±0,1 × 40 мм, используя машину для испытания на сжатие (гидравлический пресс) производства ООО «НИКЦИМ Точмашприбор» (г. Армавир, Россия). Оценку микротвердости HV и трещиностойкости K_{1c} проводили на универсальном твердомере Duramin-500 фирмы Stuers A/S (Дания) с автоматическим датчиком силы посредством индентирования полированной поверхности пирамидой Виккерса при нагрузке 98,07 Н. Длину диагоналей отпечатка и протяженность трещин для расчета микротвердости и трещиностойкости оценивали с применением оптического микроскопа.

Испытания керамических пластин при резании проводили на токарном станке MULTUS B300-W фирмы Okuma (Япония) в условиях цеха производства корпусного режущего инструмента ООО «ПК МИОН» (г. Томск, Россия) (рис. 3). Заготовки закрепляли в гидравлическом патроне за соосную с обрабатываемой поверхностью хвостовую часть диаметром 70 мм и длиной 50 мм.

Испытания керамических пластин на работоспособность проводили в два этапа. Все испытания выполняли при продольном точении без



а *б*

Рис. 3. Виды рабочей зоны станка с закрепленной заготовкой (*а*) и установленной оправкой (*б*) с керамической пластиной

Fig. 3. Views of the machine tool working area with a fixed workpiece (*a*) and the mandrel (*б*) with a ceramic insert

удара всухую. При скалывании режущей кромки пластину поворачивали на ≈30° или переворачивали на противоположную сторону.

Режимы резания были взяты из источников [2, 6–8, 12, 14, 15, 26]. За критерий работоспособности инструмента был принят путь резания, при котором наблюдается формирование стружки. Наступление отказа указывало на хрупкое разрушение режущей кромки и прекращение стружкообразования.

На первом этапе испытаний использовали керамические пластины с режущими кромками без дополнительной обработки, т. е. микрогеометрия была сформирована в процессе плоского шлифования. Для установления границ допустимого варьирования режимами при точении были выбраны следующие значения: скорость резания V = 200; 300; 400 м/мин; подача S = 0,05; 0,1; 0,2; 0,4; 1,0 мм/об; глубина резания t = 0,1; 0,2; 0,4 мм.

На втором этапе осуществляли проверку работоспособности на постоянных режимах V = 200 м/мин; S = 0,25 мм/об; t = 0,1 мм. При этом использовали пластину с фаской 0,2×45° мм, сформированной на режущей кромке.

Результаты и их обсуждение

Химический состав стали марки 40Х соответствует ГОСТ 4543–2016 «Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия». В исходном состоянии сталь марки 40Х имеет феррито-перлитную структуру, ее твёрдость составляет HRC 21–26, а после закалки она представляет собой мартенсит с остаточным аустенитом (5–8 %). Измерения твёрдости закаленной стали показали, что по глубине сечения присутствуют колебания в диапазоне HRC 43–48.

Элементный состав исходного керамического порошка приведён в табл. 1.

Измерения показали, что фактический размер частиц керамического порошка находится в диапазоне 0,04…0,09 мкм, а удельная площадь поверхности составляет 15 ± 3 м^2/г.

Результаты измерений физико-механических характеристик, проведенных на образцах-представителях, приведены в табл. 2.

Фазовый состав шлифованной поверхности спеченной керамики Y-TZP-Al_2O_3 представлен на рис. 4. Видно, что основными фазами являются матричная фаза тетрагонального ZrO_2 и упрочняющая фаза α-Al_2O_3. Небольшое количество моноклинного ZrO_2 (≈3 об. %) могло появиться вследствие шлифования поверхности керамических пластин, когда под нагрузкой происходит фазовый переход из метастабильной тетрагональной в стабильную моноклинную фазу.

Таблица 1
Table 1

Химический состав керамического порошка TZ-3Y20AB
Chemical composition of TZ-3Y20AB ceramic powder

Массовая доля химических соединений, % / Mass fraction of chemical compounds, %					
Y_2O_3	Al_2O_3	SiO_2	Fe_2O_3	Na_2O	ZrO_2
3,9 ± 0,3	19 ± 1	< 0,02	< 0,01	< 0,04	Остальное

Таблица 2
Table 2

Физико-механические характеристики спечённой керамики Y-TZP-Al_2O_3
Physical and mechanical properties of sintered Y-TZP-Al_2O_3 ceramic

Плотность ρ, г/см^3 / Density ρ (g/cm^3)	Диаметр зерен $d_{зерен}$, мкм / Grain diameter d_g (μm)	Прочность при изгибе $\sigma_и$, МПа / Bending strength (MPa)	Микротвёрдость HV10, ГПа / Microhardness *HV10* (GPa)	Трещиностойкость K_{1c}, МПа·м$^{1/2}$ Fracture resistance K_{1c} (MPa·m$^{1/2}$)
5,5 ± 0,2	0,4 ± 0,09	1200 ± 160	14 ± 0,6	7,2 ± 0,4

