

УДК 621.795.2 (075.8)

DOI:

О.Б. Сильченко

## ПЛАСТИЧНОЕ МИКРОШЛИФОВАНИЕ - АЛЬТЕРНАТИВНЫЙ СПОСОБ ОБРАБОТКИ ХРУПКИХ МАТЕРИАЛОВ

Приведены методы обработки хрупких материалов. Сформулирована гипотеза о возможности шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. Приведены условия получения безде-

фектного поверхностного слоя при определенных режимах микрошлифования.

**Ключевые слова:** хрупкое разрушение, пластическое течение, кристалл, микрошлифование.

O.B. Silchenko

## PLASTIC MICROGRINDING – ALTERNATIVE METHOD OF BRITTLE MATERIAL MACHINING

Methods for brittle material machining are shown. A hypothesis of brittle material grinding possibility in the mode of plasticity is formulated. The conditions of obtaining a defect-free surface layer at certain

modes of microgrinding are shown.

**Key words:** brittle fracture, plastic flow, crystal, microgrinding.

Прогресс в ведущих отраслях промышленности России связан с созданием суперпрецизионного оборудования. Для развития суперпрецизионной техники в нашей стране необходимо проведение научно-исследовательских и опытно-конструкторских разработок.

Обработка кристаллических материалов полупроводниковой техники (кремний, германий, сапфир, арсенид галлия, фосфорид галлия, арсенид индия, гранат, кварц и др.), а также кристаллических материалов ювелирной промышленности (природные и искусственные алмазы, изумруд, фионит и другие природные монокристаллы) делает необходимой разработку нанотехнологии и станочного суперпрецизионного оборудования.

Характерные для кристаллов и монокристаллов свойства, такие как высокая твердость и одновременно хрупкость, а также высокие требования, предъявляемые к качеству обработанной поверхности, точности размеров и формы, приводят к тому, что одним из важнейших перспективных способов окончательной обработки становится обработка алмазными кругами. Как показывает опыт обработки вышеуказанных материалов, наиболее эффективным является метод врезного шлифования. Вследствие твердости природных и искус-

ственных алмазов возникает проблема автоматического выбора режимов шлифования, так как шлифование выполняется кругом, содержащим зерна той же твердости, что и обрабатываемый материал.

Сложность при выборе режимов шлифования хрупких и сверхтвердых материалов заключается в том, что режимы обработки таких материалов должны находиться в определенных интервалах, ограничивающих область резания кристалла без хрупкого разрушения. Выход из этой области может привести к необратимым изменениям кристаллической решетки материала (сколам, вырывам и т.п.).

Создание суперпрецизионного оборудования, способного работать автоматически в режимах черного резания, полирования, а также резания без хрупкого разрушения, является основным направлением в развитии современного станкостроения. Создание такого оборудования открывает широкие возможности для применения его в электронной, ювелирной и др. отраслях промышленности.

Последние достижения в повышении точности механической обработки открыли новые возможности обработки хрупких материалов.

Известно, что пластически деформированная стружка образуется при механи-

ческой обработке хрупких материалов, если съем материала достаточно мал (глубина резания менее 1 мкм) [1]. При этом условия формирования подобных пластически деформированных областей наблюдали на продуктах механической обработки разнообразных керамических материалов, стекол и кристаллов. На этом основании можно предположить, что пластическая деформация не связана с природой материала (хрупкий он или пластичный, твердый или мягкий, кристаллический или аморфный).

Шлифование хрупких материалов в условиях, при которых преобладающим путем удаления материала является вязкое разрушение, представляет собой новый технологический процесс, известный как шлифование в режиме пластичности.

В 1954 г. было сделано предположение о возможности шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. Тогда было установлено, что при абразивном износе каменной соли доминирующим механизмом удаления материала является пластическое течение, а не хрупкое разрушение.

В 1975 г. благодаря совершенствованию прецизионных алмазных шлифовальных устройств удалось впервые получить воспроизводимое экспериментальное подтверждение протекания пластической деформации при шлифовании заготовок из хрупкого стекла.

Первое устройство, разработанное специально для того, чтобы использовать малые (0,2 мкм на один проход плоскошлифовального станка) поперечные подачи при шлифовании для повышения чистоты обработки, было создано при участии автора работы. На этой установке было осуществлено шлифование некоторых хрупких кристаллических материалов в режиме пластичности. Последующее повышение точности данной установки позволило улучшить чистоту обработки заготовок из хрупкого материала. На основании исследований было установлено, что существует интервал врезных подач, которые традиционно не используются ни при шлифовании, ни при полировании.

