

диффузионной двухгрупповой модели реактора ВВЭР. Аттестационный паспорт программного средства. Рег. номер паспорта аттестации ПС № 85 от 18.12.1997. Фед. надзор России по ядерной и радиационной безопасности. М., 1997.

7. Болнов В.А., Будников А.В., Демуров В.Т. и др. Программный комплекс ТИГР-1. Аттестационный паспорт

программного средства. Рег. номер паспорта аттестации ПС № 169 от 23.12.2003. Фед. надзор России по ядерной и радиационной безопасности. М., 2003.

Поступила в Редакцию 6.06.08

УДК 621.039.5:546.53

РАСЧЕТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПИРОУГЛЕРОДНЫХ И КАРБИДОКРЕМНИЕВЫХ БАРЬЕРОВ МИКРОТВЭЛОВ ВТГР

Голубев И.Е. (ВНИИНМ им. А.А. Бочвара), Курбаков С.Д., Черников А.С. (НПО «Луч»)

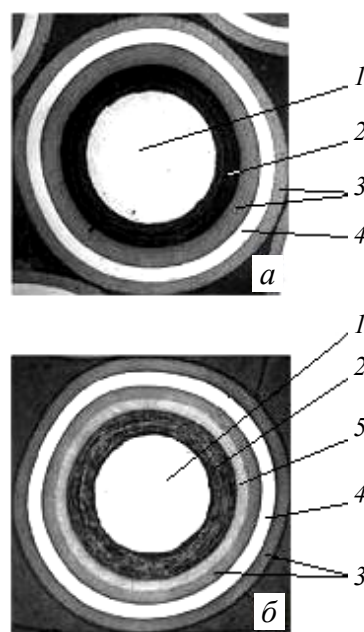
Безопасность ВТГР обеспечивается системой барьеров, ограничивающих выделение радионуклидов из активной зоны в окружающую среду при нормальных режимах эксплуатации и постулируемых проектных авариях. В настоящее время разрабатываются две основные концепции ВТГР: с активной зоной в виде шаровой засыпки и призматического типа с активной зоной, собранной из графитовых блоков. В обоих случаях основными элементами топлива являются микровтэлы.

В проектах ВТГР можно выделить пять принципиально важных барьеров, обеспечивающих удержание радионуклидов, защиту персонала и окружающей среды: топливные керны, покрытия на топливных кернах, матричный графит шаровых твэлов, топливных компактов, графит топливных блоков, герметичный контур теплоносителя, включающий корпус реактора, соединительный корпус и корпус турбомшины, внешняя защитная оболочка реактора с системой специальной вентиляции. Среди перечисленных барьеров определяющее значение имеет многослойное покрытие микровтэлов (рис. 1), в котором, в свою очередь, основная роль отводится слою из карбида кремния.

Способность покрытий удерживать радионуклиды зависит от качества топлива, под которым подразумевают минимальный статистический разброс заданных характеристик большого массива микровтэлов, например, для проектируемого ГТ-МГР [1] их число в активной зоне составляет $\sim 10^{10}$, а также их максимально возможную стабильность в процессе выгорания топлива. Основными повреждающими факторами для покрытий микровтэлов являются высокая температура топлива, флюенс быстрых

нейтронов, интенсивность облучения, энергонапряженность, глубина выгорания, химическое воздействие продуктов деления, рост внутреннего давления СО и газообразных продуктов деления и др. Роль большинства перечисленных факторов может варьироваться при изменении конструкции топлива, включающей изменение размеров и состава керна и покрытий микровтэлов.

Основными источниками образования продуктов деления являются делящееся топливо, а также загрязнение радионуклидами покрытия микровтэлов и графитовой матрицы шаровых



Р и с. 1. Конструкции микровтэлов с четырехслойным покрытием TRISO (а) и дополнительным слоем пироуглерода средней плотности (б): 1 — топливный kern; 2 — буферный слой из низкоплотного пироуглерода; 3 — внутренний и наружный слой из плотного пироуглерода; 4 — слой из карбида кремния; 5 — дополнительный пироуглеродный слой средней плотности

твэлов или компактов. Пути выхода радионуклидов в теплоноситель зависят от места их образования и типа активной зоны, например, массоперенос через топливный керн, покрытие микротвэла (целое или поврежденное), диффузия через графитовую матрицу шарового твэла или компакта, испарение с поверхности шарового твэла или диффузия через графитовый блок (для активной зоны призматического типа) к каналу для теплоносителя. Для различных проектов ВТГР относительное содержание урана в покрытии $U_{\text{своб}}/U_{\text{общ}}$ задается в определенных пределах, но не более 10^{-4} . Исследования показали, что причиной загрязнения покрытий топливным материалом является испарение, а не диффузия из топливного керна, описываемая уравнением Фика. Загрязнение матрицы шаровых твэлов или компактов происходит как при изготовлении, так и в результате испарения урана из микротвэлов с поврежденным покрытием. При этом загрязнение ураном матрицы не должно превышать 10^{-5} .

