

дробления крошки. Такая конструкция позволяет значительно снизить трудоемкость и время загрузочно-разгрузочной операции крошки.

Проведены испытания твердосплавных пластин, полученных по традиционной технологии из наночастиц регенерированных сплавов и комбинированной технологии (дробление до фракций 3 мм с последующим перемолом). Наибольшей износостойкостью обладают твердосплавные пластины из наночастиц, наименьшей – полученные по комбинированной технологии.

Таким образом, модульная конструкция многокамерного взрывоударного контейнера для совмещенного многостадийного дробления твердосплавного лома из отходов машиностроительного производства с целью двойного их использования в инструментальном производстве целесообразно для создания маломерных взрывоударных контейнеров, которые могут использоваться на действующих производствах.

УДК 536.2

Клус С.А., Покульницкий А.Р., Ширвель П.И.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ТОПЛИВА И ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА С ПОМОЩЬЮ МКЭ В СРЕДЕ ANSYS

*Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь*

В настоящее время решение задач развития атомной энергетики Республики Беларусь высоко актуально. А рост инновационного потенциала атомной энергетики напрямую зависит от объемов научно-исследовательских разработок в этой области. Поэтому очевидно, что проведение исследований, связанных с моделированием технологических процессов и функционирования элементов объектов атомной промышленности столь необходимо и важно.

Известно, что комплексы CAD и CAE позволяют ускорять процессы проектирования и исследования различных конструкций (в том числе и в области атомного машиностроения). Очевидно, что использование современных методов вычислений, реализованных в комплексах CAD (система автоматизированного проектирования), дает возможность проводить исследования различных характеристик проектируемых объектов, что позволяет менять конструкцию этих объектов без создания экспериментальных образцов и не прибегать к длительной и дорогостоящей процедуре натурных исследований. Отметим, что среди средств CAE (средства обеспечения исследований) важное место занимают комплексы метода конечных элементов (МКЭ, FEA), позволяющие проводить имитационное моделирование работы исследуемой конструкции на основе подробного описания ее геометрии, физики моделируемых процессов, свойств применяемых материалов, эксплуатационных характеристик и иных указываемых пользователем исходных и начальных данных. Среди комплексов МКЭ можно указать такие продукты, как ANSYS, CosmosWorks, Catia, Pro/ENGINEER, MSC/NASTRAN, Unigraphics, ABAQUS, EnSight и другие.

Согласно работам [1,2] безопасная работа любого ядерного реактора зависит в первую очередь от надёжной работы его тепловыделяющих элементов (ТВЭлов), имеющих, как правило, цилиндрическую или сферическую геометрию. Тепловыделяющие элементы представляют собой устройства, содержащие твердое ядерное горючее и обеспечивающие при помещении их в активную зону реактора цепную реакцию деления и генерацию тепловой энергии. Изучение деформирования цилиндрического ТВЭла имеет большое значение, так как оно определяет кинетику изменения напряжений и деформаций в тепловыделяющей сборке (ТВС) и активной зоне ядерного реактора АЭС.

Заметим, что выбор того или иного типа ТВЭлов производится на основе тщательного учета условий их эксплуатации в каждом конкретном реакторе. ТВЭлы быстрых реакторов, как правило, имеют стержневую (цилиндрическую) конструкцию, располагаются вертикально в реакторе, в их объеме содержится ядерное горючее (UO_2). Типовой ТВЭл с твердым ядерным топливом, представляющий собой цилиндрический стержень, включает следующие основные части: топливный сердечник; контактный слой; оболочку; заглушки; концевые детали; дистанционирующие детали (рис.1). Оболочки, концевые и дистанционирующие детали изготавливаются из коррозионно-

устойчивых в среде теплоносителя конструкционных материалов, обладающих необходимыми прочностными свойствами и совместимых (не взаимодействующих) с материалами атомного топлива. Оболочки служат для изоляции активного объема от теплоносителя и предотвращения возможности загрязнения первичного циркуляционного контура реактора частицами ядерного горючего и продуктами его деления. В современных ядерных реакторах наиболее широкое распространение получили твэлы с твердым ядерным топливом. В таких твэлах передача тепла, выделяющегося в сердечнике, к его охлаждаемой теплопередающей поверхности происходит посредством теплопроводности и характеризуется коэффициентом теплопроводности ядерного горючего. Причем процесс передачи тепла складывается из передачи тепла от сердечника к материалу контактного слоя, переноса тепла через слой к материалу оболочки и прохождения тепла через материал оболочки.

