

УДК 621.039.53 + 004.942

EDN RHJOAZ

## ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ КОМПОЗИТНОЙ ОБОЛОЧКИ ATF-ТВЭЛА НА ОСНОВЕ SiC/SiC/Э110

**Л.А. Карпюк, В.И. Кузнецов, Е.А. Кулешов, А.В. Крупкин, О.М. Петров, А.Н. Сорокин**  
АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических  
материалов имени академика А.А. Бочвара», Москва

*В настоящей статье представлено описание и результаты расчетов испытаний образцов из композита SiC/SiC/Э110 на растяжение, паяного соединения на продольный сдвиг, сжатие образца заглушки из монолита SiC. Выполнена верификация численных моделей по экспериментальным данным. Показано, что численное моделирование позволяет оптимизировать технологический процесс разработки композитных оболочек, сократить число экспериментальных исследований, проводимых с целью определения физико-механических свойств получаемых материалов, и исследовать поведение получаемых конструкций ATF-ТВЭЛов при работе в реакторе.*

**Ключевые слова:** ТВЭЛ, композит, карбид кремния, расчет, модель, МКЭ, оболочка

---

## NUMERICAL MODELING OF THE ATF-ROD COMPOSITE CLADDING BASED ON SiC/SiC/E110

**L.A. Karpyuk, V.I. Kuznetsov, E.A. Kuleshov, A.V. Krupkin, O.M. Petrov, A.N. Sorokin**  
JSC « A. A. Bochvar High-tech Research Institute of Inorganic Materials », Moscow

*This article presents the description and calculation results of the SiC/SiC/E110 composite tests samples for tension and three-point bending, soldered joint for longitudinal shear, compression of a monolithic SiC plug sample. Numerical models were verified using experimental data. It was shown that numerical modeling allows to optimize the technological process of developing composite claddings, reducing the number of experimental studies conducted to determine the physical and mechanical properties of the resulting materials, and investigating the behavior of the resulting ATF fuel rod designs during operation in a reactor.*

**Key words:** fuel rod, composite, silicon carbide, calculation, model, FEM, cladding

---

### Введение

В настоящее время в атомной энергетике значительное внимание уделяется разработке и внедрению материалов для оболочек и топливных таблеток тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов), обладающих повышенной надежностью в аварийных режимах эксплуатации. Одним из таких материалов для оболочек ТВЭЛов является композитный материал на основе карбида кремния (SiCf/SiC).

Карбид кремния (SiC) считается перспективным для применения в ядерных реакторах, потому что в аварийных ситуациях с его использованием не возникает пароциркониевой реакции. Сам по себе карбид кремния SiC явля-

ется хрупким материалом, поэтому его применимость в качестве оболочки ТВЭЛА, испытывающей механические нагрузки во время эксплуатации в реакторе, ограничена. При этом возможно использование армированных волокном композитов SiCf, которые демонстрируют квазипластическое поведение при нагружении. Поэтому в качестве материала применяются многослойные композиции, такие как: композит-монолит (SiCf/SiC), композит-металл и другие сочетания слоев композита, металла и монолита. Ранее в АО «ВНИИНМ» проводилось численное исследование оболочек из SiCf/SiC [1, 2]. В настоящей работе рассматривается композитная оболочка из SiCf/SiC с металлическим лейнером из сплава Э110 (далее –

SiCf/SiC/Э110). Основной причиной использования лайнера у исследователей различных работ это повышение герметичности и частичное или полное сокращение количества циркония в оболочках. Стоит отметить, что перед внедрением данной оболочки в промышленную эксплуатацию необходимо решить следующий ряд задач:

- формулировка требований, предъявляемых к материалу композитной оболочки;
- разработка технологии изготовления оболочки в соответствии с требованиями;
- создание конструкции композитной оболочки, концевых фиксирующих элементов и твэла в целом;
- проведение реакторных экспериментов;
- исследование физико-механических свойств материала, в том числе с учетом влияния облучения;
- лицензирование нового вида топлива при работе в реакторе.

Решение этих задач требует применения численного моделирования. На этапе формулировки требований к материалу оболочки проводятся предварительные расчеты поведения твэла с оболочкой из нового материала под облучением. Далее, при разработке технологического процесса изготовления изделия моделируются различные варианты структуры композита, с целью определить наиболее соответствующую требованиям к материалу. Затем, после проведения экспериментальных исследований физико-механических свойств материалов, проводится моделирование данных испытаний для разработки библиотеки свойств исследуемого материала, которая впоследствии будет использоваться при расчетном обосновании и лицензировании нового вида топлива для работы в реакторе.

Для моделирования в АО «ВНИИНМ» применяются МКЭ-коды ABAQUS [3], ANSYS [4, 5] и проектный код СТАРТ-4А [6]. При этом в среде кодов ABAQUS и ANSYS проводится детальное моделирование поведения материала с учетом его композитной структуры (в зависимости от решаемой задачи: раздельное моделирование слоев, волокон, и др.). Результаты этого моделирования используются для определения физико-механических свойств, построения однородных моделей поведения материала для имплементации в интегральные коды. Проектный код СТАРТ-4А используется для моделирования поведения твэла в целом, с учетом целого спектра физико-химических процессов, происходящих в топливе и оболочке.

