
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СВЕРХТВЕРДЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

В.А. Рогов, М.И. Шкарупа, Д.К. Гришин

Кафедра технологии машиностроения,
металлорежущих станков и инструментов
Российский университет дружбы народов
Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Дано определение понятия «коэффициент шлифования» (G). Показаны зависимости коэффициента шлифования от твердости материалов. Приведены результаты исследований круглого шлифования сверхтвердых керамических материалов

В настоящее время значительно возросли требования, предъявляемые к современным машинам. Классические конструкционные материалы, такие как сталь и чугун уже перестали удовлетворять современным повышенным требованиям по физико-механическим характеристикам. Появилась необходимость создания новых конструкционных материалов, которые по своим свойствам значительно превосходят классические и кроме того обладают специальными качествами, такими как малая плотность, стойкость к агрессивным средам, диэлектрические характеристики, термостойкость и др. В последнее время в промышленности все больше используются композиционные материалы, технические стекла, керамики, пластики, материалы с памятью формы и т.д. В ряде случаев технологический процесс позволяет изготавливать готовые изделия при комнатной температуре путем отливки без последующей механической обработки. При изготовлении же изделий из керамики в подавляющем большинстве случаев необходима механическая обработка, которая протекает в тяжелых условиях и сопровождается интенсивным выделением тепловой энергии и износом режущего инструмента. Механическая обработка керамики может производиться различными способами: резанием, шлифованием, ультразвуковой обработкой. Резание керамики лезвийным инструментом возможно только при малой частоте вращения заготовки, когда лезвийный инструмент по сути дела скоблит заготовку, раскрашивая материал. Метод используют при предварительной обработке жестких заготовок. Если частоту вращения увеличивать, то керамическая заготовка превращается в абразивный круг, который, практически не разрушаясь, шлифует режущую кромку резца. Поэтому наиболее распространенный вид обработки керамики — шлифование: плоское, круглое, торцовое, внутреннее и т.д. Для шлифования керамики можно использовать различные абразивные материалы, такие как естественный и искусственный корунды, карбид кремния, карбид бора. Однако в настоящее время преимущественно используют (как более эффективный) искусственный алмаз, в некоторых случаях — кубический нитрид бора (боразон, эльбор). Механическая обработка, особенно шлифование, зависит от свойств керамики, таких как твердость, хрупкость, прочность, пористость, состояние поверхности, термостой-

кость, и от свойств абразивного материала и инструмента. Она также зависит от скорости съема керамики, прижимающего усилия, охлаждения шлифуемого изделия и других условий обработки. Важнейшее свойство керамики, определяющее ее податливость механической обработке — твердость.

Процесс стружкообразования при резании определяется механизмами пластического и хрупкого разрушения материала. В зависимости от наличия дефектов в поверхности, остаточных напряжений и физико-механических свойств материала преобладает тот или иной вид разрушения материала. Керамика, являясь весьма твердым материалом, обладает значительным сопротивлением шлифованию.

Введем параметр G — коэффициент шлифования, определяющий отношение величины снятого материала к износу шлифовального круга.

Сопротивление шлифования F и коэффициент G изменяются в зависимости от вида керамики, но не всегда сопротивление шлифованию керамики больше чем выше ее твердость. Сопротивление шлифованию зависит не только от твердости материала H , но и от ударной вязкости K , т.е. имеет следующую зависимость:

$$F = a \cdot K^{3/4} \cdot H^{1/2},$$

где a — коэффициент пропорциональности.

Обрабатываемость керамики во многом определяется работой упругой деформации, которую можно принять за критерий обрабатываемости. Удельная работа упругой деформации MOR равна

$$MOR = \sigma_t / 2E,$$

где σ_t — прочность материала на растяжение; E — модуль упругости.

Этот критерий означает, что чем меньше величина энергии деформирования на единицу объема материала до его разрушения, тем легче выполняется операция механической обработки. Если рассматривать зависимость между удельной работой упругой деформации и коэффициентом шлифования, то чем больше величина MOR , тем меньшим будет коэффициент шлифования (рис. 1).

При шлифовании кварцевой керамики значительно возрастает величина нормальной составляющей силы резания и отношение тангенциальной составляющей к нормальной составляет обычно $F_t / F_N = 0,05—0,15$ (для стали $F_t / F_N = 0,2—0,35$).

Это соотношение для керамики значительно меньше по причине повышенной твердости керамических материалов, что затрудняет внедрение в поверхность режущих кромок. При внутреннем шлифовании керамики это соотношение становится еще меньше ввиду большей дуги контакта между деталью и кругом.

На основании вышеизложенного можно утверждать: увеличение твердости керамического материала приводит к уменьшению величины коэффициента шлифования.