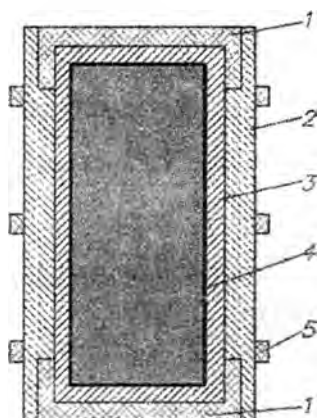


Рис.1. Схема конструкции твэла:
1 – заглушка, 2 – оболочка,
3 – контактный слой(зазор),
4 – сердечник твэла, 5 – дистанцирующий элемент

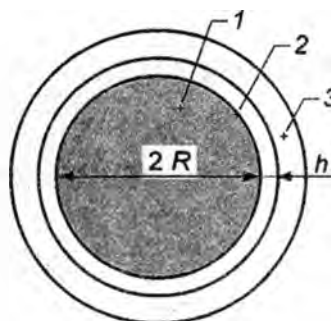


Рис.2. Поперечное сечение твэла:
1 – топливо; 2 – зазор между топливом и оболочкой; 3 – оболочка

Наиболее важное место в оценке работоспособности твэлов занимают термические напряжения. Заметим, что в работе [3] приведены функции распределения упругих термических напряжений в твэле простой формы с равномерно распределенными источниками тепла и формулы для расчета максимальных термических напряжений. Эти формулы получены из интегральных соотношений, выведенных применительно к телам, не испытывающим внешних нагрузок. Примером может служить вывод формул для термических напряжений в полом цилиндре, приведенный в книге С. П. Тимошенко [4]. В действительности же, топливный сердечник испытывает напряжение не только вследствие неравномерного нагрева, но и из-за действия внешнего давления со стороны газового зазора, и контактного взаимодействия топлива и оболочки. Поэтому аналитические интегральные формулы крайне трудно приспособить для расчета термоупругой задачи в случае взаимодействия топлива и оболочки твэла.

В данной статье рассматривается деформирования цилиндрического твэла состоящего из топливной керметной композиции ($UO_2+20\%Cr$ – диоксид урана в матрице из хрома), заключенного в защитную оболочку из холоднодеформированной аустенитовой стали OX16H15M3B (или 316L – зарубежный аналог). Роль контактного слоя в газовом зазоре выполняет гелий, находящийся под давлением. Цель работы – исследовать взаимодействие топливного сердечника и оболочки твэла посредством конечно-элементного моделирования в среде программного комплекс ANSYS. Известно [5,6], что средства термо-прочностного анализа программы ANSYS позволяют использовать результаты решения задачи теплообмена для проведения прочностного анализа [7]. Такая возможность удобна при определении влияния температурного поля на прочность конструкции: можно задать тепловую нагрузку отдельно или в совокупности с механическими нагрузками.

Как известно, одной из причин появления напряжений в сплошном теле является именно неравномерный нагрев. Твэлы активной зоны реактора работают при высоких температурах. Поэтому расчетно-теоретическое исследование НДС твэлов и включает, в первую очередь, определение тем-

пературных полей и возникающих термонапряжений. При этом предполагаем, что теплофизические и механические характеристики материалов остаются неизменными. Это относится и к прочностным свойствам материала.

Решение поставленной термомеханической задачи определения НДС на базе МКЭ в пакете ANSYS Workbench 11.0 включало в себя следующие этапы:

- построение геометрической модели твэла;
- разбиение модели сечения на конечные элементы;
- моделирование виртуальной нагрузки и граничных условий; определение свойств материала;
- расчет и анализ полученных результатов напряженно-деформированного состояния топливного сердечника.

