

печения максимальной точности решения сложных задач при минимальных затратах ресурсов вычислительной техники.

3. При моделировании технологической системы со сварными корпусными деталями нецелесообразно их аппроксимировать конструкциями без сварных швов, так как это приводит к существенным ошибкам.

Литература

1. Галанин М.П., Савенков Е.Б. Совместное использование метода конечных элементов и метода конечных суперэлементов. // Препринт ИПМ им. М.В. Келдыша РАН. 2004. № 13. 34 с.
2. Кирилин Ю.В. и др. Сварная стойка для тяжелого вертикально-фрезерного станка. - «Станки и инструмент», 1980, № 2.
3. Мазур А.А. Конструкционные материалы для сварных станин металлорежущих станков. - Науч.-техн. сб. «Технология производства. НОТ и У». М., НИИмаш, 1979, № 5.
4. Михайлов В.А., Порхунов С.Г. Расчет напряженно-деформированного состояния сварных базовых конструкций металлорежущих станков методом конечных суперэлементов. // Известия Самарского научного центра РАН. – Самара, Самарский научный центр, специальный выпуск «Актуальные проблемы машиностроения», 2009, - с. 203-206.
5. Образцов И.Ф., Савельев Л.М., Хазанов Х.С. Метод конечных элементов в задачах строительной механики летательных аппаратов. - М., Высшая школа, 1985.
6. Черкасская Л.П., Финкель Л.М. Сварные базовые детали станков и машин. Обзор. М., НИИмаш, 1981.
7. Kohnke P. ANSYS Theory Reference, Eleventh Edition. ANSYS, Inc., 1999.

Определение характеристик режущего инструмента методом конечных элементов

к.т.н. проф. Михайлов В.А., к.т.н. доц. Иванников С.Н., Мокринская А.Ю.
МГТУ «МАМИ»
+7-495-223-05-23 (*) 14-51

Ключевые слова: математическая модель; метод конечных элементов.

Широкое применение высокоскоростной обработки требует применения режущего инструмента, имеющего принципиально новые показатели статического и динамического качества и параметрической надежности. Следовательно, проблема совершенствования методов определения параметров инструмента является актуальной и имеет практическое значение. Многие используемые для изготовления инструментов материалы состоят из чередующихся объемов веществ с различными свойствами. К таким материалам можно отнести твердые сплавы на основе WC-Co и WC-TiC-Co. Свойства этих сплавов зависят от состава, размеров карбидных зерен и температуры испытаний. Особенно велики различия между сплавами WC-Co и WC-TiC-Co. Для объяснения этих различий недостаточно ссылки на разный состав карбидной и связующей фазы. Следует полагать, что основной причиной является различие в структуре этих групп сплавов. В сплавах WC-Co структура представляет собой в основном кобальтовую матрицу с вкрапленными в нее зернами или агрегатами карбида вольфрама. В трехфазных сплавах WC-TiC-Co зерна WC также окружены кобальтом, а зерна (Ti, W) C образуют или сплошной каркас или крупные объемные агрегаты, разьединенные кобальтом и зернами WC. В двухфазных сплавах до определенного содержания кобальта сплошной скелет из зерен (Ti, W) C. При этом характерные объемы однородного вещества много меньше размеров самой конструкции инструмента, но таковы, что внутри неоднородности поведение материала можно описывать уравнениями механики. В этом случае решают задачу следующим образом: определяют эффективные характеристики среды, например, эффективный модуль упругости и коэффициент Пуассона и сводят задачу к однородной среде, иногда к анизотропной. Определение эффективных характеристик осуществляют на основе простейших

опытов на чистое растяжение и всестороннее сжатие. Такой подход позволяет получить картину перемещений в деформированном объекте в целом. Для задач с нелинейным поведением по аналогичным принципам строят зависимости напряжений от деформаций и их используют для решения задач с однородными свойствами.

