© Т.Б. Теплова, 2006

УДК 666.9-16

Т.Б. Теплова

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МИКРОШЛИФОВАНИЯ ТВЕРДЫХ КРИСТАЛЛОВ

Семинар № 23

Современные требования к размерным и качественным параметрам обрабатываемого изделия, особенно в микроэлектронике и медицине, ставят жесткие условия по точности обработки. При размерно-регулируемом шлифовании дискретность задания и отработки перемещений по осям X и У составляют 0,5 мкм, а по оси Z составляет 0,05 мкм (1). В то же время изменение размеров образца вследствие теплового расширения в процессе обработки может существенно превышать эту величину. Поэтому для создания алгоритма обработки различных хрупких твердых материалов, необходимо учитывать тепловые процессы, сопровождающие микрошлифование поверхностей.

Рассмотрим физическую сущность процессов происходящих при соприкосновении движущихся поверхностей обрабатываемого материала и шлифовального круга. Эти поверхности не являются идеально гладкими и плоскими, а обладают микронеровностями. Конечной целью шлифования является уменьшение микронеровностей обрабатываемого материала до заданной величины. Если твердость обрабатываемого материала соизмерима с твердостью абразива шлифовального круга, то первоначально при малой врезной подаче площадь контакта может быть очень мала. При относительном сдвиге осуществляется не только скольжение по контактным площадкам, но и упругое деформирование выступов. При движении в горизонтальном направлении один выступ начинает прогибать другой. Т.к. ширина пиков мала (микронного уровня) в пределах микросмещений основную роль играет упругое сопротивление, т.е. сила пропорциональна смещению. Затем верхний выступ переместится за нижний, причем оба они сплющиваются в результате хрупкого разрушения или пластической деформации. В результате этого увеличивается площадь контакта ОП с шлифовальным кругом и аналогичные взаимодействия происходят с другими более мелкими микровыступами, незадействованными на начальном этапе.

При этом во время упругого взаимодействия выступов, согласно релаксационной модели, предложенной академиком Паниным В.Е. (2), любая точка в деформируемом твердом теле испытывает сдвиг. Однако в кристалле сдвиги связаны с определенными кристаллографическими плоскостями. Они не всегда совпадают с направлением приложенной силы. В каждой точке деформируемого объема в заданный момент времени сдвиг может осуществляться только по одной системе плоскостей скольжения, а именно по той, которая соответствует направлению максимальных касательных напряжений, в котором решетка теряет свою сдвиговую устойчивость. В результате специального динамического внешнего воздействия

периодических касательных напряжений, в кристалле возникают сильные статические смещения атомов из узлов кристаллической решетки, приводящие в зоне действия градиента напряжений в сильно возбужденное состояние обрабатываемую поверхность. В кристаллах появляются временные вакансии и новые степени свободы. Происходит перераспределение кристаллических связей, причем число атомов не изменяется. В этих условиях возникают коллективные возбуждения. Устойчивость таких коллективных возбуждений поддерживается внешним воздействием микроконцентраторов касательных напряжений. Распад таких коллективных возбуждений рождает движение деформационных дислокаций. Эти эстафетные движения деформационных дефектов (ансамбля дислокации) проходят через вакансии между узлами основной кристаллической решетки, что обеспечивает их высокую подвижность. Согласно этой модели, в каждой точке деформируемого объема ансамбль дефектов эстафетно сдвигается только по одной системе плоскостей скольжения близко соответствующей направлению максимальных касательных напряжений. На микромасштабном уровне дислокации играют фундаментальную роль. Итак, локальная потеря сдвиговой устойчивости кристаллической решетки приводят к тому, что исходный высокопрочный кристалл в ходе квазипластической деформации наполняется дефектами структуры. Они снижают его общую сдвиговую устойчивость.

Важную роль в этом процессе играет поверхностный слой, который, например, специалисты по мезомеханике считают особым состоянием твердого тела и рассматривает поверхностный слой в нагруженных материалах как самостоятельный мезоскопический структурный уровень деформации, который играет важную роль в механическом поведении деформируемого твердого тела (3).

