

# РАСЧЕТ АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК УЛЬТРАЗВУКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПРОДОЛЬНЫХ И ПРОДОЛЬНО-КРУТИЛЬНЫХ КОЛЕБАНИЙ С ПОМОЩЬЮ ПАКЕТА ABAQUS

Лавриненков А. Д., ассистент

НТУУ «КПИ», г. Киев, Украина

## Введение

В абсолютном большинстве работ по применению ультразвука в технологических процессах используются волновые,  $1/2$  - волновые и  $3/2$  - волновые преобразователи ультразвуковых колебаний с поперечным сечением в виде круга и с концентраторами ультразвуковых колебаний ступенчатой, экспоненциальной, конической и других форм.

Для расчета ультразвуковых преобразователей, как простой, так и сложной геометрии для получения крутильных колебаний используется метод конечных элементов.

## Постановка задачи

Для исследования использовался  $1/2$  - волновой пьезоэлектрический преобразователь продольных колебаний (рис. 1) рассчитанный аналитическим способом.

При повышенных скоростях обработки (свыше 20 м/мин) на поверхности детали из титановых сплавов появляются надрывы, что может привести к формированию микротрещин на поверхности и в приповерхностном слое детали при дальнейшей эксплуатации.

В связи с этим возникает вопрос о наложении на инструмент комплексных ультразвуковых колебаний, как например, продольно-крутильных, для уменьшения адгезионных сил трения, которые ограничивают применение процесса для упрочнения титановых сплавов.

**Целью работы** являлся расчет волнового преобразователя с концентратора продольно-крутильных колебаний на базе  $1/2$ -волнового преобразователя продольных колебаний методом конечных элементов (КЭ) в среде пакета Abaqus.

Было проведено моделирование  $1/2$ -волнового преобразователя продольных колебаний (рис.1) по схеме, представленной на рис. 2.

Преобразователь колебаний состоит из ступенчатого концентратора 1, материалом которого является сталь 30ХГСА, двух пьезоэлектрических колец 2 из пьезокерамики РСМ-41, накладки 3 из стали 40Х13, все детали стягиваются в один пакте с помощью шпильки 4 и гайки 5 из стали 40Х.



Рис. 1.  $1/2$ -волновой преобразователь продольных колебаний

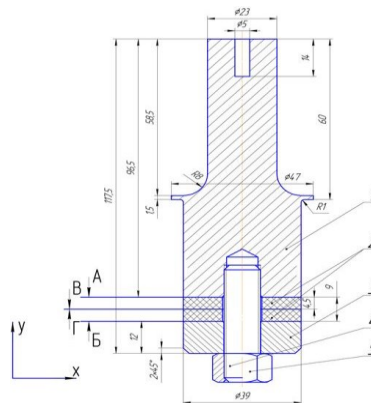


Рис. 2. Расчетная схема  $1/2$ -волнового преобразователя продольных колебаний:

1 - концентратор продольных колебаний, 2-пьезоэлектрические кольца, 3 - накладка, 4 – шпилька, 5 – гайка; А, Б, В, Г – поверхности приложения электрического потенциала

Преобразователь моделировался в осесимметричной и объемной постановке, с дальнейшим сравнением полученных амплитудно-частотных характеристик с характеристиками реального преобразователя. При моделировании между всеми деталями волновода задавалась связь, моделирующая акустический контакт. К поверхностям А, Б, В и Г прикладывался электрический потенциал.

Свойства металлических деталей преобразователя задавались коэффициентом Пуассона, модулем Юнга, также задавалась плотность материала.

Пьезокерамика РСМ-1 характеризуется диэлектрическими, механическими и пьезоэлектрическими свойствами.

Направление поляризации пьезокерамических колец соответствовало оси Y.

Расчет состоит из двух анализов:

1) частотного анализа, который позволяет определять собственные частоты, формы и тона колебаний преобразователя. В качестве решателя частотного анализа был выбран решатель Lanczos. На всех 4-х поверхностях пьезокерамических колец действует нулевое напряжение.

2) совместный пьезоэлектрический анализ и отклик системы на гармоническое возбуждение, который позволяет определять амплитуды колебаний и напряжения в теле преобразователя.

В реальности между всеми деталями преобразователя существует акустический контакт, обеспечивающий прохождение ультразвуковой волны по всей длине преобразователя и гарантирующий стягиванием всех деталей в пакет болтом. Для моделирования акустического контакта между деталями преобразователя использовался коннектор Tie.

Типом конечного элемента для металлических деталей осесимметричной модели был выбран 4-х узловой билинейный осесимметричный четырехсторонний элемент CAX4R, пьезоэлектрических дисков - 4-х узловой билинейный осесимметричный пьезоэлектрический четырехсторонний элемент CAX4E. Типом конечного элемента для металлических деталей объемной модели был выбран 10-ти узловой тетраэдр C3D10, для пьезоэлектрических дисков - 10-ти узловой тетраэдр C3D10E.

Замер амплитуды продольных колебаний производился бесконтактным емкостным виброметром БМ1-1. Замер амплитуды крутильных колебаний свободного торца концентратора продольно-крутильных колебаний производился оптическим методом с помощью лазерного луча, направленного на зеркальце, которое было закреплено на цилиндрической поверхности концентратора у кромки торца. Для замера собственных частот использовался генератор сигналов ГЗ-33.

В месте перехода со ступени большего диаметра на ступень меньшего диаметра концентратора преобразователя действуют максимальные интенсивности напряжений величиной 175 – 195 МПа (рис. 3а, рис. 4а). Максимальная амплитуда колебаний соответствует рабочему торцу концентратора и составляет в среднем 27-30 мкм (рис. 3б, рис. 4б).

Задачей конечно-элементного моделирования является подбор длины концентратора продольно-крутильных колебаний, при которой место крепления волнового преобразователя в корпусе по фланцу концентратора продольных колебаний будет характеризоваться минимальными амплитудами продольных и крутильных колебаний, а свободный торец концентратора продольно-крутильных колебаний будет характеризоваться максимальными амплитудами продольных и крутильных колебаний. В таблице 1 занесены результаты измерений.

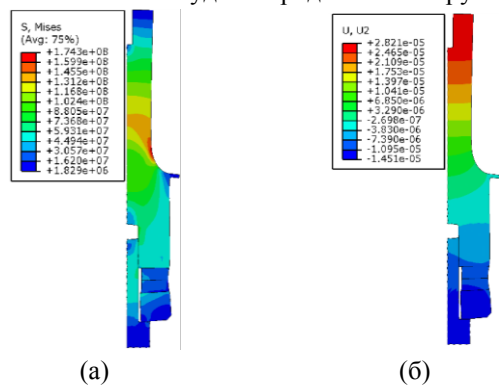


Рис. 3. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу (а) и полуамплитуды продольных колебаний (б) осесимметричной модели

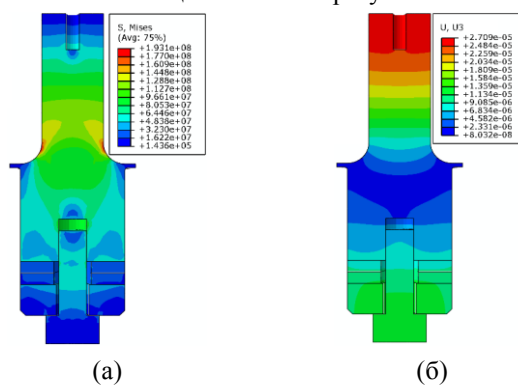


Рис. 4. Распределение интенсивности напряжений по Мизесу (а) и полуамплитуды продольных колебаний (б) объемной модели

Таблица 1

Параметр	Осесимметричная м-ль	Объемная м-ль	Реальный волновод
Частота, Гц	21463	21444	21000
Амплитуда, мкм	28	27	43

Для симметрии поперечного сечения концентратор продольно-крутильных колебаний имеет две винтовые канавки глубиной – 5 мм, шириной – 4 мм и с углом наклона – 45°.

Уменьшение длины преобразователя с концентратором продольно-крутильных колебаний по сравнению с волновым преобразователем продольных колебаний составила 14,5 мм.

Упругие деформации преобразователя представлены на рис. 5. Максимальные интенсивности напряжений соответствует углублениям винтовых канавок, в отличие от 1/2 волнового преобразователя, у которого максимальные напряжения соответствует месту перехода со ступени большего диаметра на ступень меньшего

диаметра концентратора (рис. 6). По размерам, полученным в результате расчета, был изготовлен концентратор продольно-крутильных колебаний (рис. 7), с помощью шпильки соединен с 1/2-волновым преобразователем продольных колебаний.



Рис. 5. Упругая деформация.

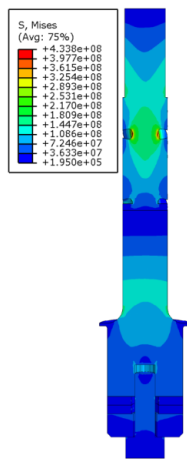


Рис. 6. Распределение интенсивности напряжений



Рис. 7. Концентратор продольно-крутильных колебаний

Частотно–амплитудные характеристики рабочего торца преобразователя, полученные в результате расчета, и реального преобразователя занесены в таблицу 2.

Таблица 2

Параметр	КЭ модель	Реальный волновод
Частота, Гц	22191	21900
Амплитуда продольных кол-й, мкм	23	34
Амплитуда крутильных кол-й, мкм	15	10-11

## Выводы

Использование осесимметричной модели при моделировании преобразователя значительно сокращает время расчета без потери точности определения амплитудно-частотных характеристик преобразователя в сравнении с объемной моделью.

Добавление концентратора продольно-крутильных колебаний с винтовыми канавками к 1/2 – волновому преобразователю приводит к увеличению резонансной частоты и уменьшению резонансной длины продольных колебаний, при которой узел амплитуд колебаний будет располагаться в месте крепления преобразователя в корпусе

Погрешность расчета собственных частот продольных колебаний преобразователя продольно-крутильных колебаний по сравнению с частотами реального преобразователя составила 1,5%.