Наиболее часто для решения поставленной задачи применяют метод конечных элементов. Конечные элементы нужны для сведения континуальной задачи к конечномерной через использование интерполяционного процесса [1]. Это сводится к построению матриц, входящих в систему дифференциальных уравнений, с помощью которых описывается движение деформируемого объекта:

$$M \frac{d^2 U}{dt^2} + R \frac{dU}{dt} + KU = F(t) \quad (1)$$

где: $U(t)$ - глобальный вектор узловых перемещений, зависящих от времени;

$F(t) = F_V(t) + F_S(t)$ - глобальный вектор узловых сил, зависящих от времени.

В механике деформируемого тела U - вектор перемещений. K - матрица жесткости, с помощью которой определяются реакции тела на деформирование, R - матрица демпфирования, с ее помощью обычно описывается рассеяние кинетической энергии из-за внутреннего или внешнего трения, M - матрица масс, определяющая инерционные свойства, F - вектор действующих нагрузок. В общем случае все эти матрицы могут зависеть от времени и перемещений, от физических свойств и геометрии занимаемого пространства. Для решения задачи используем подход, предложенный Ф. Пинежаниновым. Рассмотрим построение матрицы жесткости, так как все остальные строятся подобным образом. Матрица жесткости получается из рассмотрения потенциальной энергии конечного элемента, которую можно представить в виде интеграла от двойного скалярного произведения тензоров деформации и напряжений или в векторном представлении:

$$\frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon : \sigma d\omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon : D : \epsilon d\omega, \quad \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon^T \sigma d\omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon^T D \epsilon d\omega \quad (2)$$

В рассматриваемом случае физическая среда конечного элемента сложная, то есть тензор D случайным образом скачкообразно меняет свои свойства с одного известного состояния на другое, тоже известное. Для интегрирования подобных математических объектов можно использовать интеграл Лебега, в котором ω представляется в смысле меры по некоторому множеству, на котором значения подынтегральной функции мало меняются:

$$\frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon : \sigma d\mu(\omega) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon : D : \epsilon d\mu(\omega), \quad \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon^T \sigma d\omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon^T D \epsilon d\mu(\omega) \quad (3)$$

Таким образом, элемент объема можно разложить на меры входящих в него компонент:

$$d\omega = d(\mu_n(\omega) + \mu_a(\omega)) = d\mu_n(\omega) + d\mu_a(\omega) \quad (4)$$

Интеграл энергии по композитному материалу с сильно осциллирующей подынтегральной функцией распадается на два квадратичных интеграла по мерам с гладкими функциями. Очевидно, что этот процесс разложения можно распространить на любое количество компонент. Для рассматриваемых материалов известны объемные доли входящих компонентов, и их можно использовать при определении меры соответствующего компонента. При этом должно соблюдаться условие нормирования:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = 1 \quad (5)$$

объемных долей

$$\frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \int_{\Omega} \epsilon^T D_i \epsilon d\alpha_i \omega = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \epsilon^T \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i D_i \right) \epsilon d\omega \quad (6)$$

Следовательно, для изотропной композиции можно ввести эквивалентную матрицу уп-

ругости:

$$D = \sum_{i=1}^n \alpha_i D_i \quad (7)$$

При этом следует учитывать, что модель сплошной среды будет давать приемлемые результаты, если размеры компонент достаточно малы по сравнению с характерными размерами конечного элемента. Построена матрица упругости для однородного изотропного материала, все компоненты которой линейны, что позволяет вычислить эффективные коэффициенты Ляме через объемные доли компонент, а также модуль упругости и коэффициент Пуассона:

$$\lambda = \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i, \mu = \sum_{i=1}^n \alpha_i \mu_i, \lambda = \frac{E\nu}{(1-2\nu)(1+2\nu)}, \quad (8)$$

$$\mu = \frac{E}{2(1+\nu)}, E = \frac{\mu(3\lambda+2\mu)}{\lambda+\mu}, \nu = \frac{\lambda}{2(\lambda+\mu)}$$

