УДК 621.833.002

DOI: 10.35211/1990-5297-2020-3-238-9-11

*С. И. Агапов, А. А. Потапов, Н. С. Панин, К. А. Киракосян***ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВНЫХ КОНЦЕНТРАТОРОВ
ДЛЯ ПЬЕЗОКЕРАМИЧЕСКИХ УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ГОЛОВОК****Волгоградский государственный технический университет**

E-mail: techmash@vstu.ru

Рассматриваются вопросы проектирования составных концентраторов для пьезокерамических ультразвуковых головок с учетом законов стержневой системы.

Ключевые слова: составные концентраторы, ультразвуковые колебания.

*S. I. Agapov, A. A. Potapov, N. S. Panin, K. A. Kirakosyan***DESIGN OF COMPOSITE CONCENTRATORS FOR
PIEZOCERAMIC ULTRASONIC HEADS****Volgograd State Technical University**

The problems of designing composite concentrators for piezoceramic ultrasonic heads taking into account the laws of the rod system are considered.

Keywords: compound concentrators, ultrasonic vibrations.

В настоящее время промышленность все больше нуждается в высокоточном оборудовании, обеспечивающем изготовление прецизионных деталей. Одной из важнейших проблем является обработка заготовок с введением ультразвуковых колебаний в зону резания. Для решения этой задачи необходимо определить характеристики ультразвуковой колебательной системы [1].

Для аналитического определения колебаний в зоне резания необходимо выяснить распределение их по длине системы с бесконечным числом степеней свободы. Ультразвуковые колебания в зоне резания можно возбуждать по двум каналам через режущий инструмент или через обрабатываемую деталь. Во всех случаях колебательные системы имеют длину на порядок большую, чем диаметр поперечного сечения. Тогда колебания в ней подчиняются законам стержневой системы.

Для дальнейших исследований сделаем следующие допущения:

1. Колебания чисто гармонические, т. е. все рассуждения ведутся для интегральной оценки колебаний.

2. Центры тяжести поперечных сечений этой системы в равновесном состоянии лежат на одной прямой. Это условие почти всегда выполняется, так как при обработке режущим инструментом колебательная система и обрабатываемая деталь в большинстве случаев не симметричны относительно оси. В процессе резания возможно искажение плоскостей, перпендику-

лярных оси инструмента. Эти искажения не вносят существенных изменений в исследуемые процессы. Во-первых, при чисто гармонических колебаниях должен действовать принцип суперпозиции, при этом статические деформации не могут вносить искажений в распределение колебаний. Во-вторых, колебания, вызванные реакцией от процесса резания, не могут возникнуть с частотой, равной частоте возбуждения в силу явления вибрационной линеаризации.

3. Поперечные сечения стержня при деформациях, вызванных ультразвуковыми колебаниями, остаются плоскими. Это допущение в нашем случае всегда выполнимо, так как длина поперечных волн на порядок больше диаметра поперечного сечения стержня колебательной системы. Деформации, вызванные процессом резания, в силу принципа суперпозиции не влияют на колебания.

4. Масса колебательной системы, жесткость и ее податливость являются непрерывными. Это положение охватывает практически все возможные функции изменения механических характеристик колебательной системы по оси.

5. Механические характеристики материала полагаем во-первых независимыми от амплитуды смещений и напряжений системы. Во-вторых механические характеристики материала преобразуются при изменении интенсивности ультразвуковых колебаний. Изменения механических характеристик материала при изменении интенсивности ультразвуковых колебаний не учитываются.

6. Смещения точек оси или соответствующих этим точкам поперечных сечений от действия внешних нагрузок однозначно определяются значениями одной функции (это допущение полагает, в частности, отсутствие гистерезиса и других нелинейных связей, определяющих неоднозначную зависимость перемещения от возмущающего воздействия).

7. Предполагается, что силы магнитострикции линейные равномерно распределены по вибратору (работа ведется на линейном участке магнитострикционной характеристики вибратора, и деформации не доходят до насыщения).

8. Потери акустической энергии в местах крепления вибрационной системы к корпусу приспособления пренебрегаем, т. е. сосредоточенные нагрузки считаем на порядок меньшими, чем потери в других элементах системы.

9. Температурное поле инструмента будем считать установившимся, т. е. время при определении температурного поля инструмента можно считать параметром. Это возможно лишь при том условии, когда изменение физикомеханических констант по оси системы не выходит за определенный класс функций, определяемых уравнением Вебстера.