Расчетная модель основана на предположении, что свойства используемых материалов (таблица 1,2) равны реальным. Также предполагается, что топливо не растрескивается, несмотря на тот факт, что градиент температуры может вызвать в нем разрушающие напряжения. Учет растрескивания топлива при анализе поведения твэла не рассматривается.

Таблица 1 – Физические характеристики керметного топливного сердечника

Величина	Значение
R – радиус топливного сердечника	0.003м
P – внешнее давление на топливный сердечник (давление гелия под оболочкой твэла)	0.1МПа
E – модуль упругости топливной композиции	1.85×10^5 МПа
ν – коэффициент Пуассона топлива	0.29
λ – коэффициент теплопроводности топливной композиции	18 Вт/(м·К)
q_v – тепловыделение в единице объема топливного сердечника	2.234×10^9 Вт/м ³
α – коэффициент линейного расширения топливного материала	11.3×10^{-6} град ⁻¹
T_s – температура в центре топливной композиции	900(1173) °C(K)

Свойства материала контактного слоя (He) и материала оболочки OX16N15M3B указаны в таблице 2.

Таблица 2 – Свойства материала и характеристики защитной оболочки твэла и контактного слоя (гелия)

Величина	Значение
h^{He} – толщина зазора	0.0007м
δ^{316} – толщина защитной оболочки	0.0009м
P_1^{He} – внутреннее давление на оболочку (давление гелия)	0.1МПа
P_2^{316} – внешнее давление на оболочку (давление теплоносителя)	7.5 МПа
E^{He} – модуль упругости для гелия	1 МПа
ν^{He} – коэффициент Пуассона для гелия	0.3
λ^{He} – коэффициент теплопроводности гелия	15 Вт/(м·К)
Продолжение таблицы 2	
α^{He} – коэффициент линейного расширения гелия	20×10^{-6} град ⁻¹
E^{316} – модуль упругости защитной оболочки	2×10^5 МПа
ν^{316} – коэффициент Пуассона материала оболочки	0.3
λ^{316} – коэффициент теплопроводности оболочки	60.5 Вт/(м·К)
α^{316} – коэффициент линейного расширения оболочки	12×10^{-6} град ⁻¹

Для построения геометрической модели взаимодействия сердечника и оболочки твэла в ANSYS Workbench 11.0 выбираем вкладку Geometry в открывшемся окне при загрузке программы. В блоке Geometry в режиме Sketching создаем чертеж сборки, далее в режиме Modeling создаем геометрию сборки (рис.3). Переходим в режим Simulation, попутно импортируя туда

геометрию модели. Одновременно программный комплекс автоматически сгенерирует две контактные пары: топливо-газ и защитная оболочка-газ.

