

строены эпюры распределения прогибов и напряжений с учетом механических и терморadiaционных нагрузок. Также был проведен сравнительный анализ результатов для механической упругой задачи (отсутствие терморadiaционных нагрузок) полученных численным методом и в среде инженерно-программного комплекса FEA ANSYS, в результате чего можно заключить о правильности выбранного численного метода, как для упругой механической задачи, так и для полного спектра всех внутриреакторных нагрузок. Техничко-экономическая эффективность результатов настоящих разработок заключается в возможности проводить численные расчеты напряженно-деформированного состояния призматической оболочки, находящейся в условиях ядерных реакторов, без реализации дорогостоящих экспериментов. Область применения – расчёты механики деформируемого твёрдого тела для конструкций и материалов, как атомного машиностроения, так и ядерной энергетики в целом.

#### Благодарности

- Авторы благодарят д.ф.-м.н. И.С.Куликова и д.т.н. Б.Е.Тверковкина за плодотворные обсуждения и дискуссии в ГНУ «ОИЭЯИ-Сосны» НАН Беларуси.
- Работа выполнена при поддержке гранта БФФИ № Т09М-090 (№ госрегистрации: 20091888).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Денисов В.П., Драгунов Ю.Г. Реакторные установки ВВЭР для атомных электростанций. М.: ИздАТ, 2002. – 480 с. 2. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с. 3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517с. 4. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов/ И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин. – Мн.: Наука и техника, 1984. – 104с. 5. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука. 1979. – 744с.

УДК 621.81:539.4

*Куриленко В.В., Пронкевич С.А., Александров А.А.*

#### АНАЛИЗ НДС ПЛАНЕТАРНОГО РЕДУКТОРА

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь*

Широкие кинематические возможности планетарной передачи являются одним из основных ее достоинств и позволяют использовать передачу в различных областях машиностроения. Мощность передается по нескольким потокам, число которых равно числу сателлитов, что уменьшает нагрузку в каждом зацеплении. Внутреннее зацепление обладает повышенной нагрузочной способностью, так как у него больше приведенный радиус кривизны в зацеплении, поэтому наиболее опасным является внешнее зацепление.

Основными элементами, определяющими работоспособность зубчатых передач, являются зубья. Решающее влияние работоспособность зуба оказывают контактные напряжения  $\sigma_H$  и напряжения изгиба  $\sigma_F$ . Для каждого зуба  $\sigma_H$  и  $\sigma_F$  не являются постоянно действующими. Они изменяются во времени согласно некоторому прерывистому отнулевому циклу. Время действия напряжения  $\sigma_F$  за один оборот колеса равно продолжительности зацепления одного зуба. Напряжения  $\sigma_H$  действуют еще меньшее время. Переменные напряжения являются причиной усталостного разрушения зубьев: поломка зубьев от напряжений изгиба и выкрашивание поверхности от контактных напряжений. С контактным напряжением и трением в зацеплении связаны также износ, заедание и другие виды повреждения поверхностей зубьев [1].

В качестве примера рассмотрим планетарную передачу, аналогичную тем, которые используются в редукторах карьерных самосвалов. Ее характеристики: модуль  $m=10$ , количество

зубьев солнечного колеса  $z_a=22$ , сателлита  $z_g=29$ , корончатого колеса  $z_b=83$ , ширина зубчатого венца  $b=150$  мм. Начальные диаметры  $d_{w1}=230.33$  мм,  $d_{w2}=303.61$  мм,  $d_{w3}=820.69$  мм, крутящий момент на солнечном колесе  $T=20117$  Нм.

Для получения трехмерной модели зубчатых колес использовался пакет SolidWorks, предназначенный для твердотельного трехмерного моделирования. Профиль зуба был построен путем задания координат согласно уравнениям эвольвенты. Расчет напряженно-деформированного состояния произведен средствами пакета ANSYS Workbench.

Ansys Workbench – программный продукт, в основу которого положен современный объектно-ориентированный подход к инженерному анализу, использует при этом возможности решателей ANSYS. ANSYS – многоцелевой конечно-элементный пакет для проведения анализа в широкой области инженерных дисциплин. Это универсальный конечно-элементный пакет, предназначенный для решения в единой среде на одной и той же конечно-элементной модели задач по прочности, теплу, электромагнетизму, гидрогазодинамике, многодисциплинарного связанного анализа и оптимизации на основе всех выше приведенных типов анализа.

Конечно-элементная сетка строилась таким образом, чтобы обеспечить по возможности большую дискретизацию в зонах контакта и в зонах у основания зуба. Это вызвано тем, что форма и размер конечных элементов значительно влияют на точность решения. Сетка создана трансляцией гексагональных элементов, что позволяет получить регулярную сетку и добиться таким образом лучшей сходимости расчетных результатов. Всего КЭ-сетка содержит порядка 280 000 узлов и 53 000 элементов (рис. 1).

Воздействие одной детали на другую осуществляется через специальные контактные элементы. Контактные элементы образуют особый поверхностный слой в области контакта и позволяют задавать взаимодействие деталей. Расчетные алгоритмы ANSYS позволяют моделировать контакт, не задавая точное совпадение узлов сетки на границе. Такой подход к моделированию контакта разрешает задавать различную плотность сетки в контактирующих деталях, например измельчать сетку в наиболее интересных зонах.

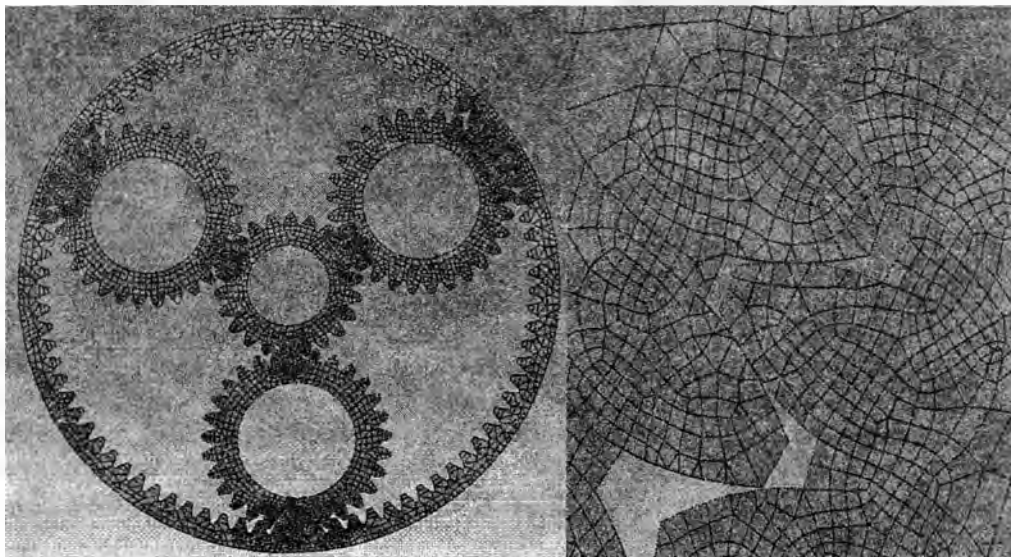
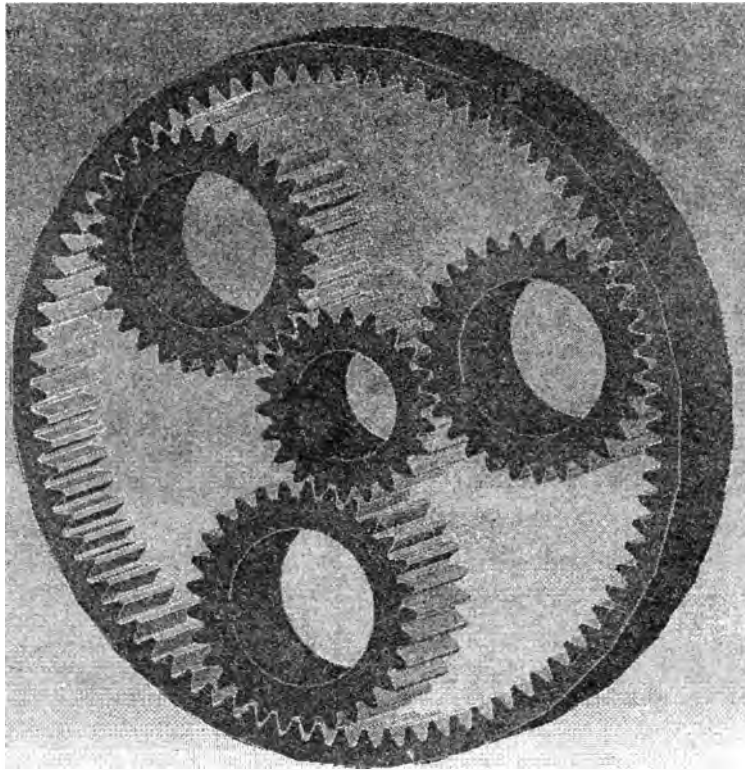


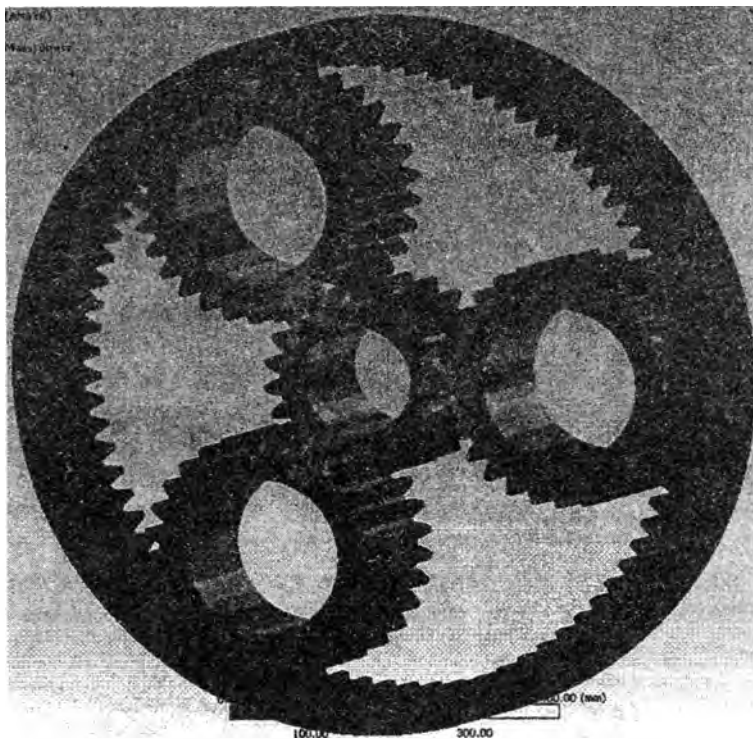
Рис. 1. Конечно-элементная сетка

Для задания свойств материала используется линейная изотропная модель. Для стали: модуль упругости  $E=2.1 \cdot 10^{11}$  Па, коэффициент Пуассона  $\mu=0.23$ , плотность  $\rho=7000$  кг/м<sup>3</sup>. Для узлов, находящихся на цилиндрической поверхности корончатого колеса заданы граничные условия полной заделки. Граничные условия для сателлитов состоят в ограничении только в осевом направлении цилиндрической системы координат, что позволяет сателлитам поворачиваться под действием нагрузок. К цилиндрической поверхности солнечного колеса приложен крутящий момент (рис. 2).



*Рис. 2. Схема нагружения*

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния для планетарного редуктора приведены на рис. 3. Как и предполагалось, максимальные напряжения  $\sigma=180$  МПа действуют в областях внешнего зацепления. Вблизи же внутреннего зацепления напряжения достигают  $\sigma=80$  МПа .