10. Сопряжение отдельных элементов колебательной системы определяется условием равенства напряжений и смещений в координатах сопряжения.

Для проведения исследований была спроектирована ультразвуковая пьезокерамическая головка для развертывания отверстий в деталях из нержавеющей стали и титановых сплавов. Использование легких и компактных ультразвуковых головок особенно эффективно, так как не требует модернизации станка и остановки производства.

На рис. 1 показан общий вид ультразвуковой головки, которая состоит из следующих узлов: колебательной системы и корпуса.

Рис. 1. Ультразвуковые головки для развертывания на токарных станках

Колебательная система представляет собой многослойный излучатель или пакет Ланжевена. Он состоит из двух металлических накладок, одна из которых является частотопонижающей (изготовлена из ст. 3 и расположена в корпусе), а другая является излучающей (из стали У8, закаленной до HRC 44-46), в которую устанавливается режущий инструмент.

При выполнении операций, связанных с ультразвуковой обработкой отверстий в деталях из труднообрабатываемых материалов, требуется передача интенсивного ультразвукового воздействия от пьезокерамических преобразователей к режущему инструменту. Это осуществляется с помощью ультразвуковых концентраторов. Значительный практический интерес представляют составные концентраторы, образованные соединением стержней постоянного и переменного сечений, поэтому необходимо рассчитать геометрические размеры экспоненциального концентратора.

Резонансная длина экспоненциального концентратора в точности равна целому числу полувольт (с учетом дисперсии в рупорах) [2]. В качестве исходных данных для расчета можно

использовать величины λ и $N = \frac{D_1}{D_2}$, где λ – длина волны в материале концентратора; N – коэффициент усиления; D_1 – диаметр концентратора, присоединенный к пьезокерамическому преобразователю; D_2 – диаметр свободной части концентратора; n – целое число полувольт.

Схема расчета концентратора приведена на рис. 2.

Рис. 2. Схема расчета концентратора

Длина экспоненциального рупора

$$l = \frac{\lambda}{2} \cdot n = \frac{\lambda}{2} \sqrt{\frac{(n\pi)^2 + \ln^2 N}{\pi^2}}$$

Увеличение коэффициента усиления ведет к росту скорости изменения входного сопротивления с частотой и уменьшает рабочую по-

лосу частот, а также увеличивает величину расстройки системы. Исходя из конструктивных особенностей ультразвуковой головки, принимаем: $D_1 = 44$ мм, $D_2 = 24$ мм, $n = 1$, материал волновода сталь 40Х (закаленная до HRC 44–46), резонансная частота возбуждения пьезокерамики 18 кГц, тогда:

$$\lambda = \frac{c}{f_p},$$

где c – скорость звука в материале волновода, м/с; f_p – резонансная частота возбуждения пьезокерамики, кГц;

$$\lambda = \frac{5170}{18,0} = 288 \text{ м/с},$$

$$l = \frac{288}{2} \sqrt{\frac{(1 \cdot 3,14)^2 + \ln^2 \frac{44}{24}}{3,14^2}}.$$

Исходя из способа закрепления инструмента, принимаем $l_1 = 71$ мм. В работе [3] дана номограмма и расчетные формулы для определения длины переходного стержня и диаметра контрольного сечения переходного экспоненциального участка. С помощью номограмм определяем: $l_2 = 72$ мм, $l_3 = 10$ мм и $D_z = 27$ мм при $z = 5$ мм.

Хорошими акустическими свойствами обладают закаленные стали, термообработка стали (закалка с низким отпускком) позволяет в 2 раза снизить потери. При увеличении амплитуды знакопеременных напряжений и температуры потери возрастают.

Эффективность работы ультразвуковой колебательной системы зависит от метода крепления и качества акустического контакта при соединении режущего инструмента и концентратора, т.к. при недостаточно полном акустическом контакте происходит интенсивный нагрев зоны крепления вследствие потерь энергии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Агапов, С. И. Повышение эффективности механической обработки путем применения ультразвука : монография / С. И. Агапов, В. В. Головкин. – Самара : Изд-во СНЦ, 2010. – 134 с.
2. Приходько, В. М. Научные технологии в машиностроении с применением ультразвука / В. М. Приходько, В. Ф. Казанцев // Научные технологии в машиностроении. – 2011. – № 1. – С. 29–37.
3. Теумин, И. И. О расчете резонансных частот ступенчатого концентратора / И. И. Теумин // Акустический журнал. – 1963. – Т. 1.