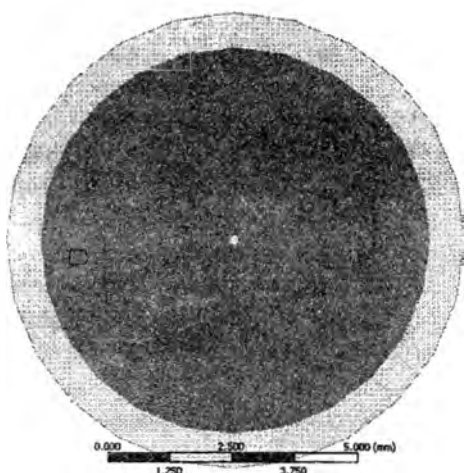


Рис. 3. Поперечное сечение модели твэла в ANSYS

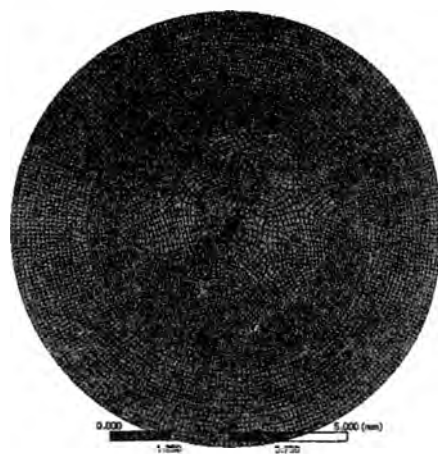


Рис. 4. Модель, разбитая на конечные элементы

Накладываем на модель твэла сетку разбиения, используя пункт панели Meshing. Затем задаём полный размер элемента и разбиваем сборку на конечные элементы, получая в итоге следующую модель (рис.4). Используем в данной задаче вышеуказанные материалы. Задаем их физические и механические свойства в соответствии с реальными рабочими значениями (табл.1,2). Указываем тип решаемой задачи – New Analysis -> Static Structural. Задаем дополнительный тип задачи – New Analysis -> Steady-State Thermal. Описываем состояние окружающей среды (начальные условия) и в блоке Static Structural связываем блоки между собой: определяем величины температур, на границах элементов сборки. Нагружаем модель боковым усилием со стороны газового зазора, а также внешним давлением теплоносителя. Задаем температуру на поверхности сердечника.

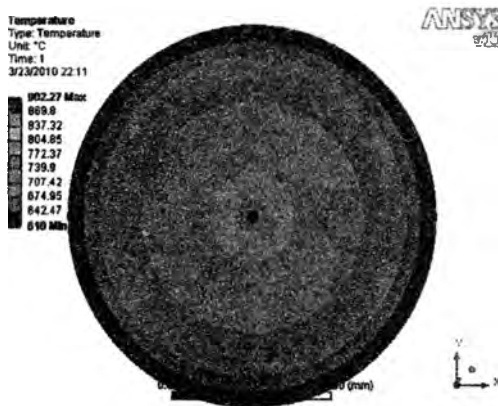


Рис. 5. Распределение температуры (Temperature) по сечению топливного сердечника

Отметим, что для решения данной задачи необходимо связать процессы теплового и прочностного анализов. Для этого выбираем тип решаемой задачи в меню New Analysis: причем, сначала, выполняем температурный анализ (Steady-State Thermal) – получаем температурное поле в модели для заданных граничных условий теплообмена, а затем, опираясь на найденные значения распределения температуры проводим расчет НДС модели твэла (Static Structural), в котором в качестве одного условий Thermal Condition ссылаемся на проведенный Steady-State Thermal анализ (значения температур используются в виде нагрузок на стадиях препроцессорной подготовки и получения решения при последующем прочностном анализе). Таким образом, определяем величины возникающих в

сборке внутренних напряжений, деформаций и перемещений. Ниже (рис. 5) представлено распределение температуры по сечению твэла.

Как видно из рис. 5, максимальная температура в центре сечения топливного сердечника $T=902^{\circ}\text{C}$, а минимальная на внешней поверхности оболочки $T=610^{\circ}\text{C}$.

В конечном итоге, в среде конечно-элементного моделирования ANSYS Workbench получили следующие результаты: распределения температуры (Temperature) вдоль сечения твэла (рис.5); распределение температурных деформаций (Thermal Strain) по сечению модели; совокупные (общие) перемещения (Total Deformation) поперечного сечения твэла (рис.7); интенсивность напряжений (Equivalent Stress) в сечении модели (рис. 6); интенсивность деформаций (Equivalent Elastic Strain) в топливном сердечнике при данном нагружении.

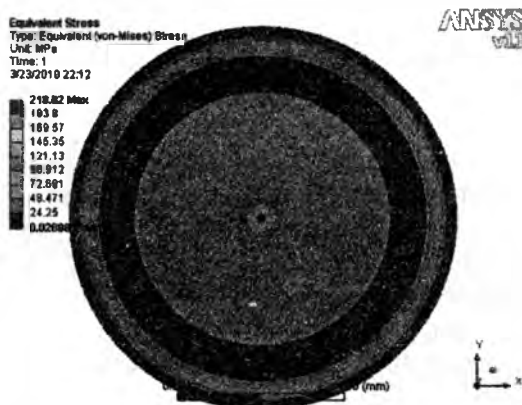


Рис. 6. Интенсивность напряжений (Equivalent Stress) в сечении модели твэла при термосиловом воздействии