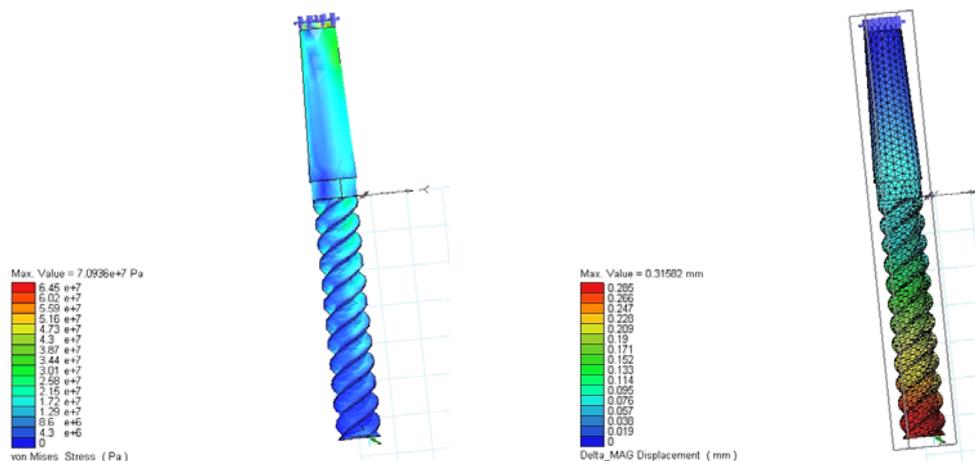
При подобном моделировании в большинстве случаев пренебрегают энергией контактирующих поверхностей, то есть связка в виде шара или любой другой формы, неразличимы. В том случае, если это имеет существенное значение, чтобы учесть эффекты пограничного слоя, можно добавить интеграл по поверхностной мере контакта. Конечно-элементные программы не обладают подобными возможностями, и поэтому эти эффекты учитываются с помощью "коэффициентов формы" связки, с помощью которых можно увеличивать - уменьшать доли связки. "Коэффициент формы" можно вычислить как отношение объема шара с эквивалентной площадью к истинному объему связки по формуле:

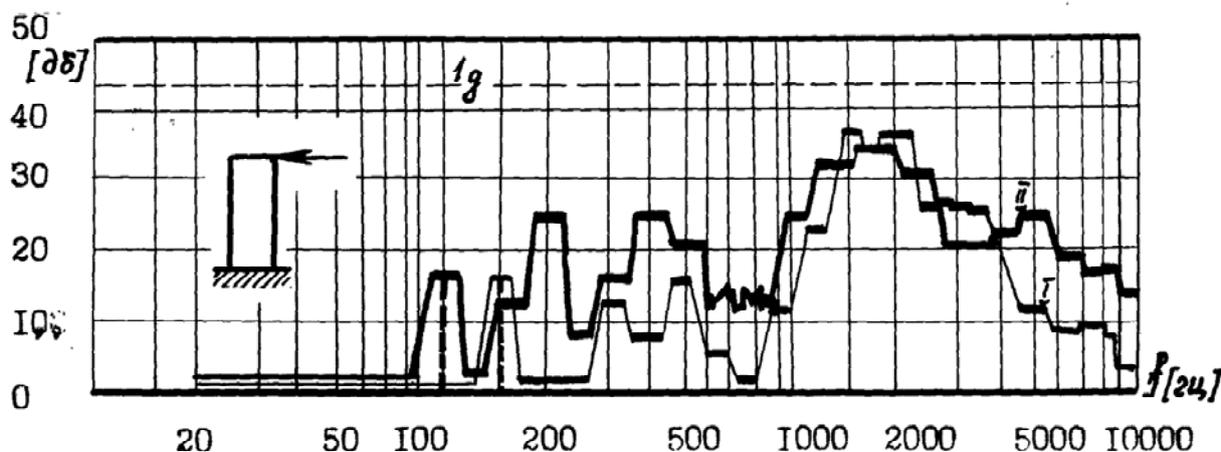
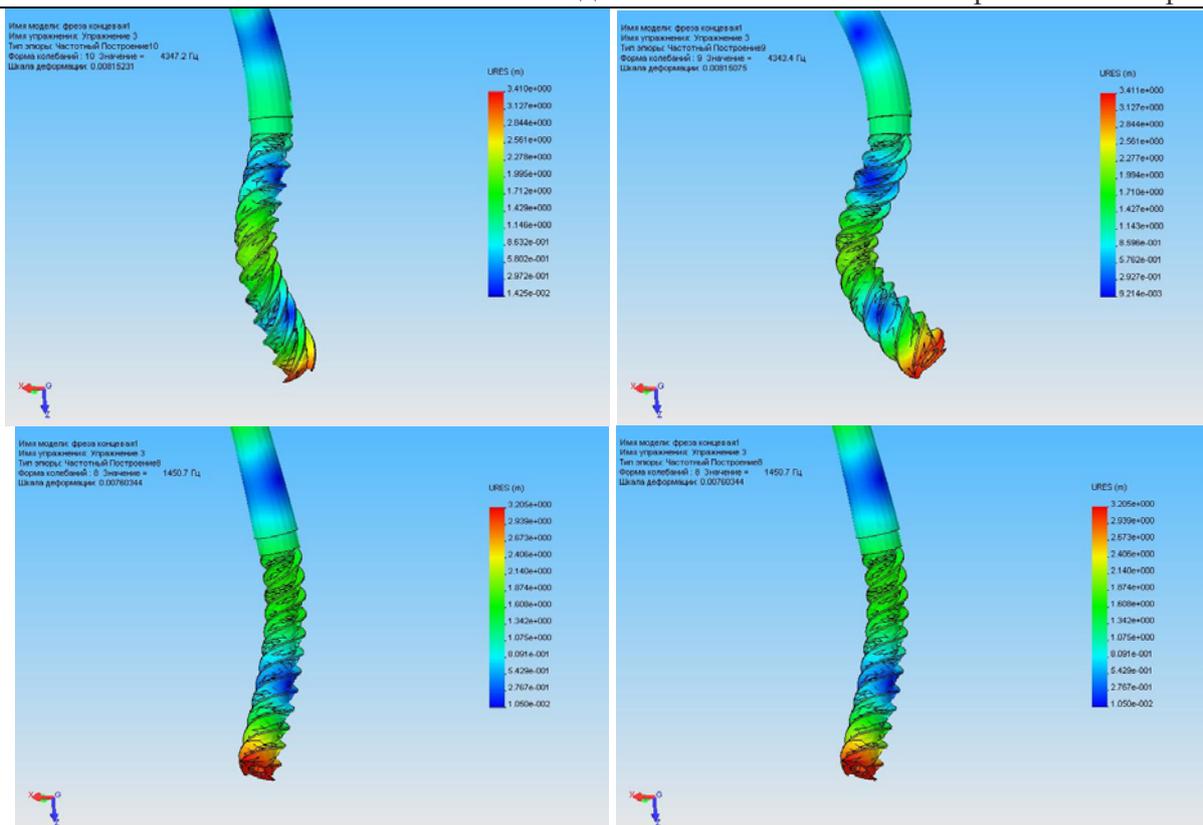
$$K_f = \frac{1}{6\sqrt{\pi}} \frac{S^{\frac{3}{2}}}{V} \quad (9)$$

где: S- средняя площадь поверхности связки, V- средний объем связки.

Во многих практических ситуациях связка имеет размеры, соизмеримые с размерами конечного элемента, и сама может быть описана некоторым конечным элементом.

Определение характеристик режущего инструмента с классическим подходом представления материала и с рассматриваемым реализовано в программном комплексе ANSYS, который позволяет выполнить создание оригинального конечного элемента [2]. В качестве инструмента рассматривалась концевая фреза, изготовленная из различных твердых сплавов. Пример результатов моделирования представлен на рисунке 1.





- спектрограммы ускорений концевых фрез ϕ 20 мм (3 зуба)

I - из P6M5 ; II - из BK8.

Рисунок 1 - Результаты моделирования

Результаты моделирования подтвердили эффективность подхода, принятого для определения характеристик инструмента. Точность расчета перемещений под нагрузкой и определения собственных частот и форм колебаний фрезы повысилась на 15%.

Литература

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике: - М.: Мир, 1975.
2. Басов К.А. ANSYS в примерах и задачах: - М.: Компьютер Пресс, 2002.