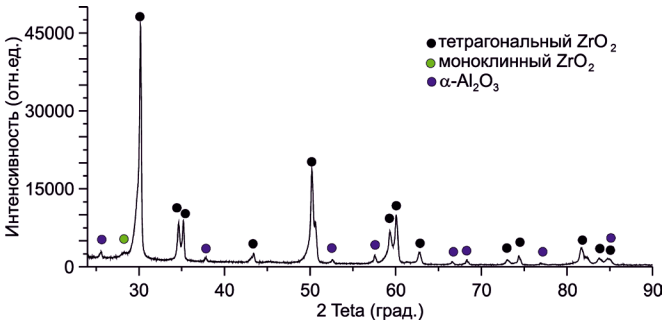


Рис. 4. Рентгенограмма композиционной керамики Y-TZP-Al_2O_3

Fig. 4. X-ray diffraction pattern of *Y-TZP-*Al_2O_3 composite ceramic

Далее представлены и описаны результаты наблюдений за процессом сухого точения керамическими режущими пластинам. Варьирование режимами проводили по данным, указанным в табл. 3.

Отмечено, что вне зависимости от подачи и глубины при скорости резания 200 м/мин образуется витая стружка со следами побежалости с периодическим появлением сгорающей стружки, а в диапазоне скорости от 300 до 400 м/мин стружка состоит из отдельных фрагментов, интенсивное сгорание которых в ходе резания сопровождается снопом искр (рис. 5).

Подробнее рассмотрим особенности износа рабочих поверхностей, формирующих режущие кромки керамических пластин. Характерные снимки износа и разрушения рабочих площадок режущих кромок приведены на рис. 6.

После наступления износа ожидаемой величины, когда визуально регистрируется прекращение стружкообразования из-за сколов, пластина поворачивалась по часовой стрелке, что давало возможность наблюдать разные ста-

Таблица 3

Table 3

Результаты испытаний на этапе 1

Results of tests in stage 1

№ / No.	Скорость резания *V*, м/мин / Cutting speed *V* (m/min)	Подача *S*, мм/об / Feed rate *S* (mm/rev)	Глубина резания *t*, мм / Cutting depth *t* (mm)	Путь резания *L**, мм / Cutting distance *L** (mm)	Примечание / Note
1	200	0,05	0,2	50	Разрушение кромки, сгорание стружки / Edge chipping, chip burning
2	300		0,4	5	
3	400		0,1	10	
4		0,1		5	
5	200	0,4		50	Разрушение кромки, стружка с цветами побежалости / Edge chipping, oxidized chip
6		0,25		60	
7	600			10	Разрушение кромки, сгорание стружки / Edge chipping, chip burning
8	100			50	Разрушение кромки, повышенные вибрации / Edge chipping, increased vibrations
9		0,1			Разрушение кромки, низкая шероховатость / Edge chipping, low surface roughness
10	200	0,4		100	
11**		0,25		600	Разрушение кромки / Edge chipping

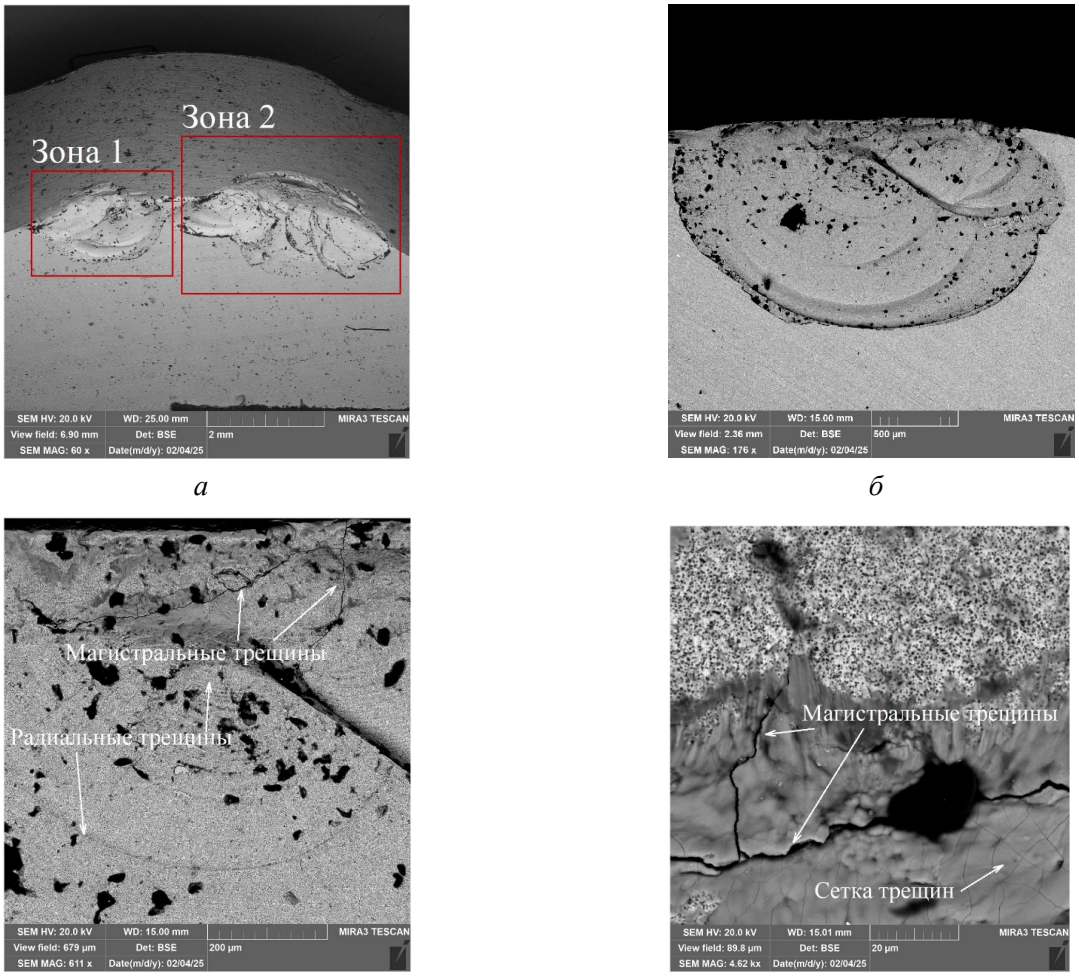
* *L* – путь резания до катастрофического износа (прекращения стружкообразования) / cutting path until catastrophic wear (cessation of chip formation);

** – данные по четырем повторениям / data from 4 repetitions.

а *б*

Рис. 5. Фрагмент резания с образованием витой (*а*) и сгорающей (*б*) стружки при скорости резания 200 и 400 м/мин соответственно

Fig. 5. Cutting process fragment with the formation of spiral (*a*) and burning (*б*) chips at cutting speeds of 200 and 400 m/min, respectively



а *б*

в *г*

Рис. 6. Типичные микрофотографии участков износа и разрушения керамических режущих пластин без обработки режущих кромок:

а – общий вид; *б*, *в* – кратер на передней поверхности; *г* – магистральные трещины

Fig. 6. Typical micrographs of wear and failure areas of ceramic cutting inserts without cutting edge preparation:

a – general view; *б*, *в* – crater on the rake face; *г* – major cracks

дии износа на одной и той же режущей пластине (рис. 6, *а*, зона 1), т. е. правая часть изношенной поверхности (рис. 6, *а*, зона 2) была повернута по часовой стрелке. Износ пластин начинает проявляться в виде лунки длиной до 1,1 мм (рис. 6, *а*, зона 1) на передней поверхности. Она вплотную примыкает к режущей кромке и переходит на главную заднюю поверхность (рис. 6, *а*, зона 1). При этом происходит не столько износ (поэтому говорить о лунке износа некорректно), а хрупкое разрушение (отслоение) радиальной формы по поверхностям, параллельным передней поверхности. Это связано с действием касательных напряжений, наибольшая величина которых располагается немного ниже передней поверхности [26]. Зона отслоения режущего материала проходит далеко за линией длины контакта стружки с режущей пластиной, поэтому следов контакта стружки с передней поверхностью не наблюдается.

Вследствие усталости инструментального материала из-за периодического дёргания и срыва приконтактной поверхности стружки вблизи режущей кромки происходит накопление дефектов, которые перерастают сначала в микро-, а затем и в макротрещину, проходящую параллельно передней поверхности. Эта макротрещина переходит даже на заднюю поверхность, хотя рельеф образовавшегося микрократера говорит о преимущественном развитии трещины в сторону передней поверхности.

На передней поверхности не наблюдается налипания обрабатываемого материала, это говорит о низком коэффициенте трения в указанной области (что характерно для керамических режущих материалов) и отсутствии адгезии за пределами области хрупкого разрушения. Следов абразивного износа тоже не наблюдается, что связано с высокой твёрдостью инструментального материала.

Поверхность микрократера также свободна от частиц обрабатываемого материала, хотя ее рельеф способствует их задержанию (рис. 6, *а*, зона 1). Это свидетельствует о высокой прочности прирезцовой части стружки или по крайней мере о том, что предел прочности на сдвиг там больше, чем контактные касательные напряжения на поверхности «стружка – инструмент». При увеличении микрократера до 1,2 мм (рис. 6, *а*, зона 2) происходят дополнительные отслаивания инструментального материала, т. е. образование нескольких микрократеров радиальной формы. Здесь наблюдаются частицы обрабатываемого материала в застойных зонах, хотя и в очень малых объёмах. На наш взгляд, это связано с увеличением глубины этих зон, что и способствует задержанию материала в виде микрочастиц. При большом увеличении на поверхности микрократера можно видеть небольшие частицы (черное пятно около 0,15 мм) обрабатываемого материала (рис. 6, *б*). Поверхность микрократера хотя и имеет основную радиальную форму, но содержит и дополнительные линии хрупкого отслоения сложной формы. При еще большем увеличении (рис. 6, *в*) на поверхности микрократера вблизи режущей кромки можно видеть глубокие магистральные трещины, проходящие уже перпендикулярно передней поверхности. Характер этих трещин говорит о их термической природе: вблизи режущей кромки пластина нагревается намного быстрее и больше, чем при отдалении от неё, что и приводит к появлению термических микротрещин. При увеличении (рис. 6, *г*) на поверхности микрократера наблюдается черная полость, что говорит о вырыве частицы керамики размером около 20 мкм. Термотрещина, проходящая через эту область, говорит о возможном ослаблении инструментального материала из-за резкого перепада температуры.

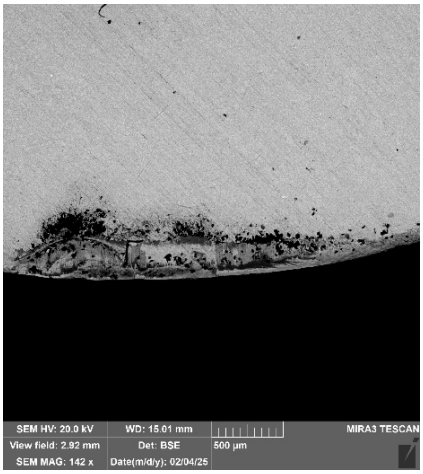
Рассмотрим особенности износа керамических режущих пластин, на которых была принудительно сформирована фаска (табл. 4).

На контактных поверхностях режущей пластины регистрируются участки без следов существенного износа, а незначительные налипы обрабатываемого материала наблюдаются только вблизи режущей кромки (рис. 7, *а*). Следов абразивного износа не наблюдается. В этой связи целесообразным представляется продолжение исследований в части использования режущей керамики Y-TZP-Al_2O_3 для токарной и фрезерной сухой высокоскоростной обработки закаленных и труднообрабатываемых материалов, а также проведение исследований по сравнительным стойкостным испытаниям с изучением шероховатости обрабатываемых поверхностей.

Таблица 4
Table 4

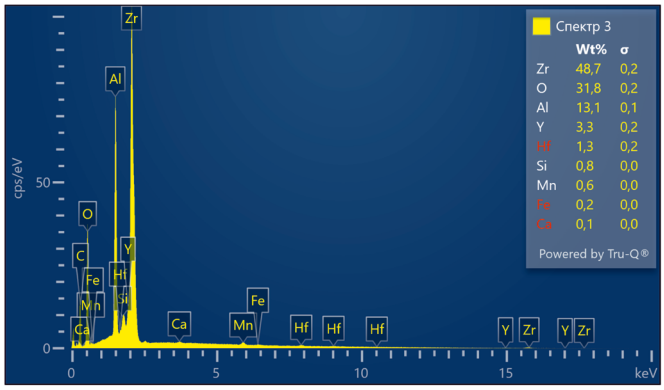
Результаты испытаний на этапе 2
Results of tests in phase 2

№ п/п	Скорость резания V, м/мин / Cutting speed, m/min	Подача S, мм/об / Feed, mm/r	Глубина резания t, мм / Cutting depth, mm	Путь резания L*, мм / Cutting distance, mm	Примечание
1	200	0,25	0,1	3300	Без разрушения кромки, стружка с цветами побежалости

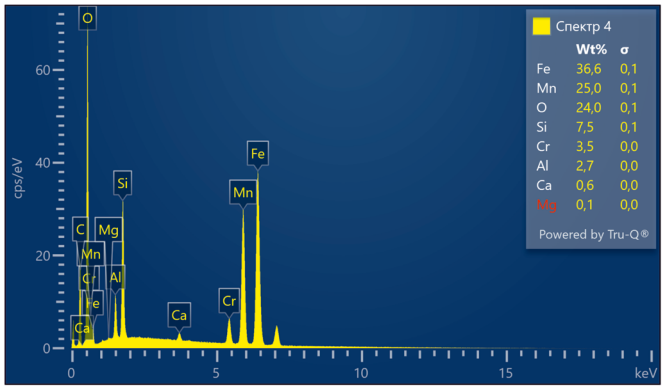


а

б



в



г

Рис. 7. Типичные микрофотографии участков износа и разрушения керамических режущих пластин с фаской на режущих кромках:

а – общий вид; *б* – кратер на передней поверхности; *в, г* – карты распределения химических элементов

Fig. 7. Typical micrographs of wear and failure areas of ceramic cutting inserts with a chamfered cutting edge:

а – general view; *б* – crater on the rake face; *в*, *г* – elemental mapping

Выводы

1. Испытания на работоспособность показали перспективность использования керамического порошка марки TZ-3Y20AB (Y-TZP-Al_2O_3), полученного по технологии холодного изостатического прессования с последующим высокотемпературным свободным спеканием, для изготовления режущих пластин RNGN 120400-01

для токарной обработки закаленной стали 40Х (HRC 43–48).

