

Моделирование ультразвуковых технологических систем методом конечных элементов

Рассмотрен вариант моделирования ультразвуковой колебательной системы с помощью программного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS для оптимизации резонансных частот и форм колебаний.

Владимир Ланин,
профессор

vlanin@bsuir.by

Денис Бухалко

bukhalko@gmail.com

Введение

Повышение гибкости современного производства, внедрение интегрированных компьютеризованных производств (Computer Integrated Manufacturing, CIM), основанных на автоматизации жизненного цикла изделия, начиная от разработки и заканчивая эксплуатацией, вызывает необходимость существенного сокращения сроков освоения новых изделий в производстве. Физическое моделирование технологических объектов в лабораторных условиях часто не представляется возможным, так как сопряжено со значительными материальными и денежными затратами. Современные методы компьютерного моделирования позволяют не только эффективно исследовать различные технологические объекты, но и оптимизировать их параметры, сокращая тем самым процесс конструкторско-технологического проектирования и снижая затраты.

Ультразвуковые технологические системы, применяемые в установках микросварки, пайки, очистки, дегазации и др., являются сложными технологическими объектами, состоящими из различного типа преобразователей, волноводных элементов, инструмента и элементов закрепления. Аналитические расчеты таких технологических систем всегда сопряжены со значительной погрешностью, обусловленной большим числом сопрягаемых элементов, неоднородностью свойств материалов, нестабильностью механических связей между элементами и нагрузкой.

Метод конечных элементов получил широкое применение для моделирования сложных технических объектов. В основе метода — возможность разложить любую непрерывную функцию в бесконечный ряд по некоторым базисным функциям [1]. Таким образом, любую функцию $f(x)$ можно представить на отрезке $[a; b]$ в виде:

$$f(x) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \psi_k(x); \quad x \in [a; b], \quad (1)$$

где a_k — константы, зависящие от отрезка, базисных функций и функции $f(x)$.

Аппроксимация заключается в выборе базисных функций и последующим поиске коэффициентов a_k из предположения:

$$f(x) = \sum_{k=0}^K a_k \psi_k(x). \quad (2)$$

Программный комплекс конечно-элементного (МКЭ) анализа ANSYS, разрабатываемый на протяжении 30 лет фирмой ANSYS Inc., — это одно из наиболее известных на рынке инструментальных средств для моделирования различных процессов, проходящих в физических телах [2].

Наиболее практичен в применении ANSYS Workbench, достоинства которого — удобный интерфейс, широкий набор типов конечных элементов, моделей материалов, итерационных «решателей» и наличие международного сертификата качества ISO 9001. В ANSYS имеется развитый встроенный алгоритмический язык программирования APDL (ANSYS Parametric Design Language), позволяющий автоматизировать трудоемкие процедуры моделирования. С каждой новой версией ANSYS функциональные возможности APDL интенсивно расширяются, достигнув сегодня уровня, позволяющего эффективно автоматизировать практически весь процесс численного прочностного анализа технологических систем.

Процесс моделирования в этом комплексе можно представить в виде такой последовательности:

- Построение или импорт геометрической модели.
- Задание свойств материалов.
- Выбор условий закрепления объекта.
- Задание параметров конечно-элементной сетки.
- Задание вида анализа и его параметров.
- Анализ полученных результатов и выводы.

Построение геометрической модели

Геометрическая модель прежде всего предназначена для последующего создания на ее основе расчетной модели (сетки конечных элементов). Для построения геометрической модели исследуемого объекта в системе Workbench имеется встроенный



Рис. 1. УЗ колебательная система микросварки:
1 — силовой блок; 2 — держатель;
3 — волновод; 4 — капилляр

модуль Design Modeler. Для работы с геометрической моделью применяются объектно-ориентированные средства управления. Этапы построения такой модели имеют древовидную структуру. Процесс создания модели происходит по принципу снизу вверх. При этом способе создания модели вначале создаются точки, затем на их основе линии, а после — поверхности и объемы. Помимо встроенного редактора есть возможность импорта модели из различных CAD-систем (Autodesk Inventor, Pro Engineer, Unigraphics, Solid Works и др.).