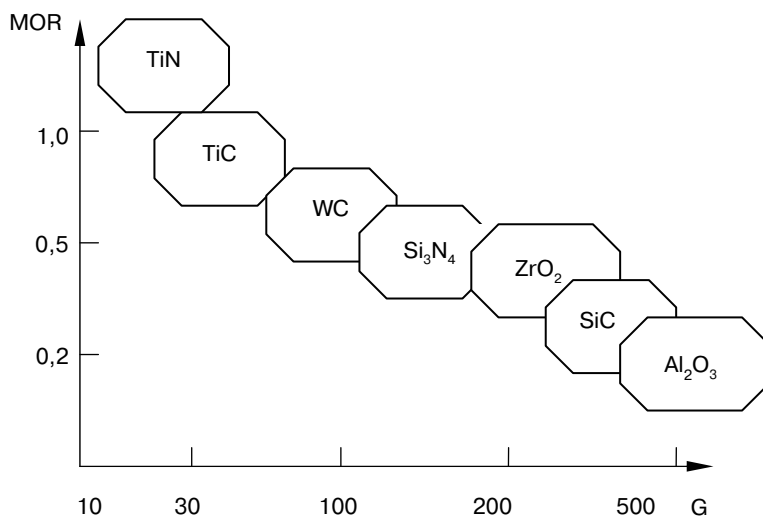


Рис. 1. Зависимость между удельной работой упругой деформации MOR (N мм / мм³) и коэффициентом шлифования G различных видов керамики

Коэффициент шлифования также уменьшается с уменьшением концентрации и зернистости алмазов в абразивном инструменте.

С увеличением глубины резания и скорости вращения детали силы резания при шлифовании керамики, как и при шлифовании стали, возрастают. Оценить усилие шлифования керамики как функцию свойств материала, таких как модуль упругости, твердость, предел текучести и вязкость не представляется возможным. Ни одно из этих свойств не позволяет прогнозировать величину усилия шлифования с высокой степенью надежности во всем диапазоне режимов шлифования. При шлифовании керамики с увеличением скорости резания нормальная и тангенциальная составляющие силы шлифования уменьшаются, что связано с изменением толщины стружки.

Большая величина нормальной составляющей силы шлифования при обработке керамики означает, что также велика и упругая деформация в системе станок—приспособление—инструмент—деталь (СПИД). Это приводит к снижению точности обработки деталей. Для оценки этой важной величины можно использовать понятие удельной жесткости шлифования. Этот параметр определяется как отношение между нормальной силой шлифования и действительной глубиной резания. Очевидно, что чем больше удельная жесткость шлифования, тем меньше действительная глубина резания и тем больше погрешность обработки. Нужно заметить, что из-за нелинейности нормальной силы шлифования удельная жесткость шлифования в области малой глубины резания становится больше. Это доказывает трудность шлифования керамических материалов с высокой точностью в диапазоне малых глубин резания.

Влияние режимов шлифования на шероховатость поверхности керамических материалов аналогично тому, что и при шлифовании металлов, т.е. шероховатость при малой глубине резания, низкой скорости вращения детали и высокой

скорости шлифования. Однако шероховатость поверхности при шлифовании керамических материалов менее чувствительна к режимам резания, чем при шлифовании металлов и намного больше зависит от свойств самого материала. Интересно отметить, что в отличие от шлифования металлов при шлифовании керамических материалов нет большой разницы между шероховатостью R_a , измеренной в направлении шлифования и — перпендикулярной к нему. Этот результат указывает на то, что хрупкое разрушение играет существенную роль при шлифовании керамических материалов.

Прочность хрупких материалов весьма чувствительна к трещинам, возникающим в процессе шлифования. Испытания образцов на изгиб по трем точкам показывает, что прочность образцов значительно уменьшается по мере увеличения размера зерна шлифовального круга. Направление шлифования также влияет на прочность материала. Когда направление скорости резания при шлифовании перпендикулярно направлению изгиба, прочность материала заметно возрастает. Глубина трещин может быть грубо определена путем удаления дефектного слоя методом притирки образца. Прочность на изгиб определяется на каждой стадии процесса притирки. Толщина снимаемого слоя, когда прочность восстанавливается до первоначального состояния, соответствует глубине трещин. К примеру, при шлифовании образца кругом зернистостью № 60 глубина трещин, определяемая с помощью указанной методики, равнялась 40 мкм, а шероховатость поверхности $R_{\max} = 2$ мкм. Это значит, что глубина трещин намного больше, чем шероховатость поверхности. Шлифование керамики характеризуется быстрым затуплением алмазных зерен, при этом самозатачивание зерен возможно лишь при увеличении давления шлифовального круга, что ведет к образованию на обработанной поверхности рисок, сколов и других дефектов.