При этом существует несколько способов моделирования композитных материалов (КМ):

**Структурный:** рассматривается подробная структура материала и локальные взаимодействия его отдельных компонентов.

**Упрощенный:** композитный материал моделируется сплошным и однородным по своим свойствам.

**Комбинированный:** композитный материал моделируется состоящим из элементов (SiCf/SiC/Э110), которые имеют однородные свойства.

В настоящей работе применяются следующие способы моделирования оболочек на основе SiCf/SiC/Э110:

1) комбинированный с использованием МКЭ в кодах ABAQUS и ANSYS;

2) упрощенный в проектном коде СТАРТ-4А.

Задачами настоящего исследования являются:

- определение роли моделирования при лицензировании новых видов топлива;
- численное моделирование проведенных механических испытаний;
- оптимизация технологического процесса изготовления изделия;
- подготовка проектного кода СТАРТ-4А к расширению его области применимости;
- прогнозирование работы оболочки в составе твэла в коде СТАРТ-4А.

Данная работа выполнена в поддержку оптимизации технологии изготовления композитных оболочек твэла, а также для обоснования прочности и работоспособности твэлов с композитными оболочками в условиях эксплуатации ВВЭР.

## 1. Роль моделирования при разработке и внедрении новых видов топлива

В рамках разработки и внедрения оболочек твэлов на основе карбида кремния в реакторы ВВЭР реализуется программа, включающая в себя комплекс расчетно-экспериментальных работ, заканчивающихся лицензированием конструкции твэлов в надзорных органах (рис.1). На первом этапе проводятся механические испытания образцов новых материалов, по результатам которых уточняются тепловые и механические характеристики этих материалов. Данные испытания воспроизводятся средствами численного моделирования в расчетных кодах, в результате чего осуществляется верификация моделей и расчетных алгоритмов. Таким образом, обеспечивается сопоставимость

расчетных и экспериментальных данных, что позволяет повысить достоверность расчетных кодов и расширить область их применимости на новые материалы и условия эксплуатации.

По результатам испытаний и моделирования уточняются значения предельных величин механических характеристик, таких как предел текучести, предел прочности и др. Эти значения служат основой для разработки критериев оценки работоспособности конструкции. Также на основании этих данных обосновываются коэффициенты запаса, учитывающие неопределенности модельных параметров. Далее, на основании разработанных критериев,

выполняется обоснование работоспособности разработанных конструкций твэлов.

Обоснование является ключевым этапом в процессе лицензирования новых видов ядерного топлива, включая топливо с композитными оболочками. Подготовленные отчеты по обоснованию безопасности и работоспособности направляются в надзорные органы, такие как НТЦ ЯРБ Ростехнадзора, для проведения лицензирования. Таким образом, численное моделирование в связке с экспериментальной базой играет определяющую роль в процессе лицензирования, позволяя внедрять новые типы топлива.

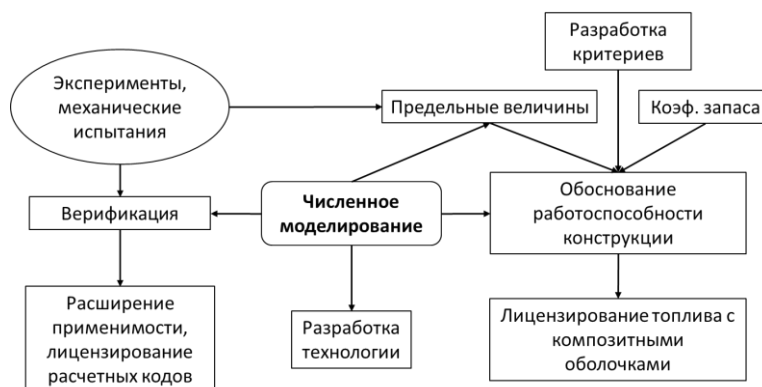


Рис. 1. Схема лицензирования твэлов с оболочками SiC/SiC

Как видно из представленной схемы, внедрение новых типов топлива является сложной задачей, требующей проведения значительного количества расчетно-экспериментальных исследований. В рамках данной статьи рассматриваются следующие блоки работ:

1) Численное моделирование механических испытаний (испытания на продольное растяжение, испытания паяного соединения на сдвиг). По результатам моделирования определяется оптимальная структура композитной оболочки (число слоев волокна и угол намотки, толщина слоя монолита, толщина слоя лейнера).

2) Моделирование паяного соединения с оболочкой SiC<sub>f</sub>/SiC/Э110 и заглушкой SiC со свойствами соединения, полученными на предыдущем этапе, для анализа его прочности.

3) Имплементация в проектный код СТАРТ-4А библиотеки свойств композитного материала, полученной по результатам моделирования механических испытаний.

4) Расчеты поведения твэла с композитной оболочкой и оболочкой из сплава Э110 под облучением в среде кодов СТАРТ-4А и ANSYS, сравнение результатов.

## 2. Численное моделирование механических испытаний

В данном разделе представлено численное исследование проведенных в АО ВНИИНМ испытаний:

- продольное растяжение образца оболочки;
- сдвиг паяного соединения.

### 2.1 Испытания на продольное растяжение

Механические испытания композитных образцов на растяжение проводились с использованием трубчатых заготовок из композита SiC<sub>f</sub>/SiC/Э110. Их целью было определение механических характеристик полученного материала.

Геометрические размеры композитных цилиндрических образцов:

- наружный диаметр – 9,1 мм;
- внутренний диаметр – 7,76 мм;
- длина – 100 мм.