В качестве примера рассмотрим вариант импорта из *Autodesk Inventor* модели ультразвуковой (УЗ) колебательной системы для последующей оптимизации резонансных частот и форм колебаний. Модель УЗ колебательной системы микросварки включает следующие элементы [3]:

- Силовой блок, состоящий из предварительно стянутых пьезоэлектрических колец, расположенных между алюминиевой и стальной накладкой.
- Концентратор, присоединенный к силовой сборке и служащий для передачи энергии в нагрузку. Форма этой части должна обеспечивать усиление амплитуды УЗ-колебаний.
- Сварочный инструмент-капилляр, зафиксированный в конце концентратора, нужен для полноты модели.
- Держатель, используемый для крепления системы.

Для импорта модели необходимо, чтобы в комплексе был установлен модуль импорта из данной среды. Затем достаточно импортировать уже готовую модель в проект (рис. 2).

Задание свойств материалов

Кроме информации о механических свойствах материалов, имеющейся в компании ANSYS, есть еще сведения других организаций о свойствах и поведении различных материалов. Для увеличения своей популярности эти организации организовали экспорт данных в подходящем для ANSYS формате. Среди них базы данных материалов IDAC, Materiality, MatWeb (рис. 3).

Затем в зависимости от того, из какого материала изготовлен объект, необходимо выбрать соответствующий материал или создать свой с требуемыми свойствами. Для этого нужно выбрать *Verify Material*, а затем, нажав клавишу Import, выбрать материал из списка.



Рис. 2. Построение геометрии модели УЗ-системы

Для поиска собственных частот должны быть заданы модули Юнга и плотности материалов, которые предполагаются изотропными или ортотропными, со свойствами, зависящими или не зависящими от температуры (таблица).

Таблица. Параметры материалов элементов модели

Материал	Модуль Юнга, МПа	Коэффициент Пуассона	Плотность, кг/м ³
Алюминий	300 000	0,2	3720
Сталь	210 000	0,3	7800
Пьезокерамика ЦТСБ-2	92 000	0,33	7700

Выбор условий закрепления объекта

Часть условий закрепления частично берет ся из геометрии, в случае если импортируется сборочная единица. Необходимо задать и закрепления всего объекта. Для этого нужно выбрать *Insert Supports* и затем тип закрепления (фиксированное закрепление, закрепление со смещением, удаленное перемещение, закрепление без трения, закрепление сжатием) (рис. 4).

Задание параметров конечно-элементной сетки

Генерация сетки — один из наиболее важных аспектов инженерного моделирования. Слишком много ячеек может привести к длительной работе решателя, а слишком мало — к неточным результатам. ANSYS Meshing позволяет пользователю находить баланс и получить правильную сетку для моделирования

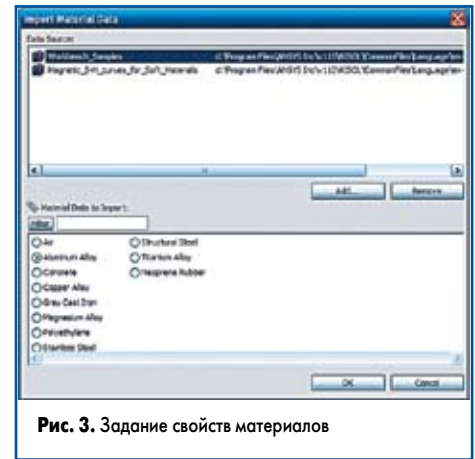


Рис. 3. Задание свойств материалов

наиболее автоматизированным из всех возможных способов.