Рис. 7. Совокупные перемещения (Total Deformation) по сечению модели керметного твэла при термосиловом воздействии

В результате исследования установили, что температура от центра к внешней поверхности твэла спадает по параболическому закону. Следовательно, центральные участки твэла находятся при более высокой температуре по сравнению с поверхностью, поэтому можем сделать вывод, что приповерхностные области цилиндрического твэла подвержены растягивающим напряжениям, а центральные области – сжимающим. Как видно из рис. 6, действующее на твэл неоднородное температурное поле обуславливает также появление значительных термонапряжений, физическая сущность которых связана с неоднородной температурной деформацией различных участков твэла: в условиях неоднородного температурного поля горячие участки стремятся расшириться, а соседние холодные участки не допускают этого, поэтому горячие (центральные) участки топлива твэла находятся в состоянии сжатия, а более холодные области (защитная оболочка) находятся в состоянии растяжения. Плюс ко всему, отметим, что, для рассматриваемого случая, когда на поверхности твэла, со временем выгорания топлива, появятся трещины или выемки, то макроскопические дефекты сконцентрируют все термонапряжения.

Поэтому, изучение термонапряженного состояния твэлов при выгорании ядерного топлива имеет большое значение и определяет кинетику изменений напряжений и деформаций в активной зоне реактора.

Сравнивая распределение температуры в полученной модели твэла (рис. 5) с распределением температур в сечениях реальных цилиндрических твэлов [3], приходим к полному подобию температурных кривых, что подтверждает правильность решения задачи. Таким образом, произведено моделирование взаимодействия топлива и оболочки твэла с последующим решением температурной и термоупругой задачи в программном комплексе МКЭ ANSYS Workbench 11.0 с последующим сравнением результатов с известными значениями. Целью таких расчетов, в первую очередь, является определение следующих характеристик: рабочих температур, перемещений, возникающих напряжений, а также температурных и эквивалентных деформаций.

В заключении отметим, что окончательное суждение об описанном НДС керметного твэла может быть сделано лишь после соответствующих реакторных испытаний. Однако проектирование элементов активных зон реакторов можно существенным образом облегчить путем использования подобных оценочных расчетов термонапряжений на базе комплекса ANSYS, которые позволяют сразу же, в какой-то мере, приблизиться к наиболее рациональным конструкциям и решениям. Кроме того, распределения напряжений и деформаций, полученные с помощью расчета на базе программного комплекса ANSYS, позволяет довольно быстро получить наглядное представление о наиболее нагруженных и опасных местах в топливном сердечнике твэла. Таким образом, распределение температурного поля может многое сказать о поведении той или иной конструкции в условиях сложного термосилового нагружения.

Благодарности:

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Фрост Б. Твэлы ядерных реакторов: Пер. с англ. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 248с.
2. Куликов, И.С. Прочность тепловыделяющих элементов быстрых газоохлаждаемых реакторов / И.С.Куликов, Б.Е. Тверковкин.- Мн.: Наука и техника, 1984. – 104с.
3. Займовский А.С. Тепловыделяющие элементы атомного реактора/ А.С. Займовский, В.В. Калашников, И.С. Головин. – М.: Атомиздат, 1979. – 517с.
4. Тимошенко, С.П. Теория упругости / С.П. Тимошенко, Дж. Гудьер. - М. Наука, 1979. -551с.
5. Басов К.А., ANSYS в примерах и задачах/ Под общ. ред. Д.Г. Красовского. – М.: КомпьютерПресс, 2002. – 224с.
6. Басов К.А., Графический интерфейс комплекса ANSYS.–М.: ДМК Пресс, 2006. – 248с.
7. Чигарев А.В., ANSYS для инженеров/ А.В. Чигарев, А.С. Кравчук, А.Ф. Смалюк. – М.: Машиностроение, 2004. – 512с.