Для шлифования керамики в основном используются алмазные круги на металлической или органической связке. Чаще для обработки керамики используют алмазный абразив, прочно закрепленный в металлической связке. Однако при шлифовании высокопрочных видов керамики, разработанных в последнее время, алмазные зерна быстро изнашиваются, и имеет место «засаливание» круга. Поэтому для обработки таких материалов целесообразно использование кругов на органической связке, которые легко самозатачиваются и длительное время сохраняют режущую способность. В случае обработки кругами на металлической связке, в которых эффект самозатачивания отсутствует, непрерывную правку круга можно выполнять за счет электролитического эффекта. При этом в процессе шлифования на металлическую связку, которая служит положительным полюсом, подается ток и осуществляется удаление связки соответственно величине износа алмазных зерен, что обеспечивает постоянное выступание абразива. Таким образом, обеспечивается хорошая абразивная способность круга. При электролитическом шлифовании сопротивление шлифованию, в сравнении с обычным снижается в 1,1—1,5 раза и обеспечивается хорошая режущая способность круга. Для шлифования керамических материалов весьма важной является работа по созданию алмазных кругов, обладающих высокой абразивной способностью.

Весьма перспективным является использование шлифовальных кругов на чугунной связке. При этом прочность удержания абразива близка к уровню, обеспечиваемому металлической связкой, но так как матрицей круга является чугун, явления прижога и засаливания заметно снижаются. Коэффициент шлифования при обработке нитрида кремния Si_3N_4 этими кругами по сравнению с кругами на органической связке выше в 2—4 раза, а количество следов резания на поверхности уменьшается примерно на $1/3$.

Авторами были проведены эксперименты по круглому наружному шлифованию технической керамики с поперечной подачей (врезное шлифование). В качестве образцов использовались керамические материалы из нормально спеченного нитрида кремния (Si_3N_4), оксида алюминия (Al_2O_3), частично стабилизированной двуокиси циркония (ZrO_2) и химически спеченного нитрида кремния (Si_3N_4).

Были использованы шлифовальные алмазные круги ($D 350 \times 10$ мм) на металлической связке (SD170N75M, SD170100M, SD170N125M). Скорость резания: $V = V_k + V_d = 2354$ м/мин, где V_k — скорость круга, V_d — скорость детали. Отношение скоростей: $K_v = V_d / V_k = 0,0024—0,0106$. Продольная подача $S = 0,5—5$ мкм/об детали. Жесткость системы: $K_{sy} = 12,8$ МН/м.

Результаты экспериментов показали следующее.

1. Цикл врезного шлифования тонкой керамики, как и в случае обработки алмазным кругом стали, характеризуется тремя стадиями: переходной, установившегося шлифования и выхаживания.

2. Отношение тангенциальной составляющей силы резания и нормальной при шлифовании на всех Si_3N_4 , Al_2O_3 , ZrO_2 на всех стадиях не превышает $1/10$ и крайне мало по сравнению с обработкой стали. При шлифовании нитрида кремния (Si_3N_4) нормальная составляющая силы резания все время возрастает, поэтому установившаяся стадия процесса отсутствует, и отношение тангенциальной составляющей силы резания к нормальной составляет около $1/20$.

3. Наибольший износ круга имеет место при обработке нитрида кремния (Si_3N_4) и далее уменьшается при обработке образцов в следующем порядке: Si_3N_4 , Al_2O_3 , ZrO_2 . Высокое значение износа круга при обработке нитрида кремния (Si_3N_4) предположительно связано с большим количеством пор у этого материала, что обуславливает большую ударную нагрузку на зерна, приводящую к образованию микродефектов на вершинах зерен.

4. Шероховатость обработанной поверхности на различных стадиях выхаживания $R_{\max}$ равна примерно 6 мкм и практически не меняется, и, кроме того, ее значения для различных видов керамики мало отличаются друг от друга.

5. Концентрация алмаза в круге в исследуемых пределах (75, 100 и 125%) не оказывает сколько-нибудь заметного влияния на износ круга, нормальную силу резания и отношение нормальной силы резания к тангенциальной. Шероховатость поверхности, несмотря на увеличение концентрации алмаза в круге, не становится меньше и сохраняет почти постоянное значение.

6. Величина K_v/S характеризует размеры стружки: чем больше эта величина, тем крупнее стружка, снимаемая одной режущей кромкой. Увеличение K_v/S вызывает рост нормальной силы резания и средней скорости износа шлифовального круга C_0 (мкм/с) при обработке керамики. Несмотря на то, что при шлифовании нитрида кремния (Si_3N_4) нормальная сила резания меньше в сравнении со шлифованием ZrO_2 , средняя скорость износа C_0 достигает весьма больших величин.

