

Управления процессом ультразвуковой размерной обработкой хрупких и твердых материалов.

Хмелев В.Н., Барсуков Р.В., Цыганок С.Н., Сливин А.Н.
Бийский технологический институт

Современная промышленность широко использует материалы с высокой хрупкостью, такие, как германий, кремний, ферриты, керамика, стекло, кварц, полудрагоценные и поделочные минералы. Обработка их весьма затруднена, поскольку они не выдерживают усилий, возникающих при традиционной механической обработке.

Поэтому обработку хрупких материалов, настоящее время, осуществляют на режущих станках с большой частотой вращения при помощи алмазосодержащих рабочих инструментов.

Такой технологический прием имеет ряд существенных недостатков:

- появление внутренних напряжений в обрабатываемом материале при выполнении отверстий, что приводит к изменению его качественных характеристик (например, при последующей термической обработке стекла могут возникнуть трещины в зоне выполнения отверстия);

- высокая энергоемкость процесса (затраты электрической энергии на съем единицы объема обрабатываемого материала превышают 2000 Дж/мм³);

- низкая производительность алмазного сверления (менее 0,5 мм/мин) при выполнении отверстий диаметром до 25 мм;

- высокая стоимость рабочих режущих инструментов.

В настоящее время все большее применение для обработки хрупких и твердых материалов находят ультразвуковые колебания высокой интенсивности. Технологически метод заключается в придаче рабочему инструменту ультразвуковых колебаний и ввод колебаний в обрабатываемое изделие через частицы абразивной суспензии.

Такой метод позволяет свести к минимуму описанные выше недостатки алмазной обработки материалов. Качество обработки определяется твердостью и размером абразивных частиц [1].

При реализации алмазной обработки передача УЗ колебаний от преобразователя в обрабатываемые материалы осуществляется с помощью рабочих инструментов. Форма и размеры рабочих инструментов определяют решаемую задачу (выполнение глухих или сквозных отверстий, пазов, отверстий сложной формы, выполнение рисунка на обрабатываемом материале и т.п.).

Для УЗ станков рабочие инструменты выполняются в виде отдельных элементов ультразвуковой колебательной системы (УЗКС) и соединяются с ее торцевой поверхностью посредством резьбового соединения. Для большей универсальности предлагаемого оборудования необходимо использовать значительно количество рабочих инструментов, отличающихся формой, размером, толщиной стенок и т.п.

Известно, что максимальная производительность обработки обеспечивается на собственной резонансной частоте УЗКС, поэтому необходимо обеспечить соответствие частоты электрического генератора с резонансной частотой УЗКС с каждым рабочим инструментом.

Существуют два, наиболее широко используемых, способа обеспечения оптимального режима обработки [2]:

1. Использование различных рабочих инструментов с одной колебательной системой и перестройка рабочей частоты электронного генератора в соответствии с изменениями собственной частоты механических колебаний колебательной системы.

2. Применение множества колебательных систем, выполненных таким образом, что в комплекте с различными рабочими инструментами все они имеют одинаковые собственные частоты и электронный генератор при выполнении различных по размерам отверстий не перестраивается.

Каждый способ имеет свои недостатки. В первом способе необходимо обеспечить перестройку генератора в широком диапазоне. Это требует сложных схем генерации и согласования генератора с колебательной системой и на практике практически не реализуемо. Во втором способе необходимо решить технологическую проблему изготовления различных по форме и размерам инструментов на одну резонансную частоту в сочетании с колебательной системой.

Но даже практическое решение перечисленных задач не позволяет обеспечить одинаковую производительность процесса ультразвуковой обработки.

Поясним, почему это происходит. Известно, что при ультразвуковой обработке твердых и хрупких материалов максимальная производительность достигается при интенсивности ультразвуковых колебаний в пределах от 2 до 5 Вт/мм². При интенсивности ультразвуковых колебаний менее 2 Вт/мм² производительность сверления незначительно превышает производительность традиционного сверления вращающимся алмазным инструментом, и применение ультразвуковых станков теряет смысл. При увеличении интенсивности ультразвуковых колебаний более 5 Вт/мм² не происходит роста производительности сверления из-за распыления значительной части абразивной суспензии поверхностью колеблющегося рабочего инструмента. Кроме того, при интенсивности ультразвуковых колебаний выше 5 Вт/мм² происходит очень быстрый износ рабочего инструмента.

