

УДК 62-233.3/9:004.9

А. Н. Соболев, к.т.н., доц., **М. Г. Косов**, д.т.н., проф., **А. Я. Некрасов**, доц., МГТУ “Станкин”

Нетвердотельное моделирование элементов редукторов горных машин

В данной работе приведено описание перспективной методики автоматизированного проектирования объектов машиностроения. Приводится пример создания корпуса редуктора с использованием нетвердотельных макроэлементов.

Ключевые слова: редуктор, червячная передача, численное моделирование, зубчатые передачи, нетвердотельное моделирование.

A. N. Sobolev, M. G. Kosov, A.Y. Nekrasov

Non-solid Modeling Elements Gearboxes of Mining Machines

In the given work the description of a perspective technique of the automated designing of objects of mechanical engineering is resulted. The example of creation of gear housing with use of settlement macrocells is resulted.

Keywords: gearbox, worm gear, numerical modeling, gears, non-solid modeling.

Изготовление и восстановление горных машин требует использования новых эффективных методов проектирования объектов машиностроения с элементами технологической подготовки производства.

Важными элементами горных машин являются зубчатые механизмы, от которых зависит многие важные технологические и эксплуатационные параметры. В данной работе приводится описание использования новой методологии проектирования применительно к зубчатым механизмам.

Сокращение сроков и повышение качества конструкторско-технологической подготовки производства при комплексном проектировании объектов машиностроения потребовало разработки новой идеологии структуризации информации - геометрической, жесткостной, прочностной и другой, описывающей свойства объектов машиностроения [1].

В настоящее время при проектировании машиностроительной продукции используются системы твердотельного моделирования и черчения, а также системы инженерного анализа. Как правило, при современном проектировании эти системы используются на основе режима последовательно-параллельных итераций приближения к законченному проекту конструкции. Взаимодействие между указанными

системами ведется на основе разнородных видов конвертирования технической информации, что в результате увеличивает число погрешностей преобразования, а также увеличивает время проектирования изделий машиностроения. Выходом из сложившейся ситуации является возможность использования при компоновке информационных моделей машиностроительных конструкций нетвердотельных макросов [1,2].

Также важным недостатком проектирования на основе традиционного твердотельного моделирования (твердотельное моделирование используется во всех CAD/CAE-системах) является невозможность учета реальных форм составляющих машиностроительный объект компонентов. Реально при твердотельном проектировании инженер создает изделия с желаемыми идеальными формами, не учитывая технологической составляющей законченного представления объекта. Для устранения недостатков присущих традиционному автоматизированному проектированию с использованием CAD/CAM/CAE – систем была разработана САПР “Система нетвердотельного моделирования”.

Повышение эффективности конструкторской и технологической подготовки производства при комплексном проектировании машиностроительных объектов (МО) потребовало разработать новую концепцию структуризации геометрической и жесткостной, прочностной и др. информации, описывающей свойства технологической машины, которая позволит на каждом этапе проектирования жизненного цикла изделия производить анализ состояния МО на соответствие служебному назначению. Новизна концепции состоит в применении разработанной дискретной модели, основывающейся на выявлении существа геометрических, силовых энергетических связей между деталями и узлами МО и представлении на этой основе деталей МО набором нетвердотельных расчетных макроэлементов, объемного, поверхностного и проволочного типов, позволяющих описать связь между множеством геометрических, физико-механических характеристик расчетных макроэлементов и точностными, прочностными, жесткостными параметрами МО [1].

Машиностроительный объект определяется как соединение механических или электромеханических узлов, выполняющих динамические функции, связанные с механическими силами, перемещениями и потоками энергии, работа которых координируется и управляется вычислительными и информационными сетями (или людьми) [3, 4].

Технические характеристики МО целесообразно рассматривать на базе силовых взаимодействий между деталями и узлами, а также способов использования сил приведения деталей в движение и ограничение движения. При передаче сил или энергии возникает цепь звеньев. В этих цепях сила передается через чередующиеся объемы и рабочие поверхности,

т.е. возникает силовая связь между двумя смежными поверхностями различных объемов.

Предложена классификация объемов и контактов между ними. Принимая во внимание, что в машиностроении находят все большее применение детали с покрытиями, а также оболочечные и балочные конструкции, предложено три типа рабочих объемов: трехмерные объемы, оболочечные или пленочные и балочные или проволочные, а также их сочетания между собой. В наличии оболочечных и балочных объемов состоит отличительная особенность классификации от известных. Объемы по своим свойствам классифицируются как абсолютно жесткие упругие, упруго-пластические и т.д. [5]

Контакты принимаются следующих типов: геометрическая связь, объединяющая два объема, связь с наполнителем (клеевая), контакт поверхностей без учета сил трения, фрикционный контакт, контакт с промежуточным телом или смазкой, бесконтактная связь между несоприкасающимися телами с помощью полевой силы.

Объемные и граничные связи чередуются в цепи звеньев, и поэтому свойства их комбинаций определяют свойства МО.

В настоящее время для универсального описания трехмерного отображения геометрической информации, выделенные объемы аппроксимируются одновременно набором конструктивных твердотельных макроэлементов объемных, пленочных и балочных типов. Однако такой набор не позволяет описать физико-механические свойства объемов и характер контакта. Поэтому приходится отказаться от понятия твердотельности макроэлементов или абсолютной жесткости и придать им свойство гибкости, т.е. жесткостные, прочностные и другие свойства. Это достигается аппроксимацией макросов, из которых образуется деталь или узел, наборами поверхностных, объемных и проволочных конечных элементов. Таким образом, приходим к новому понятию макроса – расчетному (нетвердотельному) макроэлементу, которому приданы различные физико-механические и геометрические свойства [1]. Такое представление позволяет решать задачи прогнозирования свойств МО как в статической, так и динамической постановке.

Объемам, описываемым конечными элементами различного типа в зависимости от решаемой задачи, придаются соответствующие физико-механические свойства, на основе применения известного метода конечных элементов в форме перемещений. Информация, относящаяся к объемному расчетному макроэлементу, в общем виде включает код макроса, его тип, положение локальной системы координат относительно глобальной, геометрические размеры с идентификацией поверхностей и их точностными параметрами, физико-механические свойства материала, тепловые характеристики, плотность материала, типы конечных элементов, коэффициенты демпфирования и т.д.

Понятие “нетвердотельности” предполагает использование при автоматизированном проектировании специальных расчетных примитивов со “встроенной” аппроксимацией конструкции на объемные, поверхностные, стержневые конечные элементы, со “встроенными” физико-механическими и геометрическими параметрами. Формирование характеристик расчетных примитивов может осуществляться в специализированном препроцессоре системы нетвердотельного моделирования. При этом следует отметить, что в качестве среды визуального отображения всей нетвердотельной модели объекта при автоматизированном проектировании выступает САД-система с поддержкой твердотельного моделирования (например, AutoCAD или T-FlexCAD). САД-система выступает в качестве программного сервера. Расчет конструкции, отображенной в САД-системе, осуществляется в фоновом параллельном режиме в специально разработанном модульном САЕ - процессоре. Вся информация, влияющая на свойства представления геометрии расчетных макроэлементов, передается по внутренним каналам операционной системы из САЕ-процессора в САД-систему (и, наоборот) через препроцессор системы нетвердотельного моделирования.

Сравнение операций и порядка действий при твердотельном и нетвердотельном моделировании представлено в таблице 1.

Таблица 1

Порядок проектирования на основе двух методик моделирования и соотношения по времени, затрачиваемому на выполнение операций

Операции при нетвердотельном моделировании	Операции при твердотельном моделировании	Соотношение объема работ
1. Создание деталей узлов из наборов нетвердотельных расчетных примитивов	1. Создание деталей узлов из наборов твердотельных примитивов	1.01:1 - 2.1:1
2. В экспорте информации нет необходимости	2. Экспорт геометрических параметров в САЕ-систему	0:0.5
3. Расчет конструкции осуществляется автоматически на первом этапе (параллельный режим)	3. Задание параметров расчетов и расчет в САЕ-системе	0:0.5-0:5.0
4. Повторные итерации проектирования проводятся на первом этапе	4. Повторные итерации проектирования основываются на повторном проведении этапов 1-3	0:1 - 0:20
5. Полуавтоматическая генерация чертежей	5. Полуавтоматическая генерация чертежей	1:1

При использовании метода конечных элементов для определения напряженно-деформированного состояния тела, контактных напряжений $\{N\}$ и областей $\{D\}$ их распределения между контактирующими расчетными макроэлементами (РМЭ) необходимо исключить перемещения тел в пространстве, как абсолютно твердых объектов. Это требует при соприкосновении двух точек $A_1 \in S_1$ и $A_2 \in S_2$, принадлежащим различным стыкуемым поверхностям S_1 и S_2 РМЭ T_1 и T_2 / $S_1 \in T_1$ и $S_2 \in T_2$ / введения между ними связи, обеспечивающей их совместное перемещение после соприкосновения. Наложение связей осуществляется двумя способами. В первом способе после соприкосновения точек A_1 и A_2 между ними вводится фиктивная стержневая связь (стержневая модель). Во втором способе вводится кинематическое условие контакта, устанавливающее совместность деформаций точек A_1 и A_2 . Запись математических зависимостей для стержневой модели имеет следующий вид. Глобальная матрица жесткости запишется в виде [5]:

$$[[K]^{(e)} + [K]^{(k)}] \{U\} = \{F\} , \quad (1)$$

где $[K]^e = \sum_1^{n_e} [K_e]$ - глобальная матрица жесткости объемных конечных элементов;

$[K_e]$ - матрица жесткости одного объемного элемента;

n_e - число объемных конечных элементов;

$[K]^k = \sum_1^{n_k} [K_k]$ - глобальная матрица жесткости стержневых элементов.

$[K_k]$ - матрица жесткости стержневого элемента;

n_k - число стержневых элементов, участвующих в контакте.

Склеивание или объединение РМЭ можно также осуществлять двумя способами: с помощью стержневой системы или используя кинематические условия контакта. Для стержневой системы разрешающая система уравнений имеет вид (1), в которой число стержней n_k определено. При использовании кинематических условий контакта объединение РМЭ осуществляется путем внесения условий совместности и деформаций соприкасающихся точек m и n , вида $\{U_m\} = \{U_n\}$ в разрешающую систему уравнений вида:

$$[K]^e \{U\} = \{F\} \quad 2)$$

Как в первом, так и во втором случае предполагается, что между склеиваемыми поверхностями зазор $\{\Delta\} = 0$.

Редуктор состоит из корпуса (литого чугуна или сварного стального), в котором размещаются элементы передачи – зубчатые колеса,

валы, подшипники, элементы управления и т.д. Вопросы нетвердотельного моделирования зубчатых передач были рассмотрены в работе [6]. Важными элементами редуктора являются корпусные детали.

Корпусные детали редукторов являются их базовыми деталями и предназначены:

для размещения и обеспечения необходимого взаимного расположения деталей и узлов передаточных механизмов редуктора;

восприятия нагрузок, действующих в редукторе, и передачи их на подредукторную плиту или раму;

организации системы смазывания рабочих поверхностей зубчатых колес и подшипников редуктора;

защиты деталей и узлов передач редуктора от их загрязнения инородными частицами окружающей среды;

защиты смазочного материала, используемого в редукторе, от его выброса (при эксплуатации редуктора) в окружающую среду;

отвода в окружающую среду теплоты, образующейся при работе редуктора.

