



Рис.3. Амплитудно-частотный спектр кинематической погрешности собранной передачи с  $U=17$

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Пашкевич М.Ф., Пашкевич А.М. Исследование влияния погрешностей деталей зацепления на кинематическую точность радиально-плунжерной передачи // Сборник научных трудов членов международной Балтийской ассоциации машиностроителей.- Калининград, КГТУ, 2001.- № 1.-С. 48 – 54.
2. Пашкевич М.Ф., Геращенко В.В. Планетарные шариковые и роликовые редукторы и их испытания: Обзор. – Мн.: БелНИИНТИ, 1992. –248 с.
3. Пашкевич В.М., Пашкевич М.Ф. Информационная система для исследований кинематической погрешности передач в сборе // Машиностроение.- Мн., 2000: Вып. 16.- С. 88 – 93.

УДК 621.762

Е.Е. Петюшик, Д.В. Макаруч, А.Ф. Смалюк

#### ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПШИ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССА ПРЕССОВАНИЯ ДИСКРЕТНОГО ТЕЛА СЛОЖНОЙ ФОРМЫ

*Институт повышения квалификации и переподготовки кадров  
Минск, Беларусь*

Современное развитие промышленного производства требует интенсификации технологических процессов, увеличения производительности, снижения материалоемкости. Что касается таких процессов, как фильтрация, катализ, адсорбция, использующих пористые проницаемые изделия (ППИ), удовлетворить вышеперечисленные

требования можно путем усложнения формы рабочих элементов, так как при этом происходит увеличение площади поверхности элемента, что приводит к повышению производительности, при сохранении габаритных размеров оборудования.

ППИ изготавливают, в основном, методами порошковой металлургии. Одним из перспективных способов изготовления ППИ является радиальное уплотнение с использованием эластичного деформирующего инструмента [1].

Для прогнозирования свойств готового изделия, определения принципиальной возможности и технологических режимов изготовления необходимо произвести расчет напряженно-деформированного состояния (НДС) порошковой заготовки в процессе прессования. Сама по себе довольно трудоемкая задача усложняется наличием развитой поверхности у детали и необходимостью учитывать градиент давления, возникающий из-за использования эластичного деформирующего инструмента сложной формы, что сделать проблематично вследствие ярко выраженных нелинейных свойств эластомеров.

В работах [2,3] рассмотрено получение системы из шести уравнений в частных производных, описывающей НДС пресс-формы в сборе (т.е. системы эластичная оболочка – прессуемый порошок – оправка) и позволяющей рассчитать поля напряжений, деформаций, перемещений, плотности.

Решение дифференциальных уравнений в частных производных всегда было одной из самых сложных проблем в аналитических вычислениях. Следует отметить, что эта сложность связана не с выводом уравнений или с проблемой их понимания, а с существованием ограниченного количества точных аналитических решений.

Был разработан ряд численных методов для их решения. В последнее время наибольшее распространение получил метод конечных элементов, известный довольно давно. Главной причиной, ранее сдерживающей широкое его применение, была необходимость разработки оригинальной довольно сложной и трудоемкой программы, для реализации этого метода, что требует навыков профессионального программиста, и потребность в больших вычислительных ресурсах для решения серьезных, особенно нелинейных задач. Бурное развитие персональных ЭВМ и появление пакетов прикладных программ (ППП), ориентированных на расчет методом конечных элементов, в течение последнего десятилетия в значительной степени решило эти проблемы.

В настоящее время на рынке программного обеспечения ПЭВМ имеется ряд ППП для решения задач методом конечных элементов. Данные ППП можно разделить на две большие категории: для решения конкретных классов задач и универсальные.

Как правило, ППП для конкретных задач не требуют глубоких научных знаний и вывода конечных дифференциальных уравнений, они рассчитаны на применение

инженерами. Данные ППП работают как “черные ящики”, пользователь не знает о внутренней работе ППП, о виде решаемых уравнений и методах, применяемых при их решении (правда, в документации к некоторым ППП эта информация имеется). Они обычно применяются для расчетов на прочность, решения термодинамических, гидродинамических и ряда других задач. Главная задача пользователя в данном случае – выбор типа решаемой задачи, задание геометрии, задание граничных условий и контроль правильного разбиения на элементы.