Исследуемые образцы имели следующее строение:

- внутренний слой (лейнер) – Э110 (E110 на схеме ниже);
- средний композиционный слой – SiC<sub>i</sub>/SiC (Composite);
- внешний монолитный слой – SiC (Monolith-SiC).

На рис. 2. представлена расчетная модель композиционной структуры на основе карбида кремния со слоем металлического лайнера.

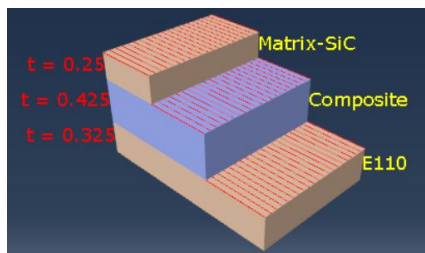


Рис. 2. Композиционная структура образца в ПО ABAQUS (с указанием толщин слоев в миллиметрах)

Для построения конечно-элементной модели оболочки твэла были использованы элементы типа SC8R (семейства Continuum Shell), применяемые для моделирования композитов.

Постановка задачи и симметричность конструкции позволяют упростить моделирование расчетом 1/8 части образца: 1/2 по длине и 1/4 по окружности (90-градусный сегмент). Такой подход позволяет сэкономить временные ресурсы.

Захват моделировался жесткой поверхностью. Модель жесткой поверхности имеет сетку с элементами типа R3D4 и R3D3 (семейства Discrete Rigid Element).

Разбиение оболочки и жесткой поверхности захвата на сетку элементов представлено на рис. 3.

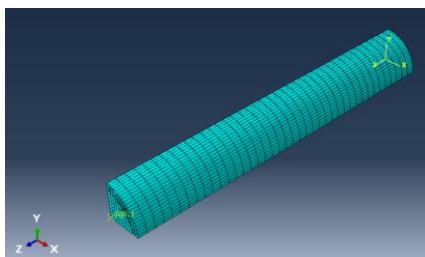


Рис. 3. Расчетная сетка для 3D модели трубчатого образца и жесткой поверхности

Согласно рекомендациям (ГОСТ Р 57857-2017), для проведения испытаний образцов был спроектирован и изготовлен захват. Испытания проводили на статической разрывной машине Instron 5982.

По результатам испытаний было определено, что при усилии 6 кН на образце происходит разрушение монолитной части.

На рис. 4 представлено сравнение экспериментальной и расчетной диаграммы растяжения образца.

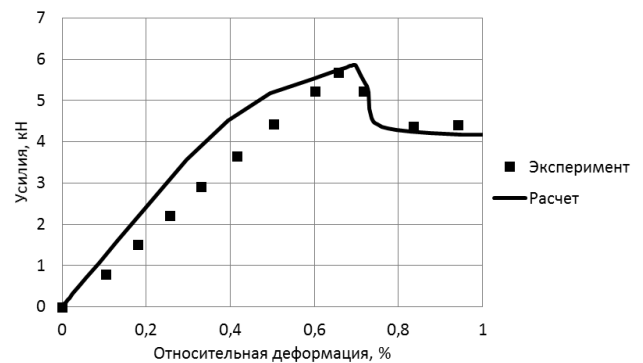


Рис. 4. Сравнение экспериментальной и расчетной диаграммы растяжения трубчатого образца

На рис. 4 видно качественное совпадение экспериментальных и расчетных данных с учетом разрушения слоя монолита и композита, что говорит о корректности построенной модели и правильности задания упруго-пластичных свойств композитной и монолитной структуры. Заметно, что после разрушения монолитной части происходит снижение усилия на образце (деформация 0,7%) и выход на пологий участок (деформация 0,8-1,0%), соответствующий пластическому деформированию лайнера.

На следующем этапе работ, с учетом полученных свойств композита, были проведены расчеты с варьированием толщин слоев для определения оптимальной конструкции. При этом рассчитывалось несколько конфигураций композиционной структуры, в каждой из которых задавалась разная толщина слоев композита. В таблице 1 представлены параметры исследуемых конфигураций композитной оболочки.

Таблица 1

Номер конфигурации	Толщина слоя, мкм		
	Лейнер Э110	Композит SiC <sub>f</sub> /SiC	Монолит SiC
1	220	400	50
2	220	350	100
3	150	420	100
4	170	450	50
5	270	350	50

На рис. 5. представлены результаты расчетов четырех конфигураций в виде сравнительного графика зависимости усилий от деформаций.

Падение значения усилия при деформации ~0,7 % свидетельствует о разрушении монолитной части SiC и композитной SiC<sub>f</sub>/SiC (рис. 5).

Конфигурации 1 и 2 оказывают практически одинаковое сопротивление нагружению, так как имеют одинаковую объемную долю металлического лейнера, который разгружает как монолитную, так и композитную часть конструкции. Конфигурации 3 и 4 также имеют схожую прочность, хотя в конфигурации 3 толщина лейнера составляет 150 мкм, а в конфигурации 4 – 170 мкм, но толщины других слоев отличаются

не более чем на 50 мкм. Таким образом, можно сказать внешний слой монолита SiC значительно упрочняет конструкцию, благодаря высокой жесткости.