В ультразвуковом станке, который способен обеспечить выполнение отверстий диаметром, например, от 5 до 25 мм, используются рабочие инструменты в виде полых трубок необходимого диаметра, имеющие стенки толщиной 0,5...1 мм. Площадь торцевой рабочей поверхности таких рабочих инструментов (при толщине стенки в 1 мм) изменяется от 12,5 мм² до 75,5 мм² (в шесть раз). Следовательно, при подведении к колебательной системе от генератора постоянной энергии, интенсивность ультразвуковых колебаний, вводимых в обрабатываемый материал с помощью различных по диаметру инструментов, будет отличаться в 6 раз.

Для обеспечения приемлемой производительности сверления отверстий диаметром 25 мм (интенсивность ультразвукового воздействия 2 Вт/мм²) необходимо подводить к колебательной системе мощность не менее 150 Вт (при КПД, близком к 100%). При этом самый маленький из рабочих инструментов обеспечит интенсивность ультразвукового воздействия - 12 Вт/см². Очевидно, что в этом случае произойдет разрушение рабочего инструмента или абразивная суспензия не будет достигать торца колеблющегося инструмента из-за её интенсивного распыления.

Если же обеспечить на малом рабочем инструменте максимальную предельно допустимую интенсивность 5 Вт/мм² (т.е. подвести к колебательной системе мощность не более 60 Вт), то интенсивность ультразвукового воздействия с большого инструмента будет менее 1 Вт/мм² и, следовательно, производительность сверления будет ниже допустимого предела, а применение ультразвукового станка для сверления отверстия с такой производительностью не будет иметь смысла. Приемлемая производительность выполнения отверстий (при минимальной интенсивности 2 Вт/мм²) будет обеспечена только при использовании рабочего инструмента диаметром 13 мм.

Таким образом, используемый в настоящее время способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки имеет следующие недостатки:

1. Ограниченные функциональные возможности, что не позволяет осуществлять выполнение отверстий необходимого диапазона.
2. Различную производительность процесса, в пределах ограниченного диапазона выполняемых отверстий.

Для решения этих проблем необходимо обеспечить возможность эффективной работы ультразвукового станка при выполнении отверстий необходимого максимального диаметра.

При использовании инструментов меньшего диаметра необходимо обеспечивать соответствующее автоматическое уменьшение подводимой к колебательной системе от генератора электрической мощности, т.е. кроме обеспечения соответствия между частотой генера-

тора и УЗКС, необходимо стабилизировать амплитуду колебаний рабочего инструмента. К сожалению, вопрос стабилизации амплитуды механических колебаний разработан слабо и в настоящее время практически не выпускается ультразвуковых станков, в которых использовались бы устройства, обеспечивающие автоматическую регулировку амплитуды механических колебаний в зависимости от нагрузки.

Для решения имеющейся проблемы и повышения эффективности малогабаритных ультразвуковых станков с ручным рабочим инструментом предложен и разработан способ обеспечения одинаковой производительности сверления отверстий различного диаметра с использованием рабочих инструментов, обеспечивающих разные собственные рабочие частоты механического резонанса всей колебательной системы с каждым из применяемых инструментов [3].

На рисунках 1 и 2 схематично показаны: схема включения колебательной системы с помощью корректирующего фильтра (рис. 1) и распределение электрических напряжений, возбуждающих колебательную систему с различными по размеру диаметра рабочими инструментами (рис.2.).

Согласование генератора электрических колебаний с ультразвуковой колебательной системой осуществляется с помощью корректирующего фильтра. Фильтр, представляющий собой резонансный электрический колебательный контур, настроен на рабочую частоту колебательной системы с максимальным диаметром рабочего инструмента.

В качестве корректирующего фильтра используется цепь из реактивных элементов. На рисунке 1 показана схема включения ультразвуковой колебательной системы с активными пьезоэлектрическими элементами с помощью корректирующего фильтра.

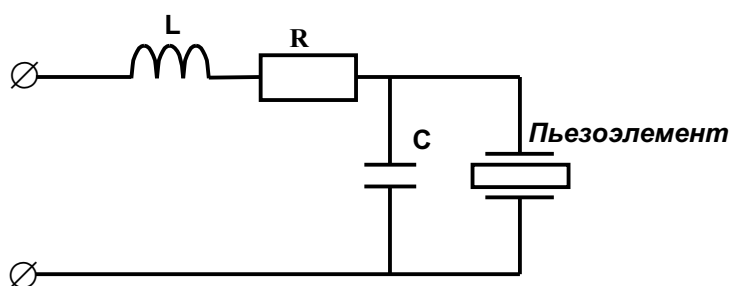


Рисунок 1. Схема включения колебательной системы.