Удельная энергия шлифования керамики U (Дж/мм³) принимает высокие значения. При увеличении K_v Δ от 0 до 0,01 мкм/об она вначале резко падает, а затем стремится к постоянному значению. Данное обстоятельство говорит о существовании размерного эффекта, который заключается в том, что при малых размерах стружки удельная энергия шлифования возрастает.

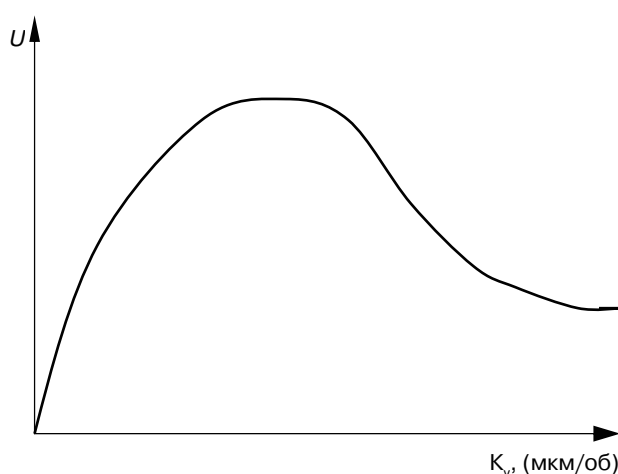


Рис. 2. Удельная зависимость энергии шлифования U (Дж/мм³) керамики от величины K_v

При обработке керамики Al_2O_3 на трех стадиях шлифования алмазным кругом — переходной, установившейся и стадии выхаживания — изучались изменения нормальной составляющей силы резания и съема материала. В качестве шлифуемого образца использовалась заготовка размером $D\ 110 \times 4$ мм (*твёрдость по Виккерсу 1620*). Для сравнения процессов шлифования керамики и металлических материалов шлифовались образцы из закаленной стали ($HV = 750$).

Условия шлифования: шлифовальный круг: 3D C27075B3 (размеры $D\ 300 \times 8$); скорость круга $V = 1920$ м/мин; глубина резания: поперечная подача $S = 0,4\text{—}16$ мкм/об; отношение скоростей изделия и круга находится в диапазоне: $K_v = 0,005\text{—}0,041$; ширина шлифования $B = 4$ мм.

Результаты экспериментов показали:

1. С увеличением поперечной подачи S нормальная составляющая силы резания увеличивается, а время шлифования керамики на переходной стадии уменьшается. Такая же зависимость наблюдается при шлифовании стали, причем при малой поперечной подаче нормальная составляющая увеличивается пропорцио-

нально ей. Однако при большой поперечной подаче пропорциональная зависимость не наблюдается. Например, изменение подачи в 2,5 раза (с 1,1 до 2,7 мкм/об) увеличивает нормальную составляющую силы резания только в 1,5 раза.

2. При шлифовании стали на переходной стадии по мере увеличения поперечной подачи постепенно возрастает коэффициент образования размера. Одновременно уменьшается время шлифования на переходной стадии сначала резко, а затем медленно.

При шлифовании керамики зависимости аналогичны шлифованию стали, однако, когда глубина резания достигает некоторой величины, градиент возрастания коэффициента образования размера резко уменьшается. Это значит, что область изменения коэффициента образования размера можно в зависимости от поперечной подачи разделить на две зоны. В зоне с относительно малой поперечной подачи градиент возрастания коэффициента образования размера керамического образца больше по сравнению со сталью. В зоне с большой поперечной подачей градиент возрастания коэффициента образования размера керамики меньше по сравнению со сталью. Это значит, что в зоне с малой поперечной подачей время шлифования керамики на переходной стадии больше, чем время шлифования стали; для зоны с большой поперечной подачей, наоборот, можно получить меньшее время шлифования, чем для стали.

3. На установившейся стадии зависимость коэффициента образования размера от поперечной подачи аналогична шлифованию керамики на переходной стадии. Поперечная подача, соответствующая изменению градиента, почти такая же и достигает порядка 1,6 мкм/об.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Мазин Г.С. Абразивная обработка керамических материалов. — М.: НИИТАвтопром, 1997. — С. 30—50.
- [2] Резников А.Н. Абразивная и алмазная обработка материалов. — М.: Машиностроение, 1987. — С. 108—150.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SUPERHEAD CERAMIC GRINDING

V.A. Rogow, M.I. Shkarupa, D.K. Grishin

Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

The definition of the «Grinding Coefficient» (G) is formulated. The relationship between the grinding coefficient and hardness of materials is shown. Test results of circular grinding of superhead ceramic materials are presented.