Эта область врезных подач на оборот

шлифовального круга получила название «микрошлифовальный пробел». В него входят врезные подачи на оборот шлифовального круга в пределах 5...7 нм. При шлифовании практически всех хрупких материалов его удаление протекает путем локализованного разрушения. С другой стороны, полирование обеспечивает удаление материала без хрупкого разрушения. Поэтому существует интервал скоростей, соответствующих переходу от абразивной обработки в режиме хрупкости к обработке в режиме пластичности, для различных видов стекол, керамики и полупроводников.

Сформулированная нами гипотеза шлифования в режиме пластичности гласит: «Все материалы независимо от их твердости и хрупкости в процессе механической обработки претерпевают переход от хрупкого режима удаления материала к пластическому, если подача достаточно мала».

Переход от хрупкого удаления материала к пластическому при малых глубинах резания обоснован с использованием чисто энергетического подхода к удалению материала. Для малых глубин резания пластическое течение - энергетически более выгодный механизм удаления материала, чем разрушение. Сопrotивление материала пластическому течению характеризуется его пределом текучести. Конкретная глубина резания, при которой происходит хрупко-пластический переход, зависит от свойств материала, ответственных за характер его пластической деформации и разрушения.

На основании сопоставления параметров перехода к режиму пластичности и свойств соответствующих материалов предложена модель расчета критической глубины резания при микрошлифовании. Модель связывает измеренную критическую поперечную подачу, когда доля поверхности, подвергшейся разрушению, равна 10 %, с критической глубиной резания, рассчитанной по свойствам материала (10 %-я доля поверхности, подвергшейся разрушению, выбрана произвольно и является показателем хрупко-пластического перехода).

Предложенная модель базируется на формуле для критической глубины разрушения при вдавливании твердого материала с использованием критерия Гриффита для распространения трещины. Для материалов, характеризующихся наличием пластической зоны у вершины трещины, ее величину можно определить по классической теории Гриффита распространения трещины.

Сравнение экспериментальных данных, полученных при испытаниях на вдавливание, с расчетами показало хорошее их соответствие, даже если используются данные о свойствах больших объемов материала. Если таким методом рассчитать процесс шлифования, то можно найти критическую скорость поперечной подачи при шлифовании, при которой должен произойти переход от хрупкого режима удаления материала к пластическому.

Таким образом, можно построить последовательность хрупких материалов в соответствии с определяемой их свойствами поперечной подачей, ниже которой хрупкое разрушение при шлифовании происходить не будет.

Наличие плоскостей кристаллизации в анизотропных веществах значительно затрудняет пластическое резание в «твердом» направлении.

Установленная корреляционная зависимость между критической глубиной вдавливания, модулем упругости, энергией разрушения материала и величиной его твердости требует накопления банка данных на основе проведения предварительных экспериментальных исследований. Так как в реальном процессе резания будет иметь место существенное изменение радиуса кривизны режущих зерен шлифовального круга в связи с их истиранием и размерным износом, то, следовательно, фактическая величина критической глубины вдавливания будет значительно отличаться (в сторону снижения) от предварительно полученных значений. Это обстоятельство показывает ограниченность применения данной модели для управления размерной настройкой упругой технологической системы станка в области пластичного микрошлифования.

Процесс шлифования представляет собой процесс высокоскоростного микро-резания мельчайшими режущими крошками абразивных зерен, закрепленных на рабочей поверхности круга. Абразивные зерна, участвующие в работе, испытывают периодическое силовое, тепловое и химическое воздействие в момент контакта с обрабатываемой деталью.

Полное математическое описание процесса шлифования с учетом всех действующих факторов в настоящее время невозможно осуществить из-за сложности процесса. Зерна шлифовального круга имеют разную высоту, поэтому при врезании в заготовку съем основного припуска начинается не сразу. Каждое зерно оставляет на поверхности царапину. Ширина каждой царапины по мере роста глубины врезания увеличивается, и на некоторой глубине царапины сливаются в результате взаимного перекрытия. Этот процесс называется процессом врезания в заготовку.

Процесс шлифования является процессом резания по следу. В.А. Кудинов [2] описывает процесс шлифования как микро-резание по следу и представляет его как процесс в замкнутой динамической системе, в которой наличие следа создает обратную связь с запаздыванием, равным времени одного прохода. Для шлифования существенное значение имеет также обратная связь с запаздыванием через износ и затупление круга. Ее влияние выражается в появлении характерного неравномерного износа круга. Эта обратная связь обычно не учитывается.

Шлифование, как процесс пластического деформирования и разрушения материалов изделия и шлифовального круга, занимает промежуточное положение между резанием резцом и сухим трением.

Изменение условий обработки (подачи, зернистости и т.п.) влияет на силы резания через изменение фактического, а не номинального сечения срезаемого слоя.

Связь эквивалентной упругой системы (ЭУС) и резания выражается смещением в направлении изменения толщины срезаемого слоя (внедрение зерна в шлифуемую поверхность). Из-за деформирования ЭУС шлифовального станка образу-

ется погрешность обработки, определяемая разностью отжимов при нулевой и полной номинальной толщине срезаемого слоя. Одновременно происходит переход от одного установившегося состояния к другому установившемуся состоянию.

Продолжительность этого переходного процесса превышает время между проходами. Изменение силы резания в переходном процессе описывается экспонентой. Действительная толщина срезаемого слоя изменяется по этому же закону.

Для автоматизации процесса шлифования необходимо непрерывно контролировать толщину срезаемого слоя и тем самым проводить оценку размера изделия.

В работах [3; 4] описаны методы автоматизации шлифования, в основе которых лежит контроль за постоянной времени переходных процессов. Получение заданного размера осуществляется на этапе выхаживания. Процесс выхаживания осуществляется при выключенной подаче. За время переходного процесса ликвидируется накопленная погрешность размера из-за деформации и тем самым обеспечивается геометрическая точность изделия.

Эти способы автоматизации неприемлемы для обработки хрупких изделий, так как процесс выхаживания длителен. Поэтому автоматизацию процесса обработки кристаллов целесообразно осуществлять при врезании.

По проведенному анализу литературных данных можно сделать следующие выводы:

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Toh, S.B. Fine Scale Abrasive Wear of Ceramic by a Plastic Cutting Process, Science of Hard Materials / S.B. Toh, R. McPherson // Inst. Phys. Conf. Serf. - Adam Hilder, Ltd., Rhodes, 1986. - № 75. - Chap. 9. - P. 865-871.
2. Кудинов, В.А. Динамика станков / В.А. Кудинов. - М.: Машиностроение, 1967.
3. Коншин, А.С. Управление процессом шлифования для повышения производительности и точности при одновременной многоинструментальной обработке: автореф. дис. ... канд. техн. наук / А.С. Коншин. - М., 1987.

1. Toh, S.B. Fine Scale Abrasive Wear of Ceramic by a Plastic Cutting Process, Science of Hard Materials / S.B. Toh, R. McPherson // Inst. Phys. Conf. Serf. - Adam Hilder, Ltd., Rhodes, 1986. - № 75. - Chap. 9. - P. 865-871.
2. Kudinov, V.A. *Machines Dynamics* / V.A. Kudinov.

1. Шлифование в режиме пластичности - недавно разработанный способ механической обработки. Обладающая достаточной жесткостью и высокой точностью шлифовальная установка, обеспечивающая исключительно малый съем материала, позволяет создать условия шлифования хрупких материалов в режиме пластичности. В результате заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме; при этом обеспечивается чистота обработки поверхности, ранее достижимая только в нерегулируемых процессах, осуществляемых в режиме пластичности, таких как полирование и притирка.

2. Шлифования в режиме пластичности можно достичь, если обеспечить жесткость конструкции шлифовальной установки, регулирование поперечной подачи в режиме реального времени, относительную изоляцию от внешних возмущений и современную технологию правки шлифовального круга.

3. Если глубина резания достаточно мала, все хрупкие материалы могут обрабатываться в режиме пластического течения, а не хрупкого разрушения.

4. Существует корреляция между поперечной подачей, соответствующей хрупко-пластическому переходу для данного материала, и его свойствами. Эта корреляция хорошо описывается простым степенным законом.

4. Михелькевич, В.Н. Автоматическое управление шлифованием / В.Н. Михелькевич. - М.: Машиностроение, 1975. - 304 с.

- М.: Mechanical Engineering, 1967.
3. Konshin, A.S. *Grinding Control for Productivity and Accuracy Increase at Simultaneous Multi-instrumental Machining*: thesis self-abstract for Can. Eng. degree competition / A.S. Konshin. - М.: 1987.

4. Mikhelkevich, V.N. *Automatic Control of Grinding*  
/ V.N. Mikhelkevich. – М.: mechanical Engineering,

1975. – pp. 304.

*Статья поступила в редколлегию 5.01.18.*

*Рецензент: д.т.н., профессор  
Дмитрак Ю.В.*

**Сведения об авторах:**

**Сильченко Ольга Борисовна**, д.т.н., профессор  
Московского авиационного института,  
e-mail: [lyaolya@yandex.ru](mailto:lyaolya@yandex.ru).

**Silchenko Olga Borisovna**, D. Eng., Prof. of Moscow  
Aircraft, e-mail: [silyaolya@yandex.ru](mailto:silyaolya@yandex.ru).