Библиотека ANSYS содержит более 150 различных типов элементов. Разбиение объекта на элементы можно проводить вручную, а можно воспользоваться средствами пакета ANSYS. Программа сама в зависимости от геометрии выберет размеры элементов. При необходимости полученную сетку можно изменять в интерактивном режиме для более точного расчета в необходимых областях.

Программа ANSYS предоставляет в распоряжение пользователя надежные генераторы произвольной сетки, с помощью которых ее можно наносить непосредственно на модель достаточно сложной геометрии: без необходимости строить сетку для отдельных частей и затем собирать их в единую модель. Произвольную сетку можно строить из треугольных, четырехугольных и четырехгранных элементов. Генераторы произвольной сетки имеют основной и дополнительный построители, что повышает гибкость выбора для пользователя и вероятность получения сетки удовлетворительного качества.

Тип сетки пользователь может выбрать самостоятельно в зависимости от сложности геометрии объекта. В данном примере вариант сетки задан по умолчанию, однако при желании можно выбрать другой тип процесса разбиения (рис. 5).

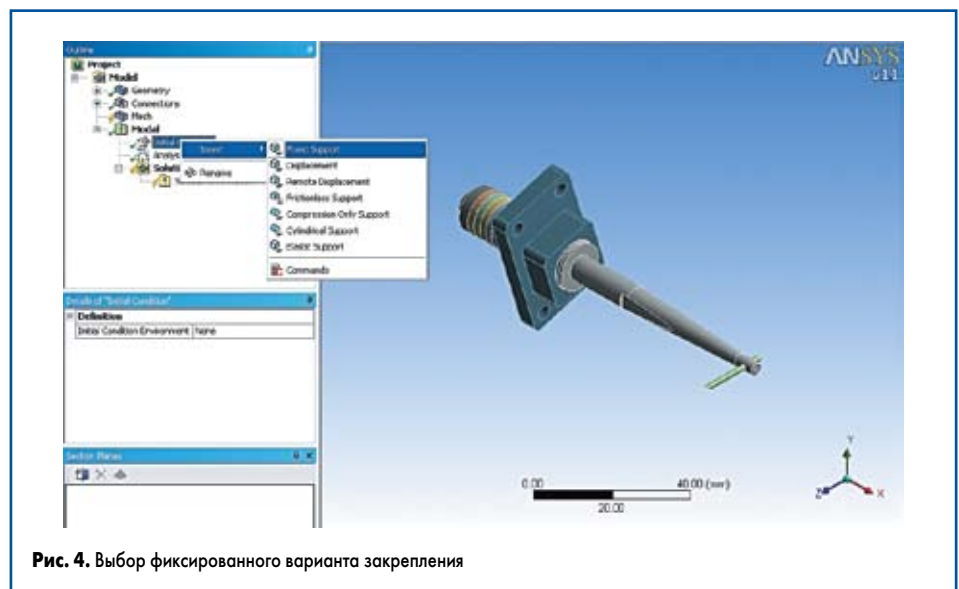


Рис. 4. Выбор фиксированного варианта закрепления

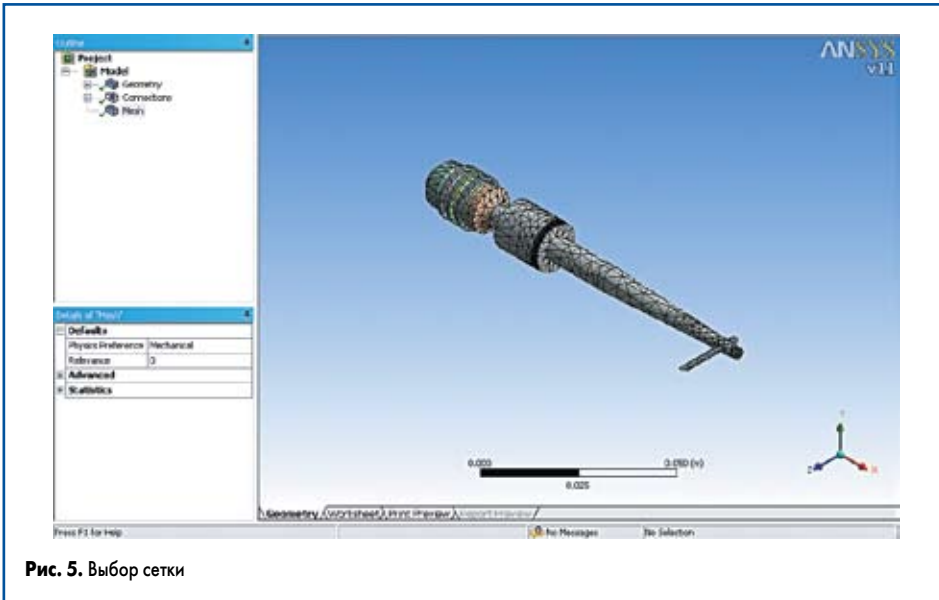


Рис. 5. Выбор сетки

Задание вида анализа и его параметров

Для проведения анализа необходимо выбрать *Analysis* и указать нужный тип. В качестве примера выберем модальный анализ, то есть определение собственных частот и форм колебаний (рис. 6). Затем укажем диапазон, в котором требуется найти частоты и их количество, и нажимаем *Solve*.

Так как нас интересует поиск собственных резонансных частот, то следует выбрать *Modal*. В программе ANSYS модальный анализ является линейной процедурой. Любые нелинейности вроде пластичности или элементов зазора-контакта игнорируются, даже если они и заданы. Доступны четыре метода выявления собственных форм колебаний, в том числе и с учетом демпфирования.