На начальном этапе выгорания, когда доля поврежденных микротвэлов небольшая ($\leq 10^{-5}$), утечка продуктов деления зависит от количества топлива без покрытия, т.е. определяется уровнем загрязнения внешнего слоя покрытий и матричного графита. На последующих стадиях облучения утечка продуктов деления определяется долей микротвэлов с поврежденным покрытием и к концу кампании может составить до 10^{-2} (утечка из исходных ядер без покрытий). Таким образом, предел эксплуатационных возможностей микротвэлов определяется долей частиц, имеющих поврежденное покрытие на стадии изготовления, и темпом образования дополнительных дефектов в ходе ресурсного облучения топлива.

При облучении в микротвэлах происходят физические и химические процессы, которые могут вызвать разрушение слоев покрытия, включая слой из карбида кремния. Можно выделить четыре основных фактора, вызывающих разрушение покрытий: радиационное повреждение за счет прямой бомбардировки покрытия продуктами деления, развитие механических напряжений в слоях покрытия, химическое взаимодействие продуктов деления, а также СО и СО₂ с материалами покрытий, амеба-эффект — смещение топливного керна от центрального положения, его проникновение сквозь слои из пироуглерода вплоть до прямого контакта со

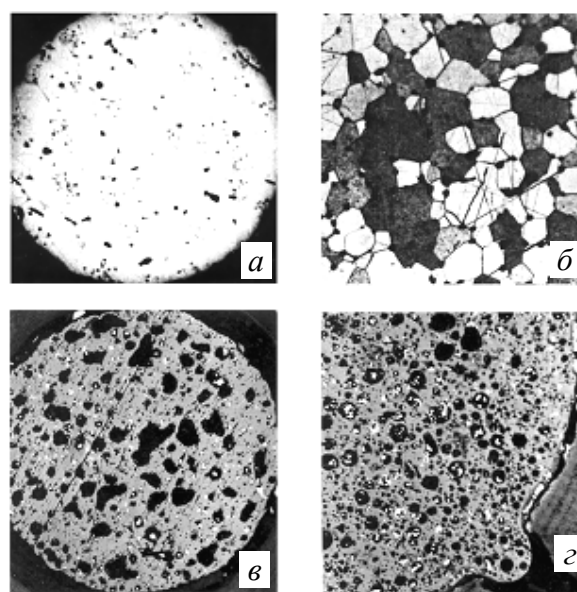
слоем карбида кремния (при наличии градиента температуры по диаметру микротвэла).

Функции барьеров и требования к ним.

Понимание функций и требований, предъявляемых к различным конструктивным элементам микротопливных частиц, а также знание свойств материалов и их изменений в процессе облучения позволяют сформулировать требования к процессам получения ядер, осаждения покрытий и адекватно моделировать поведение топлива в процессе эксплуатации. Исследованию некоторых из перечисленных процессов и посвящена настоящая статья.

Топливный керн помимо выполнения своей основной функции должен обеспечивать максимальное удержание газообразных и твердых продуктов деления, а также достаточно низкий уровень образования свободного кислорода. Эти свойства керна определяются элементным составом, структурой, плотностью, стехиометрией топливного материала. Основные требования, предъявляемые к ядрам из оксида урана: плотность $\geq 10,4$ г/см³, кислородный потенциал $\leq 2,001$, коэффициент несферичности (отношение максимального диаметра частицы к минимальному) $\leq 1,05$.