2. Использование режимов $V > 200$ м/мин; $S > 0{,}4$ мм/об; $t > 0{,}2$ мм является нецелесообразным ввиду кратковременной работы кромки режущей пластины. Режимы $V = 200$ м/мин; $S = 0{,}25$ мм/об; $t = 0{,}1$ мм и пластины с притупленной кромкой обеспечивают стабильное точение на пути резания не менее 3300 мм.

3. Электронная микроскопия износа и участков разрушения демонстрирует доминирующий механизм хрупкого усталостного разрушения, вызванного термоциклическим влиянием трения и касательных напряжений в области резания.

4. Керамическая композиция Y-TZP-Al_2O_3 является пригодной для использования в качестве инструментального материала, предназначенного для сухого высокоскоростного точения термически обработанных сталей повышенной твёрдости. Однако необходимо провести комплексные исследования, формализующие влияние режимов обработки на стойкость и шероховатость обработанных поверхностей при резании твёрдых сталей и износостойких чугунов.

Список литературы

1. *Basu B.* Toughening of yttria-stabilised tetragonal zirconia ceramics // International Materials Reviews. – 2005. – Vol. 50 (4). – P. 239–256. – DOI: 10.1179/174328005X41113.

2. *Patel H., Patil H.* Tribological performance based machinability investigations of Al_2O_3-ZrO_2 ceramic cutting tool in dry machining of Ti-6Al-4V alloy // Tribology International. – 2022. – Vol. 176. – P. 107776. – DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107776.

3. *Perry C., Liu D., Ingel R.P.* Phase characterization of partially stabilized zirconia by Raman spectroscopy // Journal of the American Ceramic Society. – 1985. – Vol. 68 (8). – P. C-184–C-187. – DOI: 10.1111/j.1151-2916.1985.tb10176.x.

4. *Nettleship I., Stevens R.* Tetragonal zirconia polycrystal (TZP) – A review // International Journal of High Technology Ceramics. – 1987. – Vol. 3. – P. 1–32. – DOI: 10.1016/0267-3762(87)90060-9.

5. Production and characterization of ZrO_2 ceramics and composites to be used for hip prosthesis / M. Arin, G. Goller, J. Vleugels, K. Vanmeensel // Journal of Materials Science. – 2008. – Vol. 43 (5). – P. 1599–1611. – DOI: 10.1007/s10853-007-2343-x.

6. Comparison of different 3Y-TZP substrates for the manufacture of all-ceramic micro end mills with respect to the cutting edge radius and the tool wear / T. Mayer, S. Kieren-Ehses, B. Kirsch, J.C. Aurich // Manufacturing Letters. – 2023. – Vol. 38. – P. 44–46. – DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.09.001.

7. Новая режущая керамика в системе Al_2O_3–$ZrO_2(Y_2O_3)$–Ti(C,N) / Я.Г. Дятлова, Н.Ю. Ковеленов, В.И. Румянцев, С.С. Орданьян // Металообработка. – 2014. – № 1 (79). – С. 32–36.

8. *Senthil Kumar A., Raja Durai A., Sornakumar T.* Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2003. – Vol. 21 (3–4). – P. 109–117. – DOI: 10.1016/S0263-4368(03)00004-0.

9. A review on synthesis of zirconia toughened alumina (ZTA) for cutting tool applications / M.M. Basha, S.M. Basha, B.K. Singh, N. Mandal, M.R. Sankar // Materials Today: Proceedings. – 2020. – Vol. 26, pt. 2. – P. 534–541. – DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.134.

10. *Smuk B., Szutkowska M., Walter J.* Alumina ceramics with partially stabilized zirconia for cutting tools // Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 133. – P. 195–198. – DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00232-7.

11. Sustainability assessment of dry turning Ti-6Al-4V employing uncoated cemented carbide tools as clean manufacturing process / X. Liang, Z. Liu, W. Liu, X. Li // Journal of Cleaner Production. – 2019. – Vol. 214. – P. 279–289. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.196.

12. Cutting performance and wear mechanism of zirconia toughened alumina ceramic cutting tools formed by vat photopolymerization-based 3D printing / W. Liu, H. Wu, Y. Xu, L. Lin, Y. Li, S. Wu // Ceramics International. – 2023. – Vol. 49 (14), pt. A. – P. 23238–23247. – DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.04.153.

13. Optimizing woodcutting with zirconia-toughened alumina: processing, performance, and industrial insights / T. Thakur, S. Heinen, B. Ehrle, G. Blugan // Heliyon. – 2025. – Vol. 11 (2). – P. e41785. – DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e41785.

14. Cutting performance, failure mechanisms and tribological properties of MWCNT-reinforced ZTA-MgO ceramic inserts in high-speed machining of hardened AISI-4340 steel / P.K. Prajapati, C.O. Bapanapalle, P. Biswas, K. Kumar Sadhu, R. Ranjan Sahoo, N. Mandal // Diamond & Related Materials. – 2024. – Vol. 153. – P. 112094. – DOI: 10.1016/j.diamond.2025.112094.