При размерно-регулируемом микрошлифовании можно рассматривать подповерхностный слой обрабатываемого материала или кристалла как подложку поверхностного слоя. Во время микрошлифования, когда поток поверхностных дефектов недислокационной природы распространяется от первичного концентратора напряжений вглубь кристалла, кристаллическая подложка деформируется при этом упруго и тормозит развитие потока поверхностных дефектов. В результате наибольшее развитие и распространение дефектов при воздействии на поверхностный слой кристалла ритмичного знакопеременного механического поля происходит в поверхностном слое кристалла в направлении максимальных касательных напряжений. Знакопеременное воздействие периодических касательных напряжений на поверхностный слой провоцирует преимущественное развитие движения дефектов, а также возникновение вторичных концентраторов напряжений в поверхностном слое ОП. Именно в поверхностном слое формируется ячеистая структура мезообъемов, которая в результате синхронного колебательного движения указанных ячеек по схеме «сдвиг+поворот» при достижении усталости приводит к созданию диссипативного слоя, а затем к одновременной потери сдвиговой устойчивости каждой отдельной и всего множества указанных ячеек. Это приводит к последовательному дискретному удалению одного слоя за другим с образованием новой поверхности нанометрового микрорельефа и ненарушенным подповерхностным слоем.

Рассмотрим энергетический баланс в системе «инструмент - обрабатываемый материал».

Обозначим через $E_{вх}$ энергию, получаемую системой, которая вводится при соприкосновении горизонтально вращающегося шлифовального круга (вращающейся производящей инструментальной поверхности (ПИП)) с движущимся на столе станочного модуля вдоль оси X образцом материала с горизонтально расположенной обрабатываемой поверхностью (ОП).

При этом:

$$E_{вх} = E_{вр\ ПИП} + E_{двX} + E_{вр.\ под.}$$

где $E_{вх}$ - энергия, вводимая в систему; $E_{вр\ ПИП}$ – энергия, вводимая за счет вращения ПИП; $E_{двX}$ – энергия, вводимая при движения стола по оси X, осуществляемого шаговым двигателем; $E_{вр.\ под.}$ – энергия, получаемая системой при врезной подаче образца по оси Z.

Все составляющие вводимой энергии задаются двигателями станочного модуля и могут быть определены:

$E_{вр\ ПИП}$ может быть вычислена по разности измеренной мощности холостого хода (N_{xx}) и мощности при обработке образца ($N_{обр}$) во время обработки материала при одном проходе образца под кругом.

$$E_{вр\ ПИП} = (N_{xx} - N_{обр})t_{обр}$$

где $t_{обр}$ – время нахождения образца под кругом.

Движение стола станочного модуля вдоль оси X из одной концевой точки в другую проходит участки разгона, стационарного движения и торможения. Но обработка образца происходит на стационарном участке движения стола станочного модуля. Скорость движения стола на этом участке можно считать постоянной (V) и ее легко определить.

$E_{двX}$, как работу силы осуществляющей движение вдоль оси X, можно вычислить по изменению мощности двигателя аналогично $E_{вр\ ПИП}$.

Врезная подача при размерно-регулируемом микрошлифовании осуществляется дискретно в момент нахождения стола станочного модуля в крайнем положении на заданную величину. Каждый дискретный шаг составляет 0,05 мкм.

$E_{вр.\ под.}$ можно определить как работу, совершаемую на расстояние L (заданной врезной подачи) силой двигателя подающего образец по оси Z (равной изменению нормальной составляющей силы резания)

Схематично система «инструмент-обрабатываемый материал» представлена на рис. 1

Введенная энергия в системе «инструмент - обрабатываемый материал» расходуется на работу силы трения. При этом работа силы трения распределяется между инструментом, которым является ПИП, обрабатываемым материалом и упругой обрабатывающей системы, в которой происходит размерно-регулируемое шлифование.

$$A_{трения} = A_{трения\ ПИП} + A_{трения\ ОП} + A_{трения\ УОС}$$

Схематично работа силы трения в системе «инструмент- обрабатываемый материал»представлена на рис. 2

Работа силы трения в образце ($A_{тр.1}$) распределяется между поверхностным слоем ($A_{тр.11}$) и объемом образца ($A_{тр12}$)