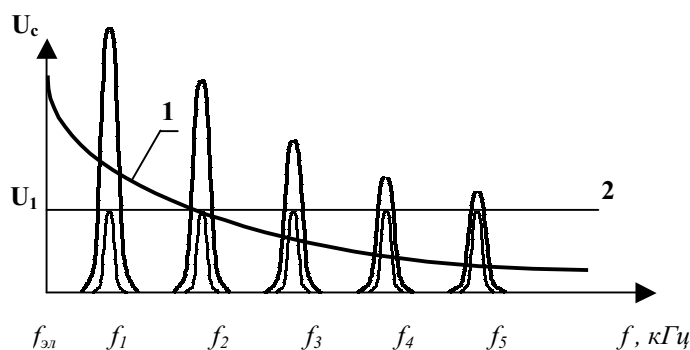


Рисунок 2. Распределение электрических напряжений.

В такой схеме включения корректирующий фильтр образуется собственной электрической емкостью пьезоэлементов C и индуктивностью дросселя L . Электрическое соединение собственной емкости пьезоэлементов C и активного сопротивления потерь R совместно с индуктивностью L дросселя обеспечивает электрический резонанс на частоте близкой к собственной частоте УЗКС. Амплитудно-частотная характеристика электрического колебательного контура, соединяющего генератор электрических колебаний и ультразвуковую колеба-

тельную систему, показана кривой 1 на рисунке 2. Из рисунка 2. следует, что $f_{эл}$ соответствует резонансной частоте электрического колебательного контура и на нем возникает некоторое электрическое напряжение U_c .

Ультразвуковая колебательная система с каждым из используемых рабочих инструментов обладает собственной резонансной частотой механического резонанса.

В качестве примера рассмотрим ультразвуковую колебательную систему с пятью различными рабочими инструментами (для выполнения отверстий диаметрами 25, 20, 15, 10, и 5 мм), характеризуемых собственными частотами механического резонанса 22,2; 22,5; 23,0; 23,5; 24,5 кГц, соответственно. При отсутствии корректирующего фильтра, представляющего собой электрический колебательный контур и совпадении электрической частоты генератора с собственной частотой механических колебаний каждого из рабочих инструментов на колебательные системы будут подаваться одинаковые электрические напряжения U_1 (рисунок 2) и все рабочие инструменты будут обеспечивать ввод в обрабатываемые объекты ультразвуковых колебаний равной мощности. При наличии согласующего электрического колебательного контура, характеризуемого наличием собственной амплитудно-частотной характеристики (схематично показанной на рисунке 2 кривой 1) и рабочих инструментов, обеспечивающих различные собственные частоты механических резонансов колебательных систем, возбуждение колебательных систем будет происходить различными электрическими напряжениями. На рисунке 2 показано, что низкочастотные колебательные системы с большими по диаметру рабочих органов будут возбуждаться большими электрическими напряжениями.

Таким образом, выполнение рабочих инструментов с большей рабочей поверхностью (например, 75,5 мм²) низкочастотными, а рабочих инструментов с меньшей рабочей поверхностью (до 12,5 мм²) более высокочастотными, обеспечивает их возбуждение различными электрическими напряжениями и позволяет получить равные амплитуды колебаний (или интенсивности) всех рабочих инструментов. Обеспечение равных интенсивностей обеспечивает равную производительность и энергоемкость процесса ультразвуковой обработки хрупких твердых материалов.

Следует отметить, что симметричность амплитудно-частотной характеристики электрического колебательного контура позволяет выполнять большие по диаметру рабочие инструменты более высокочастотными (приближая их рабочую частоту к резонансной частоте электрического колебательного контура), а меньшие по диаметру рабочие инструменты выполнять все более низкочастотными по мере уменьшения их диаметра. Однако такой путь менее практичен, так как большие по диаметру и, следовательно, по массе рабочие инструменты легче выполнить более низкочастотными, чем меньшие по диаметру и более легкие инструменты.