15. Pressure-less sintering of molybdenum-reinforced ceramic cutting inserts with improved tool life / K. Ghosh, S. Goswami, P. Kumar Prajapati, P. Roy, N. Mandal // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2024. – Vol. 120. – P. 106619. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106619.

16. Performance evaluation of self lubricating CuO added ZTA ceramic inserts in dry turning application / B.K. Singh, S. Goswami, K. Ghosh, H. Roy, N. Man-

dal // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 98. – P. 105551. – DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105551.

17. *Wang B., Liu Z.* Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2018. – Vol. 98 (5–8). – P. 1925–1975. – DOI: 10.1007/s00170-018-2314-1.

18. *Wang Z.G., Wong Y.S., Rahman M.* High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2005. – Vol. 45. – P. 105–114. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.021.

19. Effects of cutting parameters on dry machining Ti-6Al-4V alloy with ultra-hard tools / F.J. Sun, S.G. Qu, Y.X. Pan, X.Q. Li, F.L. Li // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – Vol. 79 (1–4). – P. 351–360. – DOI: 10.1007/s00170-014-6717-3.

20. Flash sintering incubation in Al_2O_3/TZP composites / E. Bichaud, J.M. Chaix, C. Carry, M. Kleitz, M.C. Steil // Journal of the European Ceramic Society. – 2015. – Vol. 35 (9). – P. 2587–2592. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.02.033.

21. *Muccillo R., Muccillo E.N.S.* Electric field-assisted flash sintering of tin dioxide // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – Vol. 34 (4). – P. 915–923. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.09.017.

22. Densification behaviour and microstructural development in undoped yttria prepared by flash-sintering / H. Yoshida, Y. Sakka, T. Yamamoto, J.-M. Lebrun, R. Raj // Journal of the European Ceramic Society. – 2014. – Vol. 34 (4). – P. 991–1000. – DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.10.031.

23. *Srdić V.V., Winterer M., Hahn H.* Sintering behavior of nanocrystalline zirconia doped with alumina prepared by chemical vapor synthesis // Journal of the American Ceramic Society. – 2000. – Vol. 83. – P. 1853. – DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01481.x.

24. Colloidal processing and superplastic properties of zirconia-and alumina-based nanocomposites / Y. Sakka, T.S. Suzuki, K. Morita, K. Nakano, K. Hiraga // Scripta Materialia. – 2001. – Vol. 44. – P. 2075. – DOI: 10.1016/S1359-6462(01)00889-2.

25. *Rana R.P., Pratihar S.K., Bhattacharyya S.* Powder processing and densification behaviour of alumina–high zirconia nanocomposites using chloride precursor // Journal of Materials Processing Technology. – 2007. – Vol. 190 (1–3). – P. 350–357. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.009.

26. Research of contact stresses distribution on plunge-cutting into a steel workpiece / V. Kozlov, J.Y. Zhang, Y.B. Guo, S.K. Sabavath // Key Engineering Materials. – 2018. – Vol. 769. – P. 284–289. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.284.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2025 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0).

Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science. 2025 vol. 27 no. 2 pp. 159–173
ISSN: 1994-6309 (print) / 2541-819X (online)
DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-159-173

NSTU NETI

Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Performance of Y-TZP-Al_2O_3 composite ceramics in dry high-speed turning of thermally hardened steel 0.4 C-Cr (AISI 5135)

Artem Babaev [1, a, *], ***Nickolai Savchenko*** [2, b], ***Victor Kozlov*** [3, c], ***Artem Semenov*** [1, d], ***Mikhail Grigoriev*** [1, e]

[1] National Research Tomsk State University, 36 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation
[2] Institute of Strength Physics and Materials Science of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russian Federation
[3] National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] https://orcid.org/0000-0003-2334-1679, temkams@mail.ru; [b] https://orcid.org/0000-0001-8254-5853, savnick@ispms.ru;
[c] https://orcid.org/0000-0001-9351-5713, kozlov-viktor@bk.ru; [d] https://orcid.org/0000-0002-8663-4877, artems2102@yandex.ru;
[e] https://orcid.org/0009-0009-4214-0312, mvgrigoriev@yandex.ru

ARTICLE INFO

Article history:
Received: 21 March 2025
Revised: 10 April 2025
Accepted: 21 April 2025
Available online: 15 June 2025

Keywords:
Oxide ceramics
Turning
Hardened steel
Wear

Funding
The work was carried out within the framework of the state assignment № FSWM-2025-0010 "Physico-chemical regularities of formation of the structural-phase state and physical and mechanical properties of composite ceramic materials resistant to intensive thermomechanical effects and wear".