После проведения анализа конструкций корпусных деталей редукторов было предложено ограниченное число объемных и поверхностных макроэлементов. При этом следует учитывать, что для компоновки сложных корпусных макроэлементов могут использоваться как простейшие расчетные примитивы, так и возможно задавать детально макроэлементы корпусных деталей “сразу” без компоновки из простейших расчетных макроэлементов.

На рис. 1 приведено визуальное представление конструкции корпуса червячного редуктора. На рис. 2 приведено представление корпуса с помощью поверхностных РМЭ. На рис. 3 отображена расчетная модель корпуса редуктора.

Важным фактором задания нетвердотельной модели является определение контакта (взаимодействия) между макроэлементами в нетвердотельной модели, выбор свойств макроэлементов.

Для разбиения моделей конструкций машиностроительных объектов может применяться как свободное, так и сингулярное (фиксированное) разбиение на конечные элементы. При этом для математического описания свойств конечных элементов используются известные зависимости МКЭ [7, 8].

Алгоритмическая реализация задания процесса склеивания макроэлементов основывается на следующей процедуре:

- 1) Задание глобальной системы координат для набора макросов.
- 2) Определение геометрических и жесткостных характеристик макросов, определение точек и свойств привязки макросов по отношению друг другу.

3) Автоматическое формирование нетвердотельного образа конструкции, состоящей из наборов макросов. При этом формируются единые массивы для наборов узлов и их координат для всей модели исследуемой конструкции.

4) На основании заданных условий соединения макросов определяются массивы стержневых фиктивных или контактных конечных элементов. При использовании склеивания макросов на основе фиктивных стержневых элементов координаты разноименных узлов стержневых элементов совпадают.

5) После формирования массивов данных, расчетная информация передается в решатель системы нетвердотельного моделирования и в специализированную базу данных.

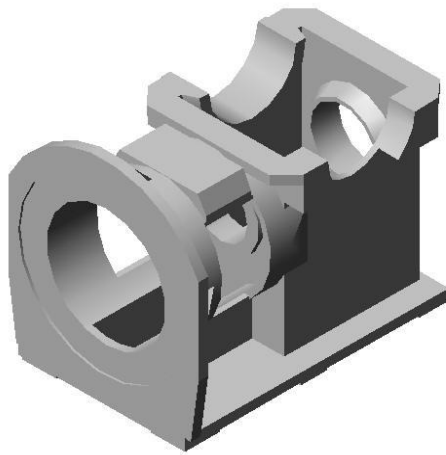


Рис.1. Трехмерная модель корпуса червячного редуктора

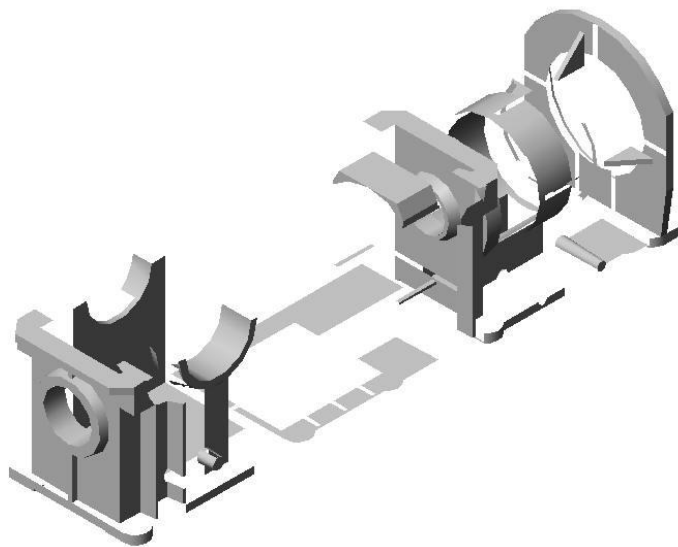


Рис. 2. Моделирование корпуса червячного редуктора поверхностными РМЭ

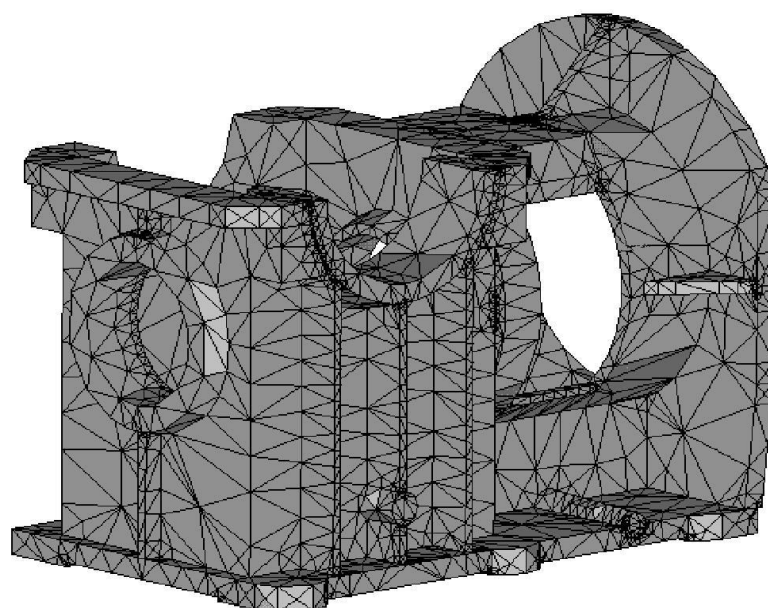


Рис. 3. Расчетная модель корпуса редуктора (использование базисных конечных элементами типа “пирамида”)

Выводы

Разработанные модели и подходы нашли свое практическое применение в реальных разработках. Интеграция задач оценки параметров изделия на соответствие служебному назначению может быть получена на основе выполнения конструкции в среде нетвердотельного моделирования, что, в свою очередь, позволяет повысить достоверность оценки и согласованность работы проектировщиков. Методология и реализующие ее программные средства постоянно совершенствуются и используются в рамках учебного процесса в ФГБОУ ВПО МГТУ “Станкин”.

Список литературы

- 1. Соломенцев Ю.М., Митрофанов В. Г., Косов М. Г.** Нетвердотельное моделирование. Информационные технологии в промышленности: Сборник научных трудов МГТУ “Станкин”. Выпуск 1 / Под редакцией Ю. М. Соломенцева – М.: Янус-К. – 2002. – С. 6-10.
- 2. Косов М.Г., Соколов А.Н.** Автоматизированное проектирование на основе методологии нетвердотельного моделирования. Технология машиностроения. Выпуск № 3 (93) – М.: ИЦ “Технология машиностроения”. – 2010. – С. 20-29.

3. **Косов М.Г., Некрасов А.Я.** Расширенная классификация передач с деформируемыми упругими звеньями // Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении». – М.: МГГУ. – 2013. – С.47-53.

4. **Некрасов А.Я.** Повышение эффективности функционирования приводных механизмов горных машин на основе автоматизированной рационализации схемы контактного нагружения (на примере цепной передачи) // Сборник научных трудов семинара «Современные технологии в горном машиностроении». – М.: МГГУ. – 2013. – С. 237-248.

5. **Косов М.Г., Кузнецов А.П., Соболев А.Н.** Нетвердотельное проектирование. Принципы. Методы. Применение. – М.: Янус-К. – 2010. – 276 с.

6. **Соболев А.Н., Косов М.Г., Кузнецов А.П.** Моделирование элементов зубчатых передач расчетными макроэлементами. // Сборник научных трудов. Семинар «Современные технологии в горном машиностроении». – М.:МГГУ. – 2013. – С.137-146.

7. **Зенкевич О.** Метод конечных элементов в технике. – М.: Мир. –1975. – 541 с.

8. **Сегерлинд Л.** Применение метода конечных элементов. /Пер. с англ. – М.: Мир. –1979. – 392 с.