Работа универсальных ППП и их требования к пользователю несколько отличаются. Они в значительной мере также являются “черными ящиками”, но здесь в саму программу не заложен тип решаемой задачи. В работе с ними пользователь должен задавать не тип решаемой задачи, а конкретное уравнение, которое будет решаться ППП, остальные данные практически не отличаются. Т.е. от пользователя требуется задать математическую формулировку задачи. Такой подход хотя и требует знания математического описания решаемой задачи, но позволяет решать классы задач, на решение которых специализированные ППП просто не рассчитаны. Кроме того, из-за отсутствия в самом пакете способов решения различных задач и их уравнений универсальные ППП как правило значительно компактнее и проще в освоении.

К наиболее распространенным ППП для решения конкретных задач относятся следующие.

MSC Nastran – позволяет рассчитывать напряжения, вибрации, теплопроводность и гидродинамику, ориентирован на расчеты с использованием материалов с линейными свойствами, но возможно и моделирование некоторых нелинейностей, обеспечивает прекрасное качество инженерных расчетов. Сам Nastran не имеет графического интерфейса, а работает только с текстовыми файлами, как на входе, так и на выходе. Для облегчения работы с ним была создана программа PATRAN, обеспечивающая создание моделей для расчетов и визуализацию результатов с помощью графического интерфейса пользователя. Также он обеспечивает связь с наиболее распространенными САПР.

- Ansys – позволяет рассчитывать напряжения, перемещения, деформации, вибрации, теплопроводность, гидродинамику, в том числе и для нелинейных задач, позволяет моделировать процессы пластической деформации, вязкопластической деформации и т.д., имеет чрезвычайно развитые средства для решения контактных задач, включает в себя не только программу расчета, но также и средства для трехмерного твердотельного моделирования, а также средства для визуализации результатов расчета.

- COSMOS – предназначен для решения базовых инженерных задач (в основном линейных), позволяет рассчитывать напряжения, деформации, перемещения, не-

которые задачи термодинамики и некоторые параметры колебательных процессов. Отличительной особенностью данного ППП является наличие встраиваемых модулей для большинства современных САПР.

- LS-Dyna – позволяет решать существенно нелинейные задачи механики, в том числе задачи с большими деформациями, что определяет его широкое использование при моделировании разрушения, штамповки, прессования и других подобных им процессов.

- MARC – позволяет решать большое количество структурных, термодинамических, гидродинамических задач, а также рассчитывать некоторые типы физических полей, ориентирован на решение как линейных, так и существенно нелинейных задач, имеет в своем составе серьезные средства для решения контактных задач.

Среди универсальных ППП можно отметить такие:

- Pro/Mechanica, тесно интегрированный с пакетом Pro/Engineer – является одним из самых мощных пакетов в своем классе, так как способен рассчитывать не только напряжения, деформации, термодинамику, но и динамику движения механизмов.

- Tochnog – позволяет решать широкий круг задач механики, гидродинамики, теплопроводности и др.

- MATLAB – наиболее распространенный математический ППП, имеет в своем составе PDE toolbox – компоненту, предназначенную для решения дифференциальных уравнений в частных производных методом конечных элементов, в его состав входят средства как для решения уравнений заданных пользователем, в том числе и нелинейных, так и ряд заранее заданных уравнений, например, для расчетов полей механических напряжений и деформаций, достоинство – наличие графического интерфейса пользователя и возможность использования результатов расчета в других частях ППП.

- FlexPDE – предназначен для получения численных решений систем дифференциальных уравнений в частных производных, позволяет решать задачи, связанные с теорией упругости, гидродинамикой, электромагнетизмом, тепловыми полями и т.д. FlexPDE способен решать как линейные, так и нелинейные задачи, причем сам определяет тип задачи, исходя из математической формулировки, и получает ее решение. Для решения задачи необходимо задать дифференциальные уравнения, область, на которой они должны быть решены, и граничные условия. В качестве достоинства FlexPDE следует упомянуть его невысокую стоимость и то, что его немного ограниченная версия доступна бесплатно. Результаты моделирования представляются в виде графиков распределения моделируемой величины по заданному контуру

или в виде цветных рисунков, отражающих поля распределения моделируемых величин, где значению величины соответствует определенный цвет.