ABSTRACT

Introduction. Analysis of contemporary data in the fields of materials science and the application of ceramic cutting tools for machining difficult-to-machine iron- and nickel-based alloys reveals a limited amount of experimental data concerning the use of the promising *Y-TZP-Al_2O_3* ceramic, which is based on submicron yttria-partially-stabilized zirconia and reinforced with alumina. **Purpose of the work.** To study the performance of *RNGN 120400-01* removable cutting inserts made from *Y-TZP-$A1_2O_3$* ceramic during dry high-speed (200 m/min) cutting of *0.4 C-Cr* (*AISI 5135*) steel (*HRC* 43…48). **Research Methods.** Characterization of the initial powders and the sintered ceramic, both before and after cutting tests, was performed using X-ray fluorescence (*XRF*) and X-ray diffraction (*XRD*) analyses, as well as scanning electron microscopy (*SEM*) in *BSE* mode. The physical and mechanical properties of the sintered ceramic were determined using the hydrostatic weighing method, three-point bending, and *Vickers* microhardness and fracture toughness measurements. Cutting tests were conducted on a high-rigidity lathe in a production shop conditions, involving dry high-speed turning of hardened *0.4C-Cr* steel (*AISI 5153*) (HRC 43…48) in two stages. The first stage involved establishing the allowable variation limits for cutting modes (cutting speed and feed rate) and investigating the wear and failure characteristics of the cutting insert rake and flank faces. The second stage utilized ceramic cutting inserts with a chamfered cutting edge. **Results and discussion.** It was established that for *Y-TZP-$A1_2O_3$* ceramic, the use of cutting modes $V > 200$ m/min, $S > 0.4$ mm/rev, and $t > 0.2$ mm is not advisable due to the short service life of the cutting edge. A chamfer on the cutting edge is necessary to provide controlled edge blunting. The observed wear patterns and analysis of failure areas indicate a dominant brittle fatigue failure mechanism, caused by the thermal effects of high-speed friction combined with tangential stresses from the chip flow. It is concluded that the *Y-TZP-Al_2O_3* ceramic composite is promising for use as a cutting tool material for dry high-speed turning of both hardened steels and, potentially, wear-resistant cast irons. Based on the conducted research and described observations, recommendations are formulated for the use of *Y-TZP-Al_2O_3* ceramic in future studies.

For citation: Babaev A.S., Savchenko N.L., Kozlov V.N., Semenov A.R., Grigoriev M.V. Performance of Y-TZP-Al_2O_3 composite ceramics in dry high-speed turning of thermally hardened steel 0.4 C-Cr (AISI 5135). *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2025, vol. 27, no. 2, pp. 159–173. DOI: 10.17212/1994-6309-2025-27.2-159-173. (In Russian).

References

1. Basu B. Toughening of yttria-stabilised tetragonal zirconia ceramics. *International Materials Reviews*, 2005, vol. 50 (4), pp. 239–256. DOI: 10.1179/174328005X41113.

*** Corresponding author**
Babaev Artem S., Ph.D. (Engineering)
National Research Tomsk State University,
36 Lenin Avenue, Tomsk,
634050, Russian Federation
Tel.: +7 952 805-09-26, **e-mail**: temkams@mail.ru

2. Patel H., Patil H. Tribological performance based machinability investigations of Al_2O_3-ZrO_2 ceramic cutting tool in dry machining of Ti-6Al-4V alloy. *Tribology International*, 2022, vol. 176, p. 107776. DOI: 10.1016/j.triboint.2022.107776.

3. Perry C., Liu D., Ingel R.P. Phase characterization of partially stabilized zirconia by Raman spectroscopy. *Journal of the American Ceramic Society*, 1985, vol. 68 (8), pp. C-184–C-187. DOI: 10.1111/j.1151-2916.1985.tb10176.x.

4. Nettleship I., Stevens R. Tetragonal zirconia polycrystal (TZP) – A review. *International Journal of High Technology Ceramics*, 1987, vol. 3, pp. 1–32. DOI: 10.1016/0267-3762(87)90060-9.

5. Arin M., Goller G., Vleugels J., Vanmeensel K. Production and characterization of ZrO_2 ceramics and composites to be used for hip prosthesis. *Journal of Materials Science*, 2008, vol. 43 (5), pp. 1599–1611. DOI: 10.1007/s10853-007-2343-x.

6. Mayer T., Kieren-Ehses S., Kirsch B., Aurich J.C. Comparison of different 3Y-TZP substrates for the manufacture of all-ceramic micro end mills with respect to the cutting edge radius and the tool wear. *Manufacturing Letters*, 2023, vol. 38, pp. 44–46. DOI: 10.1016/j.mfglet.2023.09.001.

7. Dyatlova Ya.G., Kovelenov N.Yu., Rumyantsev V.I., Ordanyan S.S. Novaya rezhushchaya keramika v sisteme Al_2O_3–$ZrO_2(Y_2O_3)$–Ti(C,N) [New cut-ting Al_2O_3/ZrO_2/TI(C,N) ceramics]. *Metaloobrabotka = Metalworking*, 2014, no. 1 (79), pp. 32–36.

8. Senthil Kumar A., Raja Durai A., Sornakumar T. Machinability of hardened steel using alumina based ceramic cutting tools. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2003, vol. 21 (3–4), pp. 109–117. DOI: 10.1016/S0263-4368(03)00004-0.