При этом $dA_{тр11}$ - полезная энергия, направленная на микрошлифование поверхностного слоя образца Коэффициент полезного действия работы сил трения в системе будет выражаться отношением:

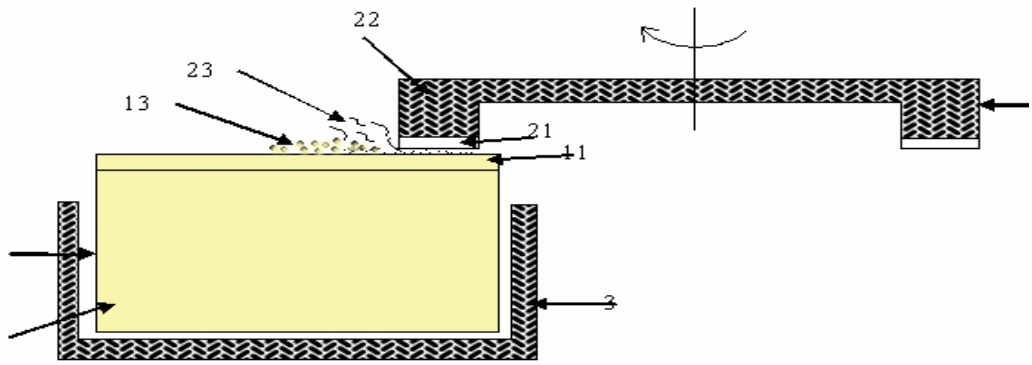

Рис. 1. *1* – образец; *2* - шлифовальный круг; *3* – державка; *11* - поверхностный слой образца; *21* - поверхностный слой шлифовального круга; *12* - внутренний объем образца; *22* - внутренний объем шлифовального круга; *13* - пыль от шлифования образца; *23* - пыль от шлифовального круга

греванию поверхностного слоя образца

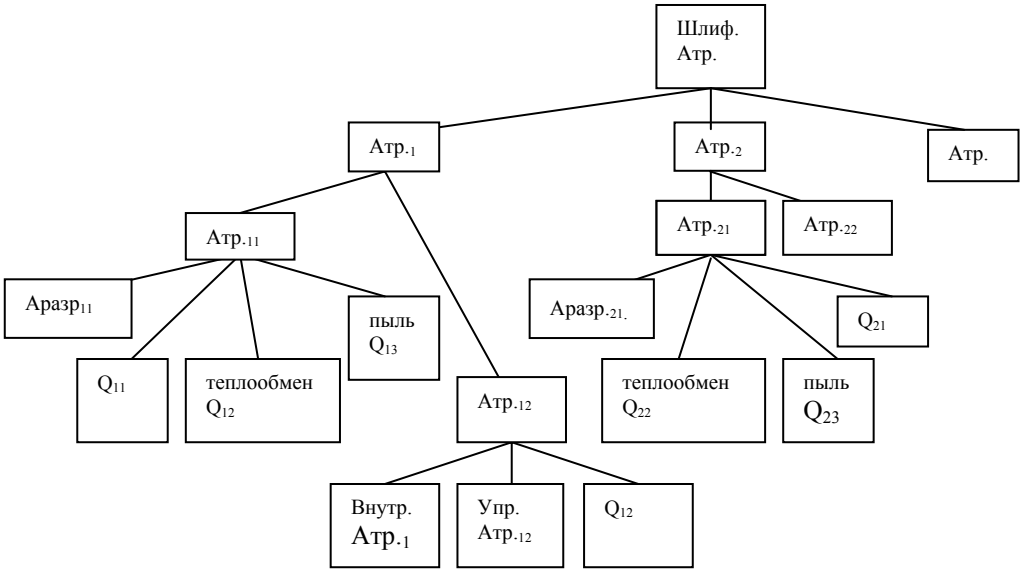

Рис. 2

$$\eta = \frac{dA_{TP11}}{dA_{TP}}$$

Рассмотрим подробно каждую составляющую работы силы трения.

Работа силы трения в поверхностном слое образца расходуется на работу по разрушению поверхностного слоя и создания новой поверхности ($A_{разр11}$), на- (Q_{11}), отводу тепла от поверхностного слоя внутрь образца (посредством теплообмена ($-Q_{12}$)) и отводу тепла (посредством удаляемой с обрабатываемой поверхности образца пылью из разрушенных частиц поверхностного слоя образца (Q_{13})).