Топливный керн при выгорании претерпевает значительные структурные изменения (рис. 2). Изменяется элементный состав, особенно при глубоком выгорании. В оксидном топливе изменяется кислородный потенциал. Продукты деления занимают больший объем по сравнению с исходными ядрами, что приводит к



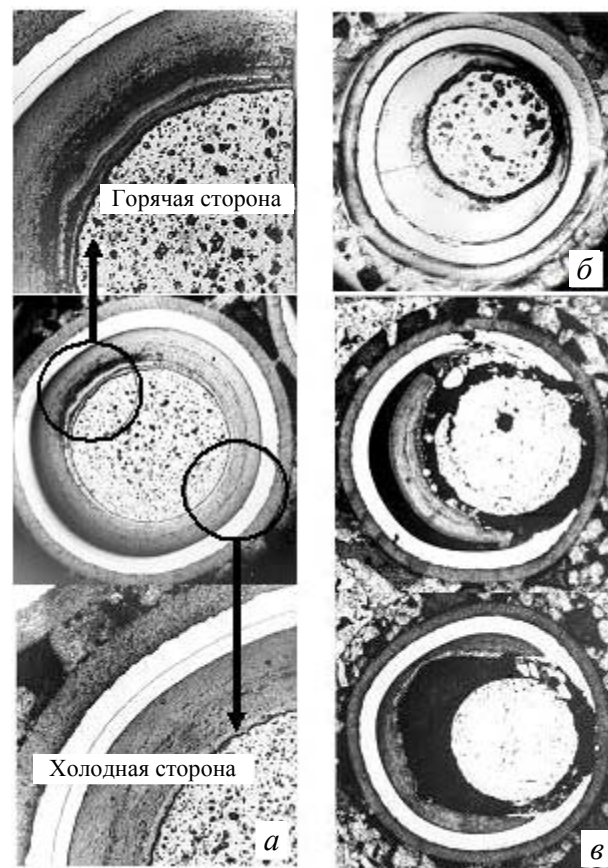
Р и с. 2. Макро- и микроструктура ядер до (а, б) и после облучения (в, г)

распуханию топлива. По разным оценкам объемное распухание топливных кернов за счет накопления твердых продуктов деления составляет 0,4—1% на 1% выгорания [2]. Перестройка структуры, образование газообразных продуктов деления и СО, формирование и слияние пор приводят при глубоком выгорании к образованию газовых полостей, на внутренних поверхностях которых накапливаются твердые продукты деления [3]. Сферическая форма полостей указывает на пластическое состояние топлива и наличие высокого давления в порах и полостях, что приводит к газовому распуханию топливных материалов (UO_2 , PuO_{2-x} , смешанное оксидное) [4].

В оксидном топливе в результате деления высвобождается кислород. Свободный кислород влияет на образование СО, CO_2 , химическую форму существования продуктов деления и соответственно их подвижность и воздействие на покрытия. Средний выход атомов кислорода на один акт деления ^{235}U в зависимости от температуры облучения при 1000, 1200, 1400, 1600 °С составляет 0,002, 0,0092, 0,031, 0,076 соответственно. Накопление плутония в топливе UO_2 повышает выход свободного кислорода на одно деление, что необходимо учитывать для топлива с глубоким выгоранием.

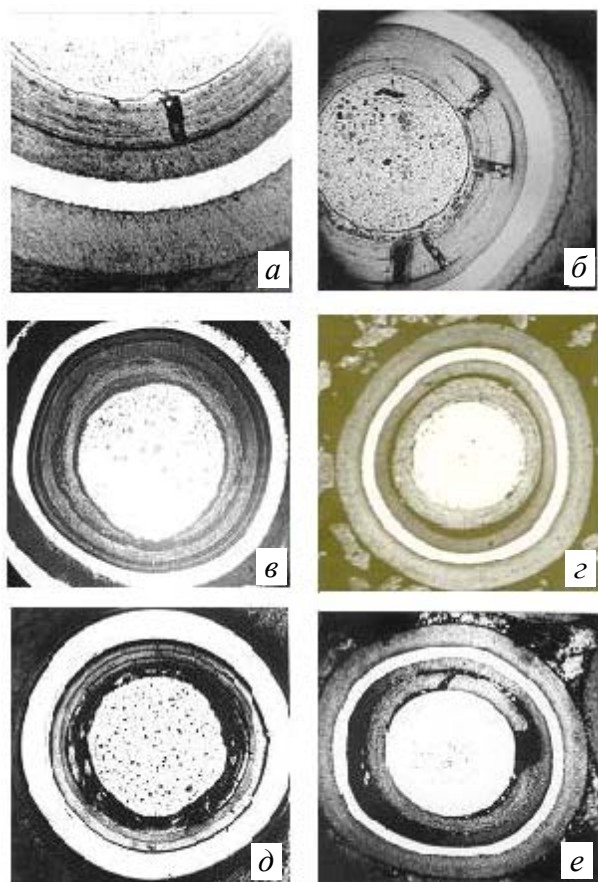
При наличии градиента температуры часто наблюдается смещение зерна, которое называют амеба-эффектом. Зерно смещается в сторону более горячей области (рис. 3, а), может проникать сквозь пироуглеродные слои покрытия вплоть до слоя из карбида кремния (рис. 3, б) и дальше за его пределы (рис. 3, в). Снижение начального кислородного потенциала топливного зерна вызывает уменьшение внутреннего давления в микровзлах за счет реакции $2\text{C} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CO}$, уровня химического разрушения внутренних пироуглеродных слоев, опасности протекания амеба-эффекта, риска химического разрушения слоя из карбида кремния оксидом или диоксидом углерода.