Конфигурация 5 с металлическим лейнером толщиной 270 мкм оказывает максимальное сопротивление нагрузкам, что связано с более высокими упругопластическими свойствами сплава Э110 по сравнению с композитом SiC<sub>f</sub>/SiC и монолитом SiC. В данной конфигурации наименьшая потеря сопротивления нагрузки, что свидетельствует о том, что разрушение претерпевает только монолитная часть. Высокая объемная доля Э110 позволила значительно разгрузить всю конструкцию, в частности SiC<sub>f</sub>/SiC.

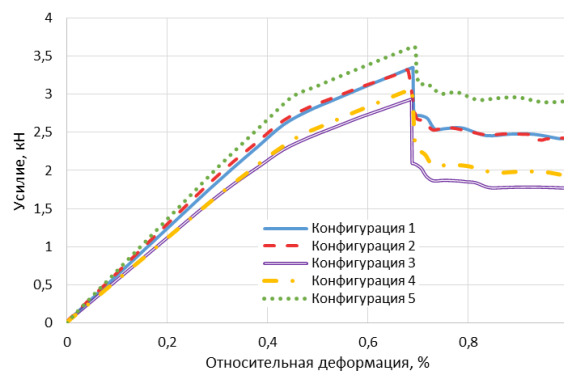


Рис. 5. Расчетные диаграммы растяжения образцов различных конфигураций

## 2.2 Испытания паяного соединения на сдвиг

Паяное соединение необходимо для крепления концевой детали к трубе-оболочке, также оно должно обеспечивать газовую непроницаемость твэла.

Основными задачами испытаний паяного соединения являлись:

- определение прочности соединения при сдвиге;

Объектом испытаний являлся макет паяного соединения между двумя керамическими пластинами из SiC.

- определение сочетаемости материала труб-оболочек твэлов из композиционного материала на основе SiC и различных перспективных материалов, из которых возможно изготовление концевых элементов;

- определение свойств паяного соединения (параметров когезивной зоны) по верификации численной модели;

- определение предельных величин для формулировки критериев.

На рис. 6 показана схема проведенных испытаний.

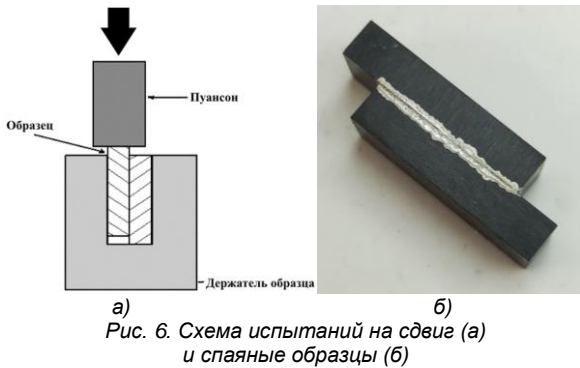


Рис. 6. Схема испытаний на сдвиг (а) и спаянные образцы (б)

Образец закреплялся в держателе испытательной машины Instron 5982. Нагружение осуществлялось с помощью подачи пуансона с постоянной скоростью 1 мм/мин («жесткое» нагружение). Испытательная машина записывала историю усилия и перемещения пуансона. Нагружение производилось до потери несущей способности припоя фиксировать паяное соединение.

Геометрические параметры образца приведены в таблице 2.

Таблица 2

Геометрические параметры образца

Параметр	Значение
Длина пластин, мм	90
Ширина пластин, мм	20
Толщина пластин, мм	1,5
Длина паяного участка, мм	1,8
Толщина спайки, мм	1

Для моделирования эксперимента в программном комплексе ANSYS [4] была разработана численная расчетная модель. При ее построении использовались элементы типа SOLID186 (20-ми узловой трехмерный твердотельный элемент). На рис. 7. представлен вид конечно-элементной модели механического испытания.

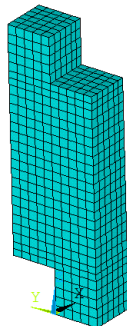


Рис. 7. Вид конечно-элементной модели

Диаграмма нагружения когезивного контакта для режима сдвига (Mode II/III) в ANSYS (рис. 8) описывает поведение связующего слоя между телами при сдвиговом нагружении.

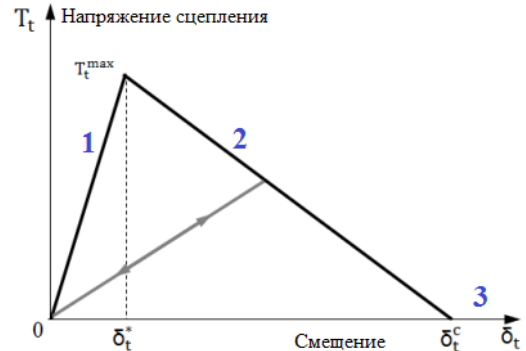


Рис. 7. Диаграмма нагружения когезивного контакта

На графике представлена билинейная зависимость между касательным напряжением  $T_t$  и скачком перемещения  $\delta_t$ , которая выражается формулой:

$$T_t = K_t \delta_t (1 - D_t),$$

где:  $T_t$  — напряжение сцепления (касательное когезивное напряжение);

$K_t$  — касательная когезивная жесткость, определяемая как  $K_t = T_t^{\max} / \delta_t^*$ .

$T_t^{\max}$  — максимальное касательное когезивное напряжение (вводится как  $C_3$  в команде TB, CZM в ANSYS).

$\delta_t^*$  — скачок перемещения в момент достижения максимального напряжения.

$\delta_t^0$  — скачок перемещения при полном разрушении связи (вводится как  $C_4$  в команде TB, CZM).

$\alpha$  — отношение  $\delta_t^*$  к  $\delta_t^0$  (вводится как  $C_6$  в команде TB, CZM).

$\delta_t^{\max}$  — максимальное значение скачка перемещения, достигнутое за всю историю нагружения.

$D_t$  — параметр повреждения, который определяет степень деградации жесткости материала.

Поведение материала описывается тремя ключевыми фазами (отмечены цифрами на рис. 8.):

1. **Линейно-упругое поведение:** Напряжение линейно растет с увеличением скачка перемещения  $\delta_t$  до достижения  $\delta_t^*$ . Параметр повреждения  $D_t=0$ .

2. **Развитие повреждения (Softening):** После достижения  $\delta_i^*$  и до  $\delta_i^0$  напряжение снижается по линейному закону. Параметр повреждения линейно растет от 0 до 1:  $D_i = \delta_i^0 - \delta_i / \delta_i^{max} - \delta_i^*$ .

3. **Полное разрушение:** При достижении  $\delta_i^{max} > \delta_i^0$  параметр повреждения становится равным 1 ( $D_i = 1$ ), напряжение падает до нуля, и происходит полное разделение поверхностей.

В ANSYS такая модель задается с помощью команд TB, CZM (Cohesive Zone Material).

На рис. 9. представлен график сравнения экспериментальной и расчетной диаграмм. При деформировании (перемещении пуансона) на 0,62 мм произошло разрушение соединения (резкое снижение усилия). Сила разрушения образца составила 4,6 кН.

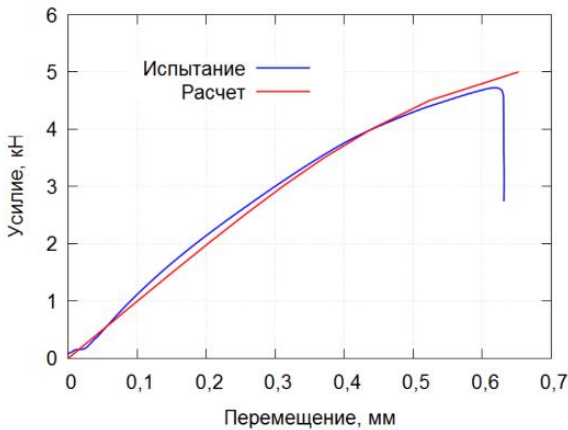


Рис. 8. Сравнение экспериментальной и расчетной диаграмм нагружения паяного соединения

На рис. 10. приведено распределение эквивалентных напряжений при нагружении образцов при испытании на сдвиг в момент достижения максимальной нагрузки.

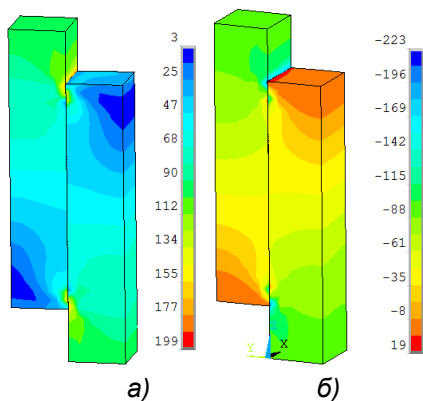


Рис. 9. Распределение эквивалентных (а) и осевых (вдоль оси сдвига) (б) напряжений при нагружении образцов при испытании на сдвиг, МПа

По результатам верификации получены константы прочности паяного соединения, задаваемые в модели ANSYS для контактных соединений, такие как коэффициент жесткости, предельные напряжения инициации разрушения, смещение конца разрушения, параметр вязкости разрушения.

Далее решалась задача моделирования поведения паяного соединения в составе твэла в условиях эксплуатации ВВЭР также в среде кода ANSYS. Расчетная схема показана на рис. 11. Модель включала в себя заглушку, оболочку и контактную поверхность между ними.

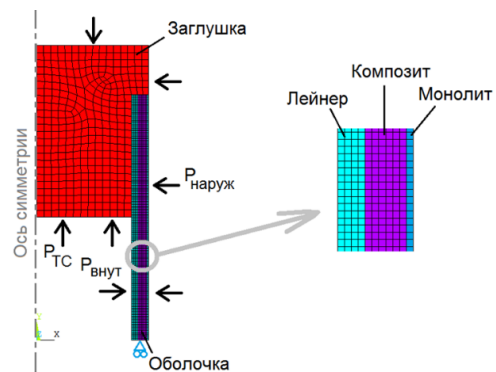


Рис. 10. Конечно-элементная схема паяного соединения, включающего композитную оболочку и заглушку, с примененными граничными условиями

Для дискретизации компонентов конструкции использованы восьмиузловые элементы PLANE183 с активированной опцией осесимметричного анализа, что позволяет корректно воспроизвести трехмерную цилиндрическую геометрию в двумерной постановке. Модель оболочки включает три основных коаксиальных слоя:

- внутренний слой – лейнер из сплава Э110, выполняющий функции герметизирующего барьера, толщиной 200 мкм;
- средний слой – композит SiC<sub>i</sub>/SiC толщиной 550 мкм;
- наружный слой – монолит SiC толщиной 50 мкм.