9. Basha M.M., Basha S.M., Singh B.K., Mandal N., Sankar M.R. A review on synthesis of zirconia toughened alumina (ZTA) for cutting tool applications. *Materials Today: Proceedings*, 2020, vol. 26, pt. 2, pp. 534–541. DOI: 10.1016/j.matpr.2019.12.134.

10. Smuk B., Szutkowska M., Walter J. Alumina ceramics with partially stabilized zirconia for cutting tools. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, vol. 133, pp. 195–198. DOI: 10.1016/S0924-0136(02)00232-7.

11. Liang X., Liu Z., Liu W., Li X. Sustainability assessment of dry turning Ti-6Al-4V employing uncoated cemented carbide tools as clean manufacturing process. *Journal of Cleaner Production*, 2019, vol. 214, pp. 279–289. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.12.196.

12. Liu W., Wu H., Xu Y., Lin L., Li Y., Wu S. Cutting performance and wear mechanism of zirconia toughened alumina ceramic cutting tools formed by vat photopolymerization-based 3D printing. *Ceramics International*, 2023, vol. 49 (14), pt. A, pp. 23238–23247. DOI: 10.1016/j.ceramint.2023.04.153.

13. Thakur T., Heinen S., Ehrle B., Blugan G. Optimizing woodcutting with zirconia-toughened alumina: processing, performance, and industrial insights. *Heliyon*, 2025, vol. 11 (2), p. e41785. DOI: 10.1016/j.heliyon.2025.e41785.

14. Prajapati P.K., Bapanapalle C.O., Biswas P., Kumar Sadhu K., Ranjan Sahoo R., Mandal N. Cutting performance, failure mechanisms and tribological properties of MWCNT-reinforced ZTA-MgO ceramic inserts in high-speed machining of hardened AISI-4340 steel. *Diamond & Related Materials*, 2024, vol. 153, p. 112094. DOI: 10.1016/j.diamond.2025.112094.

15. Ghosh K., Goswami S., Kumar Prajapati P., Roy P., Mandal N. Pressure-less sintering of molybdenum-reinforced ceramic cutting inserts with improved tool life. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2024, vol. 120, p. 106619. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2024.106619.

16. Singh B.K., Goswami S., Ghosh K., Roy H., Mandal N. Performance evaluation of self lubricating CuO added ZTA ceramic inserts in dry turning application. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2021, vol. 98, p. 105551. DOI: 10.1016/j.ijrmhm.2021.105551.

17. Wang B., Liu Z. Influences of tool structure, tool material and tool wear on machined surface integrity during turning and milling of titanium and nickel alloys: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2018, vol. 98 (5–8), pp. 1925–1975. DOI: 10.1007/s00170-018-2314-1.

18. Wang Z.G., Wong Y.S., Rahman M. High-speed milling of titanium alloys using binderless CBN tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005, vol. 45, pp. 105–114. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2004.06.021.

19. Sun F.J., Qu S.G., Pan Y.X., Li X.Q., Li F.L. Effects of cutting parameters on dry machining Ti-6Al-4V alloy with ultra-hard tools. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, vol. 79 (1–4), pp. 351–360. DOI: 10.1007/s00170-014-6717-3.

20. Bichaud E., Chaix J.M., Carry C., Kleitz M., Steil M.C. Flash sintering incubation in Al_2O_3/TZP composites. *Journal of the European Ceramic Society*, 2015, vol. 35 (9), pp. 2587–2592. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2015.02.033.

21. Muccillo R., Muccillo E.N.S. Electric field-assisted flash sintering of tin dioxide. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34 (4), pp. 915–923. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.09.017.

22. Yoshida H., Sakka Y., Yamamoto T., Lebrun J-M., Raj R. Densification behaviour and microstructural development in undoped yttria prepared by flash-sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 2014, vol. 34 (4), pp. 991–1000. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2013.10.031.

23. Srdić V.V., Winterer M., Hahn H. Sintering behavior of nanocrystalline zirconia doped with alumina prepared by chemical vapor synthesis. *Journal of the American Ceramic Society*, 2000, vol. 83, p. 1853. DOI: 10.1111/j.1151-2916.2000.tb01481.x.

24. Sakka Y., Suzuki T.S., Morita K., Nakano K., Hiraga K. Colloidal processing and superplastic properties of zirconia-and alumina-based nanocomposites. *Scripta Materialia*, 2001, vol. 44, p. 2075. DOI: 10.1016/S1359-6462(01)00889-2.

25. Rana R.P., Pratihar S.K., Bhattacharyya S. Powder processing and densification behaviour of alumina–high zirconia nanocomposites using chloride precursor. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, vol. 190 (1–3), pp. 350–357. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.02.009.

26. Kozlov V., Zhang J.Y., Guo Y.B., Sabavath S.K. Research of contact stresses distribution on plunge-cutting into a steel workpiece. *Key Engineering Materials*, 2018, vol. 769, pp. 284–289. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.769.284.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2025 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0).