Для проведения модального анализа в программе ANSYS реализовано несколько методов. Наилучших результатов можно добиться, используя метод Ланцоша [4] и метод подпространств. Эти методы построены на полных матрицах жесткости и масс системы; они работают весьма точно и эффективно, почти не требуя вмешательства пользователя в процесс анализа.

Анализ полученных результатов и выводы

На основании значений собственных частот строим распределение форм колебаний. Для этого выделяем требуемый интервал и выбираем *Create Mode Shape Result*. На дисплее наблюдаем картину распространения упругих механических колебаний вдоль УЗ технологической системы, амплитуду колебаний и резонансные частоты [5] (рис. 7).

На основании значений коэффициентов усиления колебаний в УЗ-системе можно сделать вывод о том, что на частотах 65 и 94 кГц предпочтительнее закрепить систему в цилиндрическом держателе. На частоте 94 кГц амплитуда колебания в 2 раза меньше, что позволяет снизить механические напряжения в микросварных соединениях.

Таким образом, моделирование параметров УЗ колебательных систем с помощью про-

граммного комплекса конечно-элементного анализа ANSYS позволяет сравнительно быстро оптимизировать конструкцию системы и добиться требуемых результатов.

Литература

1. Lawrence K. L.. Ansys Workbench Tutorial. Arlington: University of Texas, 2005.
2. Басов К. Графический интерфейс комплекса ANSYS. М.: ДМК Пресс, 2006.
3. Yan Tian-Hong. Design of a Smart Ultrasonic Transducer for Interconnecting Machine Applications // Sensors. 2009. № 9.
4. Голуб Дж., Лоун Ч. Ван. Матричные вычисления. М.: Мир, 1999.
5. Бухалко Д. Н., Ланин В. Л. Моделирование ультразвуковой системы микросварки методом конечных элементов // Информационные технологии в промышленности. Мат-лы докладов VI Междунар. НТК (28–29 сентября 2010). Минск: ОИПИ НАН Беларуси, 2010.