*Рис.3. НДС в редукторе*

Использование CAD/CAE систем позволяет значительно ускорить и удешевить процесс создания деталей машин, и предсказать их поведение и возможные поломки на этапе проектирования, а также решить эти проблемы еще до создания экспериментального образца.

## ЛИТЕРАТУРА

1. М.Н.Иванов. Детали машин: Учеб. Для студентов вузов/Под ред. В.А.Финогенова – М.:Высш. Шк., 1998. – 383 с.: ил. 2. Чигарев А.В., Кравчук А.С., Смалюк А.Ф. ANSYS для инженеров. –М: Машиностроение, 2004. -506 с.

УДК 538.911

*Неумержицкая Е.Ю.*

### **МОРФОЛОГИЯ ПОВЕРХНОСТИ БЫСТРОЗАТВЕРДЕВШИХ ФОЛЬГ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ С ПЕРЕХОДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

*Белорусский национальный технический университет  
Минск, Беларусь*

Получение материалов нетрадиционными методами с заданными механическими, физическими и химическими свойствами, рассматривается как существенный резерв создания новых перспективных материалов для современной техники. В последнее время активно и успешно развиваются методы получения материалов сверхбыстрой закалкой из расплава, которые являются энерго- и ресурсосберегающими. При скоростях охлаждения, превышающих  $10^5$  К/с, удается создать структуру и придать такие свойства материалу, которые нельзя получить традиционными методами синтеза и термической обработкой. Сверхбыстрая закалка из расплава позволяет значительно повысить эксплуатационные характеристики ранее известных и используемых материалов, перевести в аморфное или микрокристаллическое состояние, вызвать измельчение структурных составляющих, значительно увеличить взаимную растворимость компонентов при образовании твердых растворов, привести к формированию метастабильных фаз.

Сплавы алюминия с переходными металлами (Ni, Cr) были получены сплавлением компонент в индукционной печи. Для получения фольги капля расплава (0,2 г) инжектировалась на внутреннюю поверхность вращающегося медного цилиндра, где и происходила кристаллизация. Для исследования брались фольги толщиной 20...80 мкм. Скорость охлаждения жидкости при получении фольг такой толщины  $\sim 10^6$  К/с. Сторона фольги прилегающая к кристаллизатору А имела гладкую поверхность, на которой наблюдались гладкие участки и области в виде раковин [1], противоположная сторона Б, контактирующая с окружающей средой, имела бугристую поверхность, на которой формировались выступы и впадины. Морфологию поверхности изучали при больших увеличениях на растровом микроскопе. Для анализа распределения легированных элементов поверхности фольги осуществлялось сканирование по заданной линии с помощью энергодисперсионного SiLi- полупроводникового детектора на растровом микроскопе.

При сверхбыстрой закалке из расплава на поверхности фольг Al чистотой 99,9999% ячеистая и дендритная структуры не наблюдаются (рис. 1а, б). В фольгах сплавов алюминия с переходными металлами (ПМ) при СБЗР формируется ячеистая структура (рис. 1 в, г, д, е). На стороне фольги А ячеистая структура наблюдалась только в раковинах. Это можно объяснить тем, что гладкие участки фольги, прилегая к кристаллизатору, имели скорость охлаждения больше, чем области фольги, на которых образовались раковины. Ячейки в раковинах имели форму многоугольников; их размер составлял 0,5 – 3,0 мкм (рис. 1 в, д). На дне раковины наблюдались ячейки правильной конфигурации, вытянутую форму имели те ячейки, которые «поднимались» со дна раковин на гладкую поверхность, их длина достигала 6,0 мкм, ширина 2,0 мкм. Число сторон ячеек варьировалось от 4 до 8, также наблюдались ячейки округлой формы. На бугристой стороне фольги Б ячеистая структура наблюдалась на всей поверхности, так как скорость охлаждения всей стороны Б также была меньше, чем на гладких участках сто-