Для установления зависимости между площадью рабочей поверхности инструмента и собственной рабочей частотой ультразвуковой колебательной системы, рассмотрим работу корректирующего фильтра. Он представляет собой последовательный резонансный электрический колебательный контур. Контур состоит из последовательно включенных активного сопротивления собственных потерь R , индуктивности дросселя L и электрической емкости пьезоэлектрических элементов C . Параметры контура на практике легко измеряются по известным методикам.

Электрическое напряжение U_c на определится как:

$$U_c = U_1 \frac{2\omega L - 1/\omega C}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

Это напряжение воздействует на пьезоэлектрические элементы и обеспечивает преобразование энергии электрических колебаний в энергию механических колебаний колебательной системы.

Мощность акустических колебаний P определяется электрическим напряжением, действующим на пьезоэлектрические элементы. Это электрическое напряжение соответствует U_c и, соответственно, акустическая мощность равна:

$$P = kU_c^2$$

Коэффициент k – является постоянной величиной конкретной УЗКС.

Мощность акустических колебаний P , формируемых колебательной системой определяет интенсивность ультразвуковых колебаний I , необходимых для обеспечения процесса размерной обработки с помощью рабочего инструмента, имеющего площадь рабочей поверхности S :

$$P = IS = kU_c^2$$

И тогда $U_c = \sqrt{\frac{IS}{k}}$

Приравняв имеющиеся выражения для U_c , получим следующее соотношение

$$\sqrt{\frac{IS}{k}} = U_1 \frac{2\omega L - 1/\omega C}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}}$$

Решение полученного биквадратного уравнения относительно ω позволяет получить следующую аналитическую зависимость между рабочей частотой ультразвуковой колебательной системы и площадью рабочей поверхности используемого инструмента:

$$\omega = \sqrt{\frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}},$$

где $a = L^2 C^2 (AS - 4U_1^2)$,

$$b = AS(C^2 R^2 - 2LC) + 4LCU_1^2,$$

$$c = AS - U_1^2,$$

$$A = \frac{I}{k}.$$

Таким образом, полученное аналитическое выражение позволяет определить рабочую частоту колебательной системы по заданной площади рабочего инструмента.

Заключение

На основе предложенной методики были проведены расчеты частоты рабочих инструментов колебательной системы, которая питается генератором электрических колебаний с частотой 22 КГц. Внешний (рабочий) диаметр рабочего инструмента в расчетах принимался различным от 3 до 25 мм, и ставилось условие обеспечения интенсивности ультразвукового поля на излучающей поверхности рабочего органа равной 5 Вт/см². Толщина стенки рабоче-

го инструмента цилиндрической формы для обеспечения заданной интенсивности варьировалась от 0,5 до 1 мм.

Выбор рабочих частот ультразвуковых колебательных систем, имеющих рабочие инструменты различного диаметра, по разработанной методике расчета, и практическое изготовление различных инструментов в соответствии с требуемыми частотными характеристиками, позволили обеспечить равную (и близкую к оптимальной) производительность процесса ультразвукового сверления различных по диаметру отверстий. в стекле толщиной до 10 мм

Кроме обеспечения равной производительности и энергоемкости, предложенный способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки позволил расширить функциональные возможности ультразвуковой размерной обработки за счет резонансного повышения амплитуды электрического напряжения, воздействующего на колебательную систему с максимальным по размеру выполняемых отверстий рабочим инструментом,. Практически это позволило выполнять отверстия диаметром до 25 мм с помощью ультразвукового генератора, позволявшего ранее выполнять отверстия диаметром не более 13...15 мм.

Предложенный способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки и разработанная методика использования одной колебательной системы с различными по размерам рабочими инструментами нашла практическое применение в изготавливаемых Бийским технологическим институтом ультразвуковых станках.

Литература

1. Хмелев В.Н., Шутов В.В., Перспективы совершенствования и применения технологии ультразвуковой обработки хрупких твердых материалов. Материалы 4 международной конференции “Измерение, контроль и автоматизация производственных процессов” (“ИКАПП - 97”), 1997 г., г. Барнаул, Т. 2 с. 145 - 147 .
2. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В.Цыганок С.Н. Ультразвуковая размерная обработка материалов, Барнаул: АлтГТУ, 1999, 123 с
3. Хмелев В.Н., Барсуков Р.В.Цыганок С.Н.Способ управления процессом ультразвуковой размерной обработки Патент РФ №2131794, 1999.