

---

## ТОЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИОННОЙ НИТРИДНОЙ КЕРАМИКИ

**В.В. Копылов, Валид Махмуд Шевах**

Кафедра технологии машиностроения,  
металлорежущих станков и инструментов  
Инженерный факультет  
Российский университет дружбы народов  
*Подольское шоссе, 8/5, Москва, Россия, 113093*

Техническая керамика представляет собой широкий класс неметаллических материалов с жесткими межатомными связями, что обуславливает их уникальные высокотемпературные свойства. Детали, изготовленные из нитрида и карбида кремния, находят применение в первую очередь в конструкциях тепловых двигателей и устройствах для работы в агрессивных средах.

**Ключевые слова:** конструкционная керамика, нитрид кремния, карбид кремния, точение, спекание.

Техническая керамика представляет собой широкий класс неметаллических материалов с жесткими межатомными связями, что обуславливает их уникальные высокотемпературные свойства. Использование высокочистого тонкодисперсного сырья привело к созданию конструкционных керамических материалов, прочностные характеристики которых позволяют применять их в производстве деталей машин [2].

По совокупности механических и технологических свойств керамические детали, как правило, уступают традиционным металлическим материалам. Однако важные преимущества керамики, такие как стойкость к окислению и коррозии, малый удельный вес, низкий коэффициент температурного расширения, высокие прочность, износостойкость и вязкость, проявляются в области рабочих температур (800—1000 °С), недостижимых для большинства металлов.

Среди наиболее перспективных керамических материалов следует отметить нитрид и карбид кремния, которые имеют близкую природу и проявляют близкие механические и технологические свойства. От других керамических материалов их отличает способность сохранять прочность, противостоять окислению (до 1200—1800 °С) и термоудару (до 800 °С). Детали, изготовленные из нитрида и карбида кремния, находят применение в первую очередь в конструкциях тепловых двигателей и устройствах для работы в агрессивных средах.

Уникальность прочностных и стойкостных свойств нитрида и карбида кремния определяет специфику механизма снижения работоспособности деталей, изготовленных из данных материалов, состоящего в постепенном развитии микротрещин под воздействием различного рода напряжений, имеющих место в процессе их изготовления и эксплуатации. Низкая технологичность конструкционной керамики проявляется в плохой спекаемости, повышенной трудности обработки заготовок, а также исключает возможность применения традиционных методов обеспечения точности и неразрушающего контроля при изготовлении деталей. Указанные особенности обусловили необходимость создания специальной технологии изготовления деталей из нитрида и карбида кремния, поскольку недостаточная проработка данной проблемы является основной причиной низкой надежности керамических деталей [1].

В кристаллической структуре безокисной керамики преобладает механизм ковалентной химической связи частиц над ионной связью. Следствием такого преобладания является повышенная жесткость связи между атомами кристаллической решетки, лежащая в основе высокотемпературной прочности и стойкости безокисной керамики.

Характеристика зависимости предела прочности наиболее перспективных керамических материалов (окиси циркония, нитрида и карбида кремния) от температуры показывает, что безокисные материалы на основе нитрида и карбида кремния обладают жаропрочностью при температуре 1000—1800 °С, в то время как прочность окисной керамики резко снижается уже при температуре 800—1000 °С.

Негативным последствием наличия жесткой межатомной связи в микроструктуре безокисной керамики является низкая технологичность материалов, получаемых на основе нитрида и карбида кремния [3].

Для консолидации зерен нитрида или карбида кремния при спекании требуется дополнительная энергия. Более того, вследствие близкого к единице соотношения граничной энергии зерен и их поверхностной энергии чистое спекание этих материалов неосуществимо, а для консолидации зерен используется ряд дополнительных источников энергии, способствующих связыванию поверхностной энергии при спекании.

Высокая твердость нитрида и карбида кремния (14—32 ГПа, по Виккерсу) в сочетании с повышенной прочностью и вязкостью делают материалы, получаемые на их основе, крайне труднообрабатываемыми (причем установлено, что обрабатываемость нитрида кремния наихудшая). Кроме того, практически исключена возможность выполнения лезвийной обработки, а также возникает проблема обеспечения высокой точности обработки, поскольку при ускоренном износе инструмента существенным фактором становится неравномерность его износа, в разной степени характерная для любых, но в особенности для криволинейных обрабатываемых поверхностей.

Вследствие повышенного значения граничной энергии зерен затруднена пластическая деформация нитрида и карбида кремния, а увеличение поверхности зерен, напротив, облегчено. Поэтому релаксация напряжений в керамической детали происходит за счет роста микротрещин, что на определенном этапе приводит к разрушению детали.

Микроструктура изготавливаемой керамической детали предопределяется на стадии спекания. Для нитрида и карбида кремния характерна особая зависимость физико-механических свойств от технологии спекания.

В настоящее время при получении деталей из нитрида или карбида кремния используются три метода: реакционное спекание, активированное спекание и горячее прессование, различающиеся по способу подведения дополнительной энергии, обеспечивающей консолидацию зерен спекаемых веществ.

Метод реакционного спекания деталей из нитрида кремния предполагает совмещение процесса спекания с химической реакцией синтеза самого материала. В качестве исходного сырья используется шликер на основе порошка чистого кремния. Наиболее распространенным способом формования деталей является

литье под давлением в металлическую форму. Формовка, получаемая из шликера, далее подвергается выжигу пластифицирующих веществ, а затем нитрированию.

Для проведения экспериментов по обработке точением конструкционной нитридной керамики был собран стенд на базе токарного станка, оснащенный научной аппаратурой и разработана методика экспериментов [4]. Эксперименты проводились на токарно-винторезном станке фирмы «Nardini» модели MS175E. В качестве обрабатываемой детали использовалась толстостенная трубка из нитрида кремния, полученная методом реакционного спекания. Форма и размеры определялись имеющимся образцом. Размеры детали: наружный диаметр — 27 мм, внутренний диаметр — 16 мм, длина — 140 мм. После спекания деталь имела коробление (искривление оси и эллипсность в поперечном сечении) порядка нескольких десятых долей миллиметра. Закрепление детали на станке осуществлялось в трехкулачковом самоцентрирующем патроне через разрезную втулку, изготовленную из дуралюмина, которая предохраняла деталь от раскалывания при контакте с закаленными кулачками патрона. Вылет детали из патрона устанавливался минимально необходимым для точения (70 мм).

Обработка производилась резцовыми вставками из сверхтвердого инструментального материала на основе кубического нитрида бора «Эльбор-Р» (композит 01). Резцовые вставки закреплялись винтом в специальной державке, которая устанавливалась в резцедержатель станка (рис. 1). Внешний вид резцовых вставок показан на рис. 2.

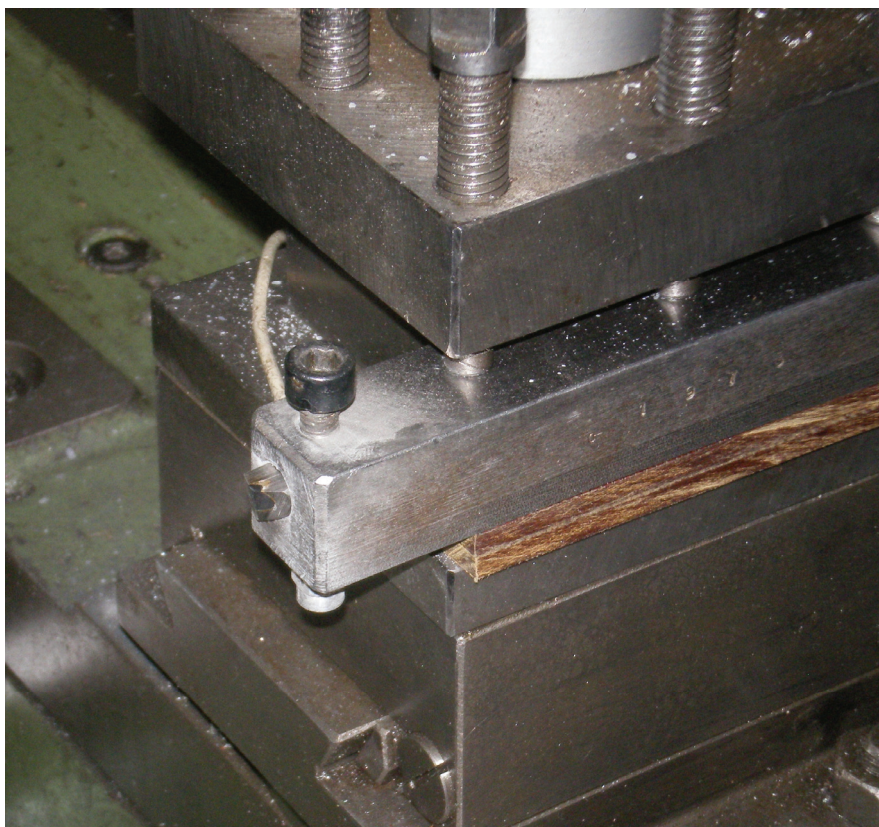


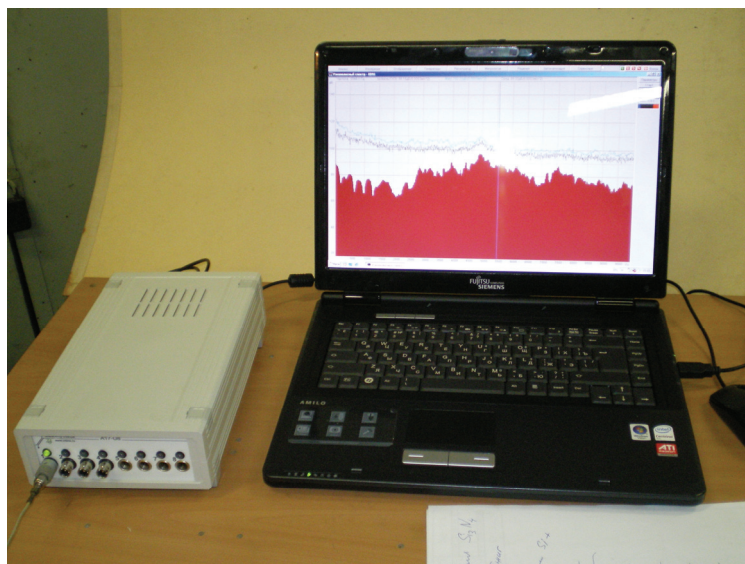
Рис. 1. Державка с резцовыми вставками в резцедержателе станка



**Рис. 2.** Внешний вид резцовых вставок

Режимы резания определялись исходя из рекомендаций по использованию резцовых вставок и возможностей станка. Использовались следующие режимы: глубина резания постоянная  $t = 0,25$  мм, скорость резания определялась исходя из максимального числа оборотов вращения шпинделя станка и диаметра детали  $n = 2000; 1250$  и  $800$  об/мин, соответственно  $V = 170; 106$  и  $68$  м/мин, подача  $S = 0,1; 0,3$  и  $0,5$  мм/об.

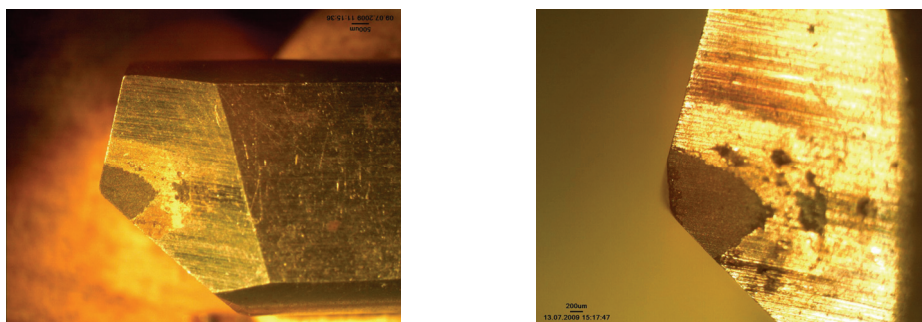
При проведении экспериментов во время точения детали проводился спектральный анализ виброакустического сигнала, возникающего в зоне резания. Для регистрации этого виброакустического сигнала использовался высокочастотный датчик ускорений, который закреплялся на нижней стороне державки под резцовой вставкой (см. рис. 1). Использовался датчик типа KD-91 фирмы RFT с рабочим частотным диапазоном до 20 000 Гц. Вибросигнал с датчика подавался на многоканальный анализатор спектра модели A17-U8, присоединенный по шине USB 2.0 к ноутбуку, на экране которого показывалось текущее, среднее и максимальное среднеквадратическое значение сигнала (рис. 3).



**Рис. 3.** Анализатор спектра модели A17-U8



**Методика экспериментов.** В связи с тем что информация по обработке конструкционной керамики резанием практически отсутствует, эксперименты имели предварительный, ознакомительный характер. Исследовалось влияние скорости резания и подачи при точении нитридной керамики на шероховатость обработанной поверхности. Из-за значительного износа резцовых вставок и наличия только одной детали влияние глубины резания не исследовалось, и она была принята постоянной. Резцовые вставки контролировались с помощью микроскопа, как перед резанием, так и после резания (рис. 4). Обработка одной резцовой вставкой проводилась только на одном режиме, что дало возможность сравнивать вид и величину износа при различных режимах резания.



а  
б  
**Рис. 4.** Резцовые вставки до резания (а) и после точения (б)

Перед опытами деталь предварительно протачивалась для устранения радиального биения и затем производилась обработка на определенных режимах маркированными резцовыми вставками. При проведении точения фиксировался спектр виброакустического сигнала и записывался на жесткий диск компьютера. После обработки на всех режимах деталь снималась со станка, и производилось измерение шероховатости проточенных поверхностей (рис. 5).



**Рис. 5.** Измерение шероховатости обработанной поверхности

Измерение шероховатости осуществлялось с помощью профилометра модели Surfcomer SE 1200 фирмы Kosaka Lab в трех сечениях детали, определялись параметры  $Ra$  и  $Rz$ . Кроме измерения шероховатости проводилось микрофотографирование обработанной поверхности. Методика измерений и параметры приборов описаны в работе [5].

**Выводы.** Проведенные эксперименты в целом подтвердили известные данные о плохой обрабатываемости конструкционной нитридной керамики. Полученные экспериментальные данные показывают следующее:

— шероховатость поверхности детали после точения выше, чем получаемая после спекания. С увеличением подачи от 0,1 до 0,5 мм/об шероховатость  $Ra$  возрастает с 3,20 до 10,47 мкм. При увеличении скорости резания от 68 до 170 м/мин шероховатость  $Ra$  уменьшается от 7,64 до 2,76 мкм;

— износ инструментального материала зависит от сочетания скорости резания и подачи. При этом изменяется характер износа — при высокой скорости резания происходит износ в основном по задней поверхности, а при большой подаче возникают сколы на передней поверхности резцовой вставки;

— спектральный анализ колебаний, возникающих в процессе точения нитридной керамики, показал наличие сплошного спектра во всем частотном диапазоне от 10 до 12 500 Гц примерно одинакового уровня. При увеличении скорости резания или снижении подачи в спектре появляются пики, возможно соответствующие резонансным частотам технологической системы;

— вопрос о целесообразности обработки конструкционной нитридной керамики точением, в том числе и с экономической стороны, требует дальнейшего изучения.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Кибальченко А.В., Ковалев В.А.* Изготовление деталей из конструкционной безокисной керамики. — М.: ВНИИТЭМР, 1990.
- [2] *Рогов В.А., Копылов В.В.* Тенденции развития нанотехнологий // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2008. — № 2. — С. 5—8.
- [3] *Рогов В.А., Шкарупа М.И., Гришин Д.К.* Сравнительный анализ механической обработки сверхтвердых керамических материалов // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2008. — № 2. — С. 15—21.
- [4] *Рогов В.А., Копылов В.В., Соловьев В.В.* Создание лаборатории «Наносистемы в машиностроении» // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2009. — № 2. — С. 124—127.
- [5] *Копылов В.В.* Исследование микро- и наношероховатости после механической обработки // Вестник РУДН. Серия «Инженерные исследования». — 2009. — № 2. — С. 24—32.

## **TURNING CONSTRUCTIONAL NITRIDE CERAMICS**

**V.V. Kopylov, Walid Mahmoud Shewakh**

Department of Mechanical Engineering,  
Machine Tools and Tooling  
Faculty of Engineering  
Peoples' Friendship University of Russia  
*Podolskoe shosse, 8/5, Moscow, Russia, 113093*

Technical Ceramics is a large class of non-metallic materials with hard atomic bonds, which accounts for their unique high-temperature properties. Parts made of silicon nitride and silicon carbide are used, primarily in the construction of thermal engines and devices to operate in hostile environments.

**Key words:** structural ceramics, silicon nitride, silicon carbide, turning, sintering.