Постановка задачи для FlexPDE представляет собой текстовый файл, который представляет из себя упорядоченную структуру и содержит следующие разделы: название решаемой задачи, управляющие команды, задание системы координат, описания переменных, необходимых для решения задачи, описания коэффициентов и параметров, задание начальных значений переменных, описание системы дифференциальных уравнений в частных производных, описание необязательных интегральных ограничений, дополнительные параметры, управляющие разбиением, данные, управляющие созданием трехмерных объектов, описание геометрии и граничных условий задачи, описание временных параметров для динамических задач, описание данных выводимых на экран в процессе решения задачи.

FlexPDE самостоятельно производит разбиение области на конечные элементы, что является весьма трудоемким процессом, если оно производится вручную.

В случае если разбиение не обеспечивает требуемой точности, программа сама модифицирует сетку нужным образом в процессе вычислений.

Используя уравнения, описывающие НДС прессформы в сборе [2, 3], была разработана математическая модель для расчета НДС прессформы в сборе (эластичная оболочка - прессуемый порошок - оправка), с учетом зависимости параметров сред от величины прикладываемого давления. Зависимость модуля Юнга эластомера определялась с использованием численных методов аппроксимации и дифференцирования на основании экспериментальных данных, полученных при объемном сжатии



эластомера [4]. Особенностью разработанной модели является то, что коэффициенты дифференциальных уравнений определяются выражениями, параметрами которых служат результаты расчета этих же дифференциальных уравнений. Сходимость решения обеспечивается самосогласованием взаимозависящих уравнений при работе ППП

FlexPDE (автоматически, без вмешательства пользователя). Моделировалось НДС прессформы, изображенной на рис. 1. Так как прессформа симметричная, то рассматривалось только одно ребро для расчета с использованием ППП FlexPDE.

На рис.2 изображено разбиение сечения прессформы на элементы, проводимое пакетом автоматически. В результате моделирования получены распределения перемещений, деформаций и напряжений в прессуемом порошке.

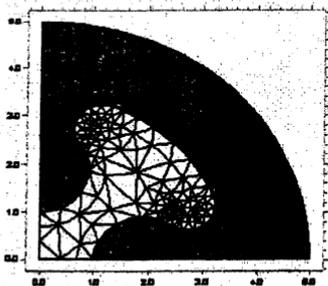


Рис. 2. Сетка конечных элементов

Таким образом, используя программу, разработанную для ППП FlexPDE, который прост в обращении, доступен, позволяет решать сложные системы нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, и полученные в [2, 3] уравнения, описывающие НДС прессформы, с учетом определяемых из эксперимента свойств материала эластичной оболочки [4]

можно производить моделирование НДС изделия любой формы (необходимо задать контур изделия). Это существенно облегчает процесс проектирования оснастки и уменьшает количество изготавливаемых экспериментальных образцов, что значительно снижает себестоимость изделий, особенно при изготовлении небольших партий или единичных экземпляров.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Реут О.П., Богинский Л.С., Петюшик Е.Е. Сухое изостатическое прессование уплотняемых материалов. – Мн.: Дэбор, 1998. – 258с.
2. Напряжения и деформации в порошковом теле и деформирующем инструменте при радиальном прессовании / О.П.Реут, Е.Е. Петюшик, Д.В.Макарчук, А.Ф. Смалюк // Теоретические и технологические основы упрочнения и восстановления изделий машиностроения: Сб. науч. трудов / Под ред. С.А.Астапчика, П.А.Витязя. – Мн.: Технопринт, ПГУ, 2001. – С. 199 – 204.
3. Theoretical and Technological Fundamentals of Pressing Porous Powder Articles of the Complex Shape / O. Reut, Y. Piatsiushyk, D. Makarchuk, A. Yakubouski // 15 International Plansee Seminar, Austria, Reutte, 2001.- V 3.- S. 271-284.
4. Петюшик Е.Е., Макарчук Д.В., Липлянин П.К. Определение характеристик сжимаемости материалов сред, передающих давление при изостатическом прессовании / Труды Бел. гос. технологич. универ., Вып.IV. сер. III. – Мн., 1998. – С. 117 – 124.