Для моделирования механического взаимодействия между оболочкой и заглушкой создана контактная пара, состоящая из элементов TARGE169 и CONTA172. Данная постановка позволяет анализировать критические явления, такие как изменение контактного давления, возможность относительного проскальзывания поверхностей и риск отслоения (de-bonding) между слоями в процессе нагружения. Рассматривается нижняя заглушка твэла,

так как со стороны верхней предполагается пружинный фиксатор.

На модель действует комплекс внешних нагрузок, соответствующих эксплуатационным условиям ВВЭР. С внешней стороны на оболочку твэла указывает давление теплоноситель первого контура ( $P_{\text{наруж}}$ ), а изнутри система нагружена давлением горячих газообразных продуктов деления ( $P_{\text{внут}}$ ). Ключевой нагрузкой

для нижней заглушки является давление топливного столба ( $P_{\text{ТС}}$ ), возникающее в случае заклинивания топливных таблеток при их тепловом расширении на мощности. Сочетание этих нагрузок создает сложное напряженное состояние в многослойной структуре.

На рис. 12. показано поле эквивалентных и осевых напряжений для концевой элемента при эксплуатационных нагрузках.

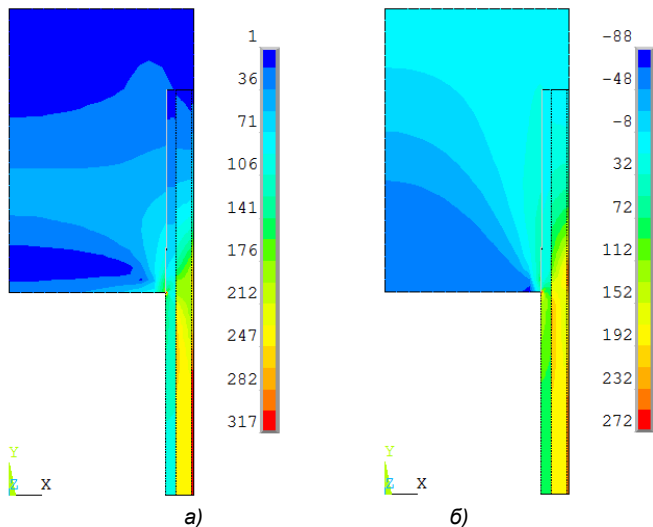


Рис. 11. Поле интенсивности напряжений по Мизесу (а) и осевых напряжений (б), МПа

Анализ результатов расчета, приведенных на рис. 12, показал, что концентрация напряжений наблюдается преимущественно в зоне перехода от оболочки к торцевой заглушке, что характерно для соединений разнородных материалов с различными механическими характеристиками.

Интенсивность напряжений учитывает трех-

мерное напряженное состояние, однако определяющим в данном случае является поле осевых напряжений, имеющих максимальные значения в области растяжения, так как конструкция претерпевает преимущественно растяжение в осевом направлении.

Результаты прочностного расчета паяного соединения приведены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты прочностного расчета паяного соединения

Область	Максимальные осевые напряжения, МПа	Предельные напряжения, МПа	Коэффициент запаса
Лейнер (внутренний слой оболочки), МПа	310	350*	1,1
Композит (средний слой), МПа	254	415	1,6
Монолит (наружный), МПа	317	400	1,2
Заглушка	171	400	2,3

\* Предел текучести сплава Э110 в облученном состоянии при рабочей температуре

Полученные данные свидетельствуют о том, что при эксплуатационных нагрузках все компоненты сохраняют работоспособность, по-

скольку максимальные напряжения не превышают предельных значений.

Таким образом, результаты расчета демон-

стрируют, что при принятых конструктивных параметрах паяное соединение не является элементом конструкции, ограничивающим эксплуатацию твэла в реакторе. Дальнейшая оптимизация должна быть направлена на повышение прочностных характеристик композитной оболочки, либо на снижение рабочих напряжений путем конструктивных модификаций

### 3. Сравнение поведения твэлов с оболочками из Э110 и SiC<sub>i</sub>/SiC/Э110 при эксплуатации в реакторе

В данном разделе приведены результаты расчета напряжений в оболочке при подъеме мощности. Сравнивались напряжения в штатной циркониевой оболочке (сплав Э110) и композитной оболочке на основе карбида кремния с металлическим лейнером (SiC<sub>i</sub>/SiC/Э110). Толщины слоев композитной оболочки, как и ранее, заданы 200-550-50 мкм от внутреннего к наружному.

Расчеты проводились в среде кодов ANSYS и СТАРТ-4А. В коде ANSYS проводилось детальное моделирование структуры оболочки в гетерогенной постановке. В коде СТАРТ-4А применялся упрощенный подход к моделирова-

нию оболочки с использованием гомогенизированных свойств, полученных ранее по результатам расчета в коде ABAQUS.

В качестве сценария была выбрана модельная история облучения твэла типоразмера ТВСА-АЛЬФА при постоянной мощности 19 кВт/м с последующим скачком мощности до 28 кВт/м со скоростью 1 кВт/м/мин (рис. 13).