Работа силы трения внутри образца состоит из внутреннего трения, вследст-

вии которого развивается поток дислокаций, распространяющийся вглубь образца ($A_{тр12}^{внут}$), работу сил упругости внутри образца ($A_{12}^{упр}$) и нагреванию образца (Q_{12}).

Работа силы трения в шлифовальном круге ($A_{тр.2}$) распределяется на работу силы трения в поверхнострном слое шлифовального круга (A_{21}) и работу силы трения в самом шлифовальном круге (A_{22}). Для процесса шлифования образца значение имеет только работа силы трения в поверхностном слое шлифовального круга, в результате которой происходит разрушение поверхностного слоя шлифовального круга и образование новой поверхности ($A_{разр21}$), нагрев поверхностного слоя шлифовального круга (Q_{21}), отвод тепла с поверхности шлифовального круга (посредством теплообена ($-Q_{22}$)) и отводу тепла (посредством удаляемых из места контакта шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью частиц разрушенного поверхностного слоя шлифовального круга ($-Q_{22}$)).

Кроме того, работа силы трения тратится на работу сил упругости в упругой обрабатывающей системе (УОС) станочного модуля.

Обладая достаточной жесткостью в каждом своем звене, УОС все же имеет подвижность между своими частями. При этом можно выделить упругие взаимодействия частей, оказывающих наибольшее влияние на результаты микрошлифования материала:

- 1. ПИП-ОП образца материала;
- 2. Образец-державка;
- 3. Державка-цанга;
- 4. Цанга-плита;
- 5. Плита-станина

Общая упругая деформация является суммой деформаций каждой части.

В соответствии с законом Гука F= kx, где k-жесткость (Н/м), x-деформация(м), ,среднее значение силы $F_{ср}$ = F/2.

Т.к. работа по упругому сжатию над системой в целом равна сумме работ по сжатию каждой части, то:

$A_{тр.\ УОС} = k_1x_1^2/2 + k_2x_2^2/2 + k_3*x_32/2 + k_4x_4^2/2 + k_5x_5^2/2.$

Рассмотрим отдельно работу силы трения, которая приводит к нагреву соприкасающихся поверхностей обрабатываемого материала и шлифовального круга (ПИП- производящей инструментальной поверхности). В результате совершения этой работы происходит нагрев обрабатываемого образца и шлифовального и круга. При этом распределение теплового потока между образцом и шлифовальным кругом происходит, в первом приближении, пропорционально их теплопроводности.

$q_{кр}/q_{обр} = \lambda_{кр}/\lambda_{обр}$

где $q_к$ - плотность теплового потока в направлении шлифовального круга, *дж*с*$^{-1}$**м*$^{-2}$; $q_{обр}$ - плотность теплового потока в направлении образца, *дж*с*$^{-1}$**м*$^{-2}$; $\lambda_{кр}$ –теплопроводность шлифовального круга *вт/м· град;* $\lambda_{обр}$ – теплопроводность образца *вт/м·град*

При размерно-регулируемом шлифовании обычно применяются шлифовальные круги с алмазными зернами различной зернистости на керамической связке или на связке из костной муки. При этом заполнение алмазными зернами составляет ¼ объема связующего материала. Т.е. теплопроводность шлифовального круга приближенно можно считать, как ¼ теплопроводности алмаза.

При нагревании образца обрабатываемого материала под действием работы силы трения в процессе размерно-регулируемого микрошлифования происходит его тепловое расширение. При этом, в направлении совпадающем с осью Z величина линейного теплового

расширения увеличивает врезную подачу или нормальную составляющую силы резания. Поэтому для получения бездефектной поверхности обрабатываемого образца большое значение имеет решение тепловой задачи влияния нагрева на нормальную составляющую силы резания.

Нормальную составляющую силы резания можно записать:

$F_z = k^o_{упр}\, \Delta l_{об}^0$,

где $k^o_{упр}$ – обобщенный коэффициент упругости всей системы, н*м$^{-1}$; $\Delta l_{об}^0$ – длина образца по оси врезной подачи Z в начальный момент микрошлифования.