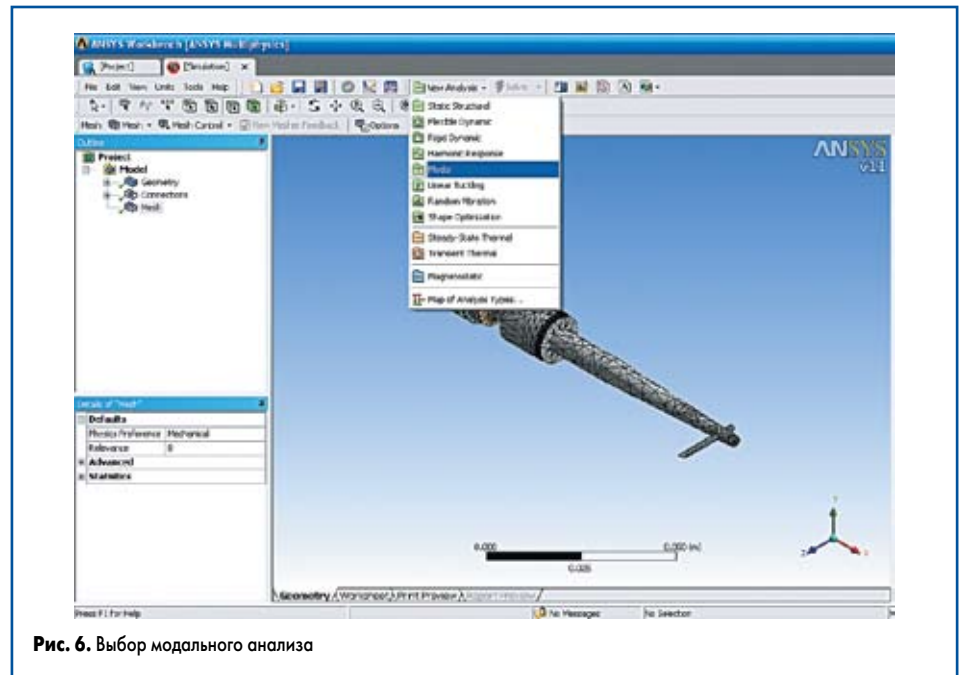


Рис. 6. Выбор модального анализа

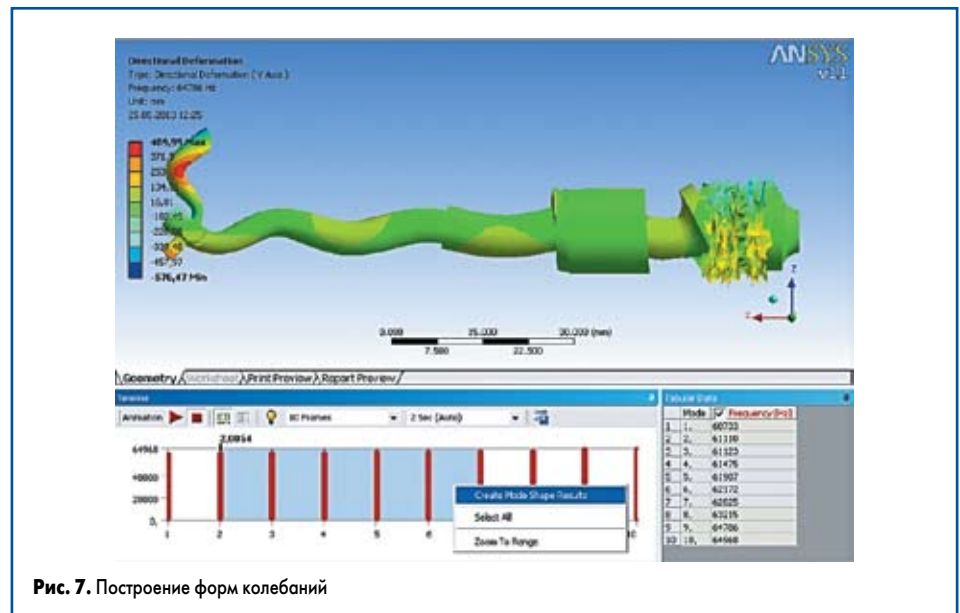


Рис. 7. Построение форм колебаний