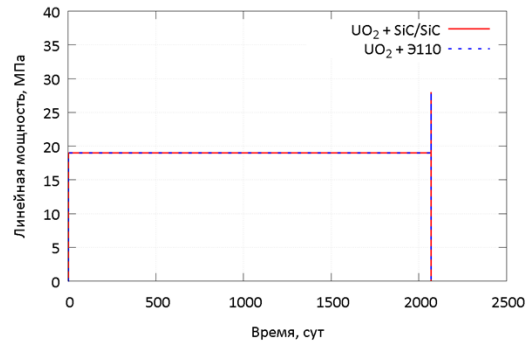


Рис. 12. История изменения максимальной линейной мощности

В таблице 4 представлены характеристики твэла, используемые для расчета, а также приведены результаты расчета максимальных окружных напряжений в оболочке.

Таблица 4

Характеристики твэла, принятые для расчета

Параметр	Твэл №1	Твэл №2
Топливо	UO <sub>2</sub>	
Оболочка	Э110	SiC <sub>i</sub> /SiC/Э110
Типоразмер	ТВСА-АЛЬФА	
Мощность базового облучения, кВт/м	19	
Мощность на скачке, кВт/м	28	
Максимальные напряжения, МПа	183	535

Максимальная мощность, достигающаяся при скачке, была выбрана согласно лимитной кривой RC2, ограничивающей максимальную амплитуду скачка мощности. Длительность облучения на постоянной мощности перед скачком была выбрана так, чтобы в твэле с оболочкой из SiC<sub>i</sub>/SiC/Э110 достигался механический контакт топлива и оболочки.

#### 3.1 Расчет в коде СТАРТ-4А

На рис. 14. представлена зависимость окружных напряжений в оболочке от среднего выгорания по твэлу, полученная при расчете в коде СТАРТ-4А.

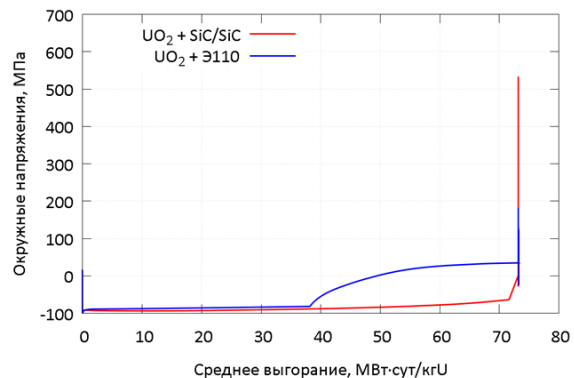


Рис. 13. Зависимость окружных напряжений от выгорания для твэлов с оболочкой из SiC<sub>i</sub>/SiC/Э110 и Э110

Из рис. 14. видно, что окружающие напряжения в оболочке из сплава Э110 начинают расти при выгорании  $\sim 36$  МВт-сут/кгU, что свидетельствует о закрытии зазора. В то же время рост окружающих напряжений вследствие закрытия зазора для оболочки из SiC/SiC/Э110 наблюдается при выгорании  $\sim 72$  МВт-сут/кгU. Это объясняется значительно более низкой скоростью ползучести композитного материала SiC/SiC, по сравнению со штатной конструкцией, поэтому закрытие зазора осуществляется за счет распухания топливной композиции.

При этом для оболочки из SiC/SiC/Э110 максимальное значение окружающих напряжений составляет 535 МПа, что превышает предел прочности композитного материала. Вместе с этим максимальное значение окружающих напряжений в оболочке из сплава Э110 составляет 183 МПа, что ниже предельных напряжений по прочностному критерию для оболочки. Это говорит о необходимости дальнейшей оптимизации конструкции твэла с композитной оболочкой, в частности уменьшение внешнего диаметра топлива, что не приведет к закрытию зазора топливо-оболочка и жесткому контактному их взаимодействию – *pellet-cladding mechanical interaction* (PCMI).

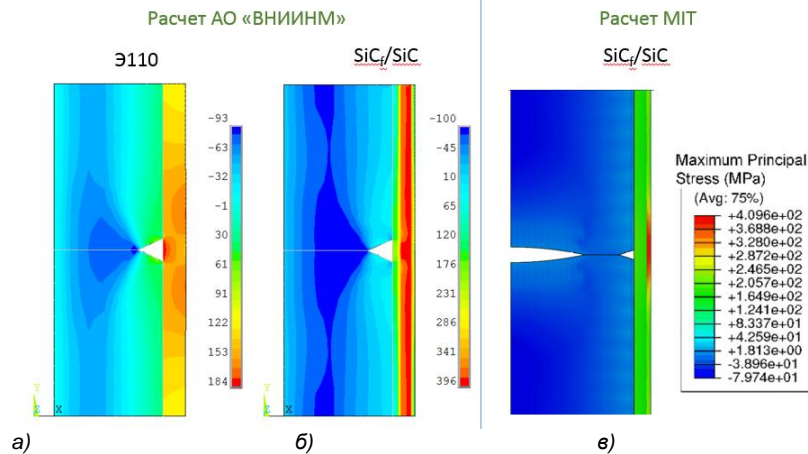


Рис. 14. Распределение первых главных напряжений в участке твэла при подъеме мощности реактора, МПа: а) расчет ВНИИНМ с Э110; б) расчет ВНИИНМ с SiC/SiC/Э110; в) расчет MIT с SiC/SiC без лейнера [8-11]

Аналогичные результаты (то есть превышение предела прочности материала при закрытии зазора) были получены в работах Li и Shirvan [8-11] (рис. 15. в).