Буферный слой из пористого пироуглерода защищает плотные слои от прямой бомбардировки продуктами деления, механического взаимодействия с распухающим зерном, предоставляет свободный объем для образующихся газов. Основное требование, предъявляемое к этому слою, — плотность $\leq 1,1 \text{ г/см}^3$.



Р и с. 3. Смещение зерна (амеба-эффект) в условиях градиента температуры в пределах от буферного (а) до карбидокремниевый (б), разрушение карбидокремниевый слоя покрытия (в)

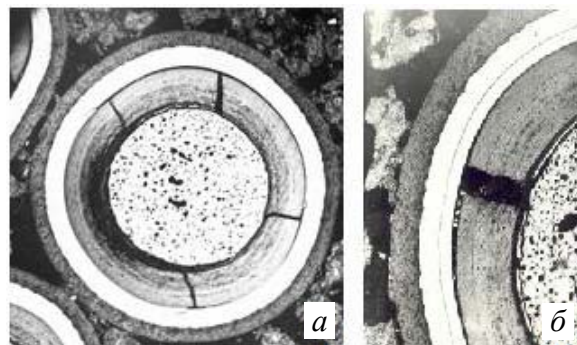
При облучении структура буферного слоя претерпевает значительные изменения. Зоны, прилегающие к топливному зерну, подвергаются разрушению за счет бомбардировки ядрами отдачи и, по-видимому, при высоком выгорании имеют аморфную структуру. В периферической области происходит перестройка структуры под действием быстрых нейтронов ($E > 0,18 \text{ МэВ}$), которая приводит к усадке и уплотнению материала. Радиационная усадка, в свою очередь, инициирует развитие механических растягивающих напряжений, которые приводят во многих случаях к радиальному (рис. 4, а, б) или тангенциальному (рис. 4, в) растрескиванию этого слоя. При небольшом выгорании часто наблюдается отделение буферного слоя от внутреннего плотного слоя из пироуглерода с образованием радиального зазора между ними (рис. 4, г) или расслоение буферного слоя (рис. 4, д). Радиальные трещины вследствие продолжающейся усадки фрагментов буферного слоя и взаимодействия с кислородом, выходящим из зерна, преобразуются в широкие каналы, открывающие



Р и с. 4. Структурные изменения в буферном слое: образование единичных радиальных трещин (а), радиальное растрескивание и фрагментация (б), тангенциальное растрескивание (в), отслоение от внутреннего плотного слоя покрытия (г), расслоение (д), образование сквозных каналов (е)

прямой доступ продуктов деления к внутреннему плотному слою из пироуглерода (рис. 4, е).

Наиболее наглядно механизм распространения радиальной трещины демонстрируют результаты керамографических исследований облученных микротрещин с высокотемпературными пироуглеродными слоями, в которых между буферным слоем и внутренним слоем из плотного пироуглерода размещается подслой из пироуглерода плотностью $1,4\text{--}1,5\text{ г/см}^3$. Введение плавного перехода плотности между буферным слоем и внутренним слоем из плотного пироуглерода приводит к тому, что радиальные трещины, зарождающиеся в буферном слое, свободно распространяются в радиальном направлении и разрушают внутренний плотный слой (рис. 5, а). После прохождения трещины через буферный и внутренний плотный пироуглеродные слои до слоя карбида кремния трещина раскрывается. По мере роста флюенса быстрых нейтронов края

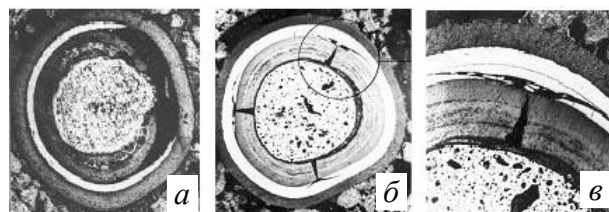


Р и с. 5. