**Обеспечение эксплуатационных характеристик поверхностного слоя конструкционной керамики.**

В.В. Гусев

В настоящее время в мире наблюдается тенденция производства изделий из неметаллических и композиционных материалов, которые все шире заменяют металлы во многих отраслях промышленности. Эта тенденция связана со снижением себестоимости продукции при одновременном повышении их срока службы, надежности и экологической чистоты. Особое место среди неметаллических материалов занимает керамика. Работы по керамическим материалам во всем мире резко интенсифицируются, расширяются области применения этих материалов и рост капиталовложений в разработки. Физико-механические свойства керамики по сравнению со всеми видами металлов, которые в настоящее время применяются в качестве главных материалов для изготовления деталей машин, имеют такие отличительные характеристики, как высокую температуру плавления, твердость, легкость износостойкости, коррозийной стойкости, стойкости к воздействию химикатов и т.д.

Принципы проектирования изделий из конструкционной керамики (КК), на первый взгляд, кажутся простыми. Необходимо, чтобы уровень напряжений в процессе эксплуатации был ниже прочности материала при заданном уровне вероятности разрушения. Необходимость использования вероятностного, а не детерминистического подхода вызывают проблемы экстраполяции прочности на заданный низкий уровень вероятности разрушения с учетом напряженного объема. Это достигается при использовании функции статистического распределения Вейбулла. У хрупких материалов, к которым относится КК, прочность сильно зависит от состояния поверхности, особенно от наличия на ней микротрещин. Микротрещины могут быть следствием дефектов формования, обжига, механической обработки.

При использовании КК в деталях с точными размерами без окончательной механической обработки обойтись не возможно. Главным препятствием является высокая твердость и хрупкость КК. Несмотря на применение при финишной механической обработке КК большого числа таких высокоточных методов обработки как ультразвуковая, лазерная и др., наиболее используемым и производительным в настоящее время является алмазное шлифование. Процессы, происходящие при разрушении припуска при алмазном шлифовании, в дальнейшем оказывают влияние на эксплуатационные характеристики изделия. Определяющая роль дефектности на прочностные свойства керамики общепризнанна [1]. Однако до настоящего времени нет объяснения эффекта снижения прочности образца при изгибе вследствие изменения схемы или направления плоского шлифования периферией круга с продольного оси образца на – поперечное (таблица 1.). В работе [2] была сделана попытка объяснить снижение прочности образцов различной ориентацией дефектов в поверхностном слое после алмазного шлифования комбинированно дефектных по сравнению с однородно дефектными ситаллами. Однако при этом ориентация дефектов была принята постоянной для каждого из видов ситаллов.

Были проведены исследования влияния механической обработки на формирование микрорельефа, обработочных дефектов и влияние последних на изгибную прочность конструкционной керамики из Si 3N 4 , Al 2O 3 и ситалла АС-418, на прочность которого оказывает влияние механическая обработка[2]. Исследования проводились с кругами 1А1 200х20х32 АС6 – 4 – М2-01 зернистостью 315/250 и 125/100. В качестве СОЖ использовался 3%-ный раствор кальцинированной соды. Круг правился электроэрозионным методом.

Качество поверхностного слоя после механической обработки оценивалось высотой микрорельефа и структурой дефектного слоя. Экспериментально определяемыми параметрами дефектности являются: поверхностная плотность n, линейные размеры (полудлина l) и угол ориентации a дефектов по отношению к действию нагрузки. Для исследования структуры нарушенного обработкой слоя материала использовался люминесцентный микроскоп ЛЮМАМ И-3, снабженный фотоаппаратом. В качестве проникающего индикатора при люминесцентной дефектоскопии применялась жидкость ЛЖ-6А, которая позволяет определять дефекты с раскрытием около 1 мкм [2].

Механизм формирования поверхностного слоя керамики отличается от процессов происходящих при алмазном шлифовании металлов. При шлифовании хрупких неметаллических материалов имеют место: упругопластическая деформация без разрушения, диспергирование припуска при пластической деформации и хрупкое разрушение со скалыванием частиц. Вероятность тех или иных механизмов разрушения припуска определяется как физико-механическими свойствами материала, так и нагрузкой на зерна (режимами обработки). На фотографии (рис.1а) полученной на растровом электронном микроскопе BS 340 хорошо видно направление обработки и следы оставленные зернами при разрушении припуска. При рассмотрении поверхности видно, что под воздействием алмазного зерна обрабатываемый материал проявляет свои упругопластические свойства. На фотографии видно пластическое течение материала совместно со сдвиговыми деформациями. Следовательно, непосредственно под зерном достигают критического значения максимальные касательные напряжения. Трудность возникновения пластической деформации приводит к тому, что процесс релаксации напряжений на конце трещин, имеющихся в керамике, идет плохо. Это приводит к хрупкому разрушению. При обработке керамики наряду с внутрикристаллической деформацией протекает и межкристаллическая деформация – относительное скольжение и поворот зерен, дробление их на отдельные блоки, разрушение по границам зерен и их блоков, что можно видеть на фотографии (рис.1б).

Пластическое разрушение керамики наблюдается на глубине внедрения зерна до 0,01 мм в зависимости от скорости детали. На большей глубине разрушения хрупко – пластическое или хрупкое. Формы поперечных сечений срезов при этих видах разрушения имеют сколы по бокам, либо имеют вид очагов разрушения. Мелкозернистый круг обладает большим количеством режущих вершин, толщина среза от отдельного зерна уменьшается, что уменьшает вероятность хрупкого разрушения. Меньшая толщина среза отдельным зерном получается также при увеличении скорости резания (увеличение диаметра круга), в результате чего также снижается доля хрупкого разрушения. До глубины 50 мкм происходит пропорциональное увеличение размеров разрушенных зон, после чего происходит стабилизация их размеров. Дальнейший рост глубины шлифования практически не ведет к увеличению размеров сколов и очагов. Анализируя экспериментальные данные образования очагов разрушения, можно прийти к выводу, что наиболее эффективной кривой аппроксимации полученных зависимостей является степенная функция



где b – ширина единичного среза, мкм; a , c – коэффициенты уравнения регрессии; t – глубина шлифования, мкм. Распространение разрушения вглубь керамики при очаговой форме разрушения равно половине ширины «кратера».

Полигоны плотности относительной частоты и плотность распределения размеров «кратеров» после его аппроксимации бета распределением показаны на рис.2. На вероятность появления сколов и их размеры оказывает влияние пористость структуры и твердость обрабатываемого материала. С увеличением пористости и твердости оксидной керамики увеличиваются размеры «кратеров» разрушения.

Характер разрушения припуска практически не учитывался в формировании шероховатости поверхности хрупких неметаллических материалов, за исключением работы [7]. Шероховатость создается вследствие копирования на обрабатываемой поверхности траектории движения алмазных зерен, которые оставляют в обрабатываемом материале следы – срезы. Случайный характер рельефа круга является доминирующим в формировании шероховатости, поэтому при ее описании принято использовать аппарат теории вероятностей и случайных процессов. Была разработана математическая модель для определения параметров шероховатости поверхности керамики с учетом вероятностного характера хрупкого разрушения поверхностного слоя керамики и состояния режущего рельефа круга [8]. Она позволяет прогнозировать более точно (на 5 - 20%) параметры шероховатости поверхности керамики при алмазном шлифовании (рис.3) с учетом вероятностного характера разрушения припуска.

Изменяя такие факторы, как глубина резания и зернистость алмазного круга можно контролировать характер разрушения керамики, а, следовательно, изготавливать изделия с рациональными параметрами шероховатости обработанной поверхности.

В общем случае распределение дефектов определяется плотностью f двухмерного распределения вероятностей двух случайных величин: полудлины трещины ( l ) и их ориентацией ( a ) относительно вектора скорости резания. Экспериментальные исследования показали, что условные плотности распределения поверхностных дефектов по полудлине их размеров адекватно описываются упрощенным b - распределением для всех интервалов изменения угла a . Плотность распределения дефектов по длине имеет вид



(1)



где r - параметр трещиноватости; d max=70мкм максимальная полудлина трещин.

С увеличением подачи, потерей кругом режущей способности параметр трещиноватости уменьшался с 8,5 до 3. Одновременно увеличение подачи (уменьшение ) приводит к росту числа дефектов на обработанной поверхности. При затуплении круга происходит увеличение доли больших обработочных дефектов (r уменьшается). Физико-механические свойства также оказывают влияния на характер распределения дефектов по размерам. С увеличением параметра К 1с, при прочих равных условиях обработки, значение r также возрастает. Таким образом, параметр трещиноватости r комплексно оценивает влияние условий обработки на формирование дефектного слоя КК.

Для анализа экспериментальных результатов используем аналитически установленные результаты в работе?9?. Среднее значение максимальных разрушающих напряжений при чистом изгибе образца прямоугольного сечения при его неизменном значении определяется по следующей зависимости

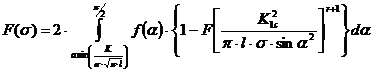
(2)



где -минимальная разрушающая нагрузка;



- распределение вероятности разрушающей нагрузки; n-количество дефектов. Используя зависимость (2), можно оценить влияние режимов шлифования на прочность образцов. Из рисунка 6 видно, что с увеличением числа дефектов в нагружаемой зоне образца n и уменьшением параметра трещиноватости r , средняя прочность снижается. Уменьшая режимы резания, а ,следовательно, и силовое воздействие на обрабатываемую поверхность можно снизить параметр трещиноватости и увеличить среднюю прочность изделий на изгиб. Следовательно, структура дефектного слоя определяется как физико-механическими свойствами, так и режимами алмазного шлифования керамики и ситалла.



Другим не менее важным показателем трещиноватого слоя является ориентация дефектов относительно вектора скорости резания. Обработочные дефекты на поверхности ситалла АС-418 имеют ветвящуюся структуру с размерами до 200мкм. Некоторые продольные трещины сливаются, образуя магистральные, направленные вдоль вектора скорости шлифования. Ориентация трещин находится в пределах от 0 до 60 град. От направления движения зерна, а распределение дефектов по углу ориентации равномерное. Исследование структуры дефектного слоя керамики из Si3N 4 показали преимущественную ориентацию дефектов в направлении движения алмазного зерна с длиной дефектов до 140мкм. В диапазоне углов от 0 до 50 град. параметр трещиноватости более чем в два раза меньше (r=2,9) , чем в диапазоне от 50 до 90 градусов. Это свидетельствует о том, что вероятностные размеры трещин в направлении движения больше. Кроме этого и плотность дефектов в первом диапазоне выше. Полученные результаты свидетельствует о преимущественной ориентации трещин в направлении движения зерна, об анизотропии структуры поверхностной дефектности КК. Она оказывает непосредственное влияние на прочностные свойства поверхностного слоя КК после алмазного шлифования.

С учетом структуры дефектного слоя, для образца заданного прямоугольного сечения средняя прочность при изгибе определяется последующей зависимости:

(3)



где a 1= ;



a 2 = ;



;



n -количество дефектов в нагружаемой области

j (a ) – функция, определяющая влияние направления дефектов на развитие трещин[4] ;

К1с-величина сопротивления материала развитию трещин, МПа м0,5.

Используя зависимость (3) было определено влияние направления обработки на среднюю прочность образцов при испытаниях на изгиб. Средняя прочность образцов снижается на 9-21% при изменении направления обработки с продольной на поперечную при плоском шлифовании периферией круга. Эти результаты говорят о хорошей сходимости экспериментальных и теоретических значений средней разрушающей нагрузки от направления обработки [5] . Изменение направления обработки при плоском алмазном шлифовании, с продольного на поперечное образцов из ситалла АС-418, приводит к снижению средней прочности ситалла на изгиб на20-50%. Большее снижение прочности для обоих материалов соответствуют более интенсивным режимам резания.

Производственный процесс изготовления деталей из КК должен быть построен на достижении постепенного уменьшения дефектов обработки с целью обеспечения их прочности и надежности при эксплуатации Выбор инструмента, схемы и режимов обработки определяется структурой и свойствами материалов заготовки. Механическая обработка не должна приводить к превышению размеров и плотности дефектов выше определенно допустимого значения с учетом их распределения и ориентации в поверхностном слое. Интенсификация режима шлифования, прежде всего за счет увеличения подачи, вызывает увеличение сил резания, приводит к развитию дефектности поверхностного слоя изделий и, как следствие, к снижению их прочностных характеристик. Изменяя параметры режима можно управлять дефектностью обработанной поверхности технических ситаллов и керамики, обеспечивая заданную прочность изделий. Дефектность, возникающая при обработке, не должна превышать уровень структурной дефектности. В этом случае прочность керамических изделий не снижается.