Проведенное исследование демонстрирует, что замена циркониевой оболочки на SiC/SiC/Э110 без конструктивных изменений твэла приводит к высоким напряжениям во внешнем слое. Это подтверждает необходимость дальнейшей оптимизации геометрии и структуры SiC-оболочек, включая возможное

### 3.2 Расчет в коде ANSYS

На рис. 15. а, б приведено распределение первых главных напряжений, полученные при расчете в конечно-элементном коде ANSYS при максимальной мощности и закрытии зазора топливо-оболочка.

Показано, что в циркониевой оболочке не превышен предел текучести материала, таким образом штатные твэлы сохраняют прочность, что также подтверждается опытом их эксплуатации.

В случае SiC-оболочки со слоистой структурой (внутренний слой лейнера из сплава Э110, промежуточный композитный SiC/SiC и внешний монолитный SiC) выявлено существенное повышение напряжений: в композитном слое зафиксированы повышенные напряжения до 400 МПа при контакте топливо-оболочка, обусловленные высокой жесткостью оболочки, тогда как во внешнем монолитном слое наблюдалось снижение напряжений вследствие его частичного разрушения, поэтому следует не допускать закрытия зазора топливо-оболочка в течение эксплуатации твэла реактора ВВЭР.

изменение толщины слоев, диаметров оболочки, а также применение топлива с уменьшенным диаметром таблетки и/или другого состава.

### Выводы

В настоящей работе продемонстрирована возможность применения численного моделирования анализа поведения композитной оболочки на основе карбида кремния

(SiCf/SiC/Э110) для твэлов ATF при механических испытаниях и в составе твэла ВВЭР.

Для моделирования конструкции оболочки, находящейся под действием внутренних и внешних силовых факторов, использован метод конечных элементов (МКЭ), который позволяет с требуемой точностью определить напряженно-деформированное состояние и температурное распределение в исследуемом объекте. Проведено численное моделирование композитной оболочки на основе SiCf/SiC/Э110 в различных режимах нагружения:

- продольное растяжение трубчатых образцов с различными толщинами слоев;
- в составе паяного соединения с заглушкой в условиях эксплуатации реактора;
- в составе твэла с топливом UO<sub>2</sub>.

Также смоделированы испытания на сдвиг паяных соединений образцов из монолита SiC для определения прочностных свойств паяного соединения.

Методом вариации толщин слоев определено, что конфигурация оболочки с лейнером

Э110 толщиной 270 мкм демонстрирует наибольшее сопротивление продольному растяжению благодаря лучшим пластическим свойствам металла.

Расчет прочности паяного соединения концевоего элемента твэла продемонстрировал, что максимальные эксплуатационные напряжения не превышают предельных значений.

Однако анализ напряжений в композитной оболочке при эксплуатации в реакторе показал необходимость оптимизации конструкции ATF-твэла с композитной оболочкой.

Построение расчетных моделей испытаний образцов композитных оболочек твэлов позволяет:

- оптимизировать технологический процесс изготовления изделий;
- прогнозировать поведение твэла ВВЭР с оболочкой из SiCf/SiC/Э110;
- расширить область применимости проектных кодов на композитные оболочки для последующего лицензирования в надзорных органах.

### Список литературы

1. Разработка цифрового двойника ATF твэла с композитной оболочкой из карбида кремния. Часть 1: разработка цифровой модели в коде ABAQUS / П.Г. Демьянов, А.Н. Сорокин, А.И. Королева [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2023. - №3(119). – С. 131-148. – EDN IZFTXN.
2. Разработка цифрового двойника ATF твэла с композитной оболочкой из карбида кремния. Часть 2: численное исследование поведения ATF твэла с оболочкой из карбида кремния под облучением / П.Г. Демьянов, А.Н. Сорокин, А.И. Королева [и др.] // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2023. - №3(119). – С. 149-159. – EDN GWYRIA.
3. Abaqus G. Abaqus 6.11 / Dassault Systemes Simulia Corporation, Providence, RI, USA. – 2011.
4. ANSYS, Inc. Конечно-элементный код ANSYS. Пользовательский номер 662129 от 28.12.2011.
5. ANSYS Mechanical APDL Theory Reference. Release 14.0 - 2011 SAS IP.
6. СТАРТ-4А. Аттестационный паспорт программы для электронных вычислительных машин, регистрационный № 570 от 23 июля 2024 г. ФБУ «НТЦ ЯРБ» при Ростехнадзоре.
7. Исследование влияния медного покрытия на совместимость армирующего волокна с алюминиевой матрицей / Е.С. Шитова, А.В. Ерохина, Н.А. Литовченко [и др.] // Деформация и разрушение материалов. – 2025. – № 7. – С. 15–22.
8. W. Li, K. Shirvan, ABAQUS analysis of the SiC cladding fuel rod behavior under PWR normal operation conditions, *Journal of Nuclear Materials* (2019)
9. W. Li, K. Shirvan, Finite element analysis of the SiC/SiC composite clad deformation in the presence of spacer grids, *Journal of Nuclear Materials* (2019)
10. W. Li, K. Shirvan, U<sub>3</sub>Si<sub>2</sub>-SiC fuel performance analysis in BISON during normal operation, *Journal of Nuclear Materials* (2019)
11. W. Li, K. Shirvan, Implications of SiC irradiation creep and annealing to UN-SiC fuel rod behavior, *Journal of Nuclear Materials* (2019).

Поступила в редакцию / Received 30.07.2025

Поступила после рецензирования / Revised 20.09.2025

Принята к публикации / Accepted 22.09.2025