Работу силы трения при этом можно выразить как:

$A_{тр} = F_z\, k_{тр}\, S$,

где $k_{тр}$ – коэффициент трения между диском и образцом; S – площадь взаимодействующих поверхностей, м^2.

Но во время микрошлифования при нагреве образца под действием работы силы трения в результате теплового расширения его длина $\Delta l_{об}$ увеличится на величину $\Delta l_{тепл}$

$\Delta l_{об} = \Delta l_{об}^0 + \Delta l_{тепл}$

Соответственно изменится и нормальная составляющая силы резания:

$F^1_z = k^o_{упр} * \Delta l_{об}^0 + k^o_{упр} * \Delta l_{тепл} = F_z + \Delta F_z$,

Это можно рассматривать как дополнительную врезную подачу по оси Z.

Соответственно при этом увеличится работа силы трения:

$A_{тр}^1 = A_{тр} + \Delta A_{тр}$.

Этот процесс нарастает все время в период шлифования образца при увеличении поступления теплового потока в результате работы силы трения.

Для того, чтобы рассчитать предельную врезную подачу и установить закон изменения врезных подач для ведения процесса микрошлифования в зоне пластического резания, не переходя в зону хрупкого разрушения, необходимо знать зависимость коэффициента теплового линейного расширения от температуры.

Зависимость линейного расширения образца от температуры

$dl_T = \beta l_0 dT$

где dl_T – изменение длины образца, м; β - коэффициент линейного расширения материала образца; dT –изменение температуры.

Но при этом $\beta = \beta(T)$

Т.е. $\beta = \beta_0 + kT$

следовательно $dl_T = (\beta_0 + kT) l_0 dT$,

$l_T = \beta_0 l_0 (T - T_0) + (R l_0/2)(T^2 - T_0^2)$,

где T - средняя температура образца.

Но для прецизионного микрошлифования применение среднего значения температуры дает грубую погрешность в определении линейного теплового расширения образца. При размерно-регулируемом шлифовании нагревание образца происходит постепенно в процессе обработки. Посредством теплообмена тепловой поток распространяется от ОП образца по всему объему образца. Следовательно, температура образца зависит от времени обработки и длины образца по оси Z, т.е. $T = T(z,\tau)$. При врезной подаче с дискретностью 0,05 мкм необходимо иметь графическую зависимость изменения для всего диапазона изменения температуры образца во время микрошлифования.

Для того, чтобы с большой точностью рассчитать вклад, который вно-сит тепловое расширение в процесс микрошлифования, необходимо получить экспериментальные зависимости теплового расширения и коэффициента теплового расширения от температуры для материала обрабатываемого образца.

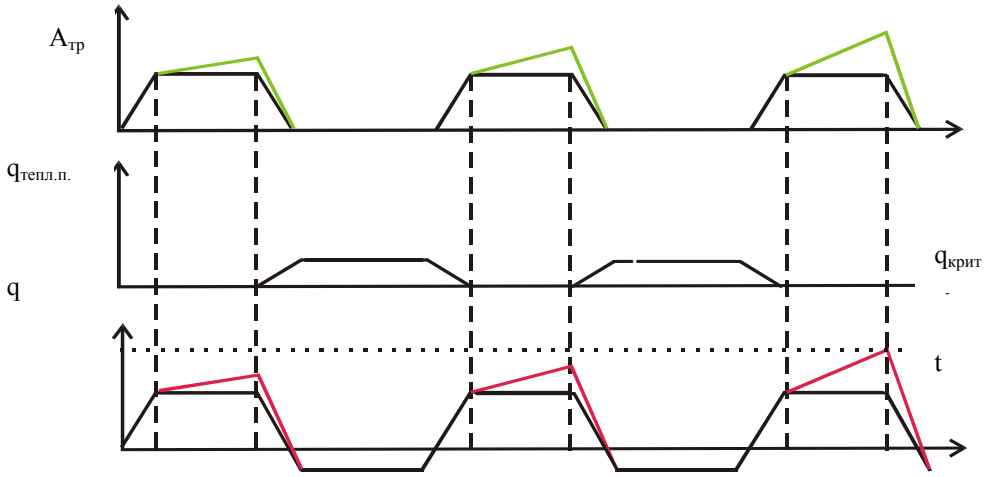

Рис. 3

Процесс размерно-регулируемого шлифования предполагает задание начальных входных параметров обработки образца: скорость вращения шлифовального круга, скорость движения стола станочного модуля, закон изменения величины врезных подач, траектории обработки. При этом шлифование поверхности образца производится в момент его нахождения под шлифовальным кругом.

Т.к. процесс размерно-регулируемого микрошлифования предусматривает периодический заход обрабатываемого кристалла в зону резания и выход из нее, то с этой же периодичностью совершается работа силы трения, в результате которой происходит нагрев образца и распространение теплового потока вдлоль оси Z образца (рис. 3, *а*).

Т.о. при прохождении зоны резаниия под шлифовальным кругом происходит периодическое посту-пление теплового потока в обраба-тываемый образец. При выходе образца из зоны резания происходит потеря тепла (рис. 3, *б*). Потери теплового потока разделяются на потери ПИП и потери обрабатываемого образца. Потери теплового потока с обрабатываемого образца можно рассматривать как сумму тепловых потерь с боковых поверхностей образца, с обрабатываемой поверхности при выходе образца из под круга и отводу тепла через державку образца.

Под действием этого теплового потока с той же периодичностью вследствие теплового расширения возрастает сила прижима кристалла к шлифовальному кругу, и, следовательно, возрастает нормальная составляющая силы резания, и сила трения. С течением времени этот процесс носит возрастающий характер. Когда тепловой поток в образце достигнет критического значения, тепловое расширение кристалла увеличивает прижим кристалла к шлифовальному кругу в направлении врезной подачи, тем самым, увеличивая нормальную составляющую силы резания. Когда действующая сила превышает предел прочности обрабатываемого материала на разрыв, происходит скол (рис. 3, *в*) (4).Решение задач теплового энергетического баланса и понимания физической сущности явлений, сопровождающих процесс размерно-регу-лируемого

микрошлифования, позволит грамотно управлять процессом с целью получения ненарушенных бездефектных поверхностей обрабатываемых изделий из твердых материалов с нанометровым микрорельефом поверхности. Получение бездефектных поверхностей обрабатываемого твердого материала возможно при учете его теплового расширения определением закона изменения врезных подач, режимов обработки с изменением времени выхода кристалла из зоны резания, применением охлаждения или конструктивным изменением контакта «инструмент – обрабатываемый материал». В настоящее время нами проводится работа как в области теоретического расчета тепловых и деформационных полей, так и в области достоверности исходных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. . *Теплова Т.Б.* Перспективы технологии размерно-регулируемого шлифования твердых высокопрочных материалов. М: ГИАБ, №7, 2004
2. *Панин В.Е.//* В кн.: Физика хрупкого разрушения. Ч. 1. - Киев: изд-во ИМП АН УССР, 1976.
3. *Панин В.Е., Фомин В.М., Титов В.М.* Физические принципы мезомеханики поверхностных слоев и внутренних границ раздела в деформируемом твердом теле. /Физическая мезомеханика, №6, 2003.
4. *Теплова Т.Б. Коньшин А.С., Соловьев В.В.* Особенности микрошлифования кристаллов лейкосапфира на станочном модуле с ЧПУ. М: ГИАБ, №3, 2005.

Коротко об авторах

Теплова Т.Б. – кандидат технических наук, докторант, кафедра «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.

Р У К О П И С И ,

ДЕПОНИРОВАННЫЕ В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

1. *Алешичев А.Е., Труш М.А.* Организационно-методические основы автоматизированного управления техническим обслуживанием и ремонтами (532/12-06 — 20.10.06) 4 с.
2. *Сагдеев Г.М., Карякин А.Л.* К вопросу о максимальной температуре нагрева двигателя главного привода драглайна (533/12-06 — 20.10.06) 8 с.
3. *Береговских А.*В. Организация мониторинга, экспертной диагностики и прогнозирования технического состояния силовых трансформаторов предприятий машиностроения (534/12-06 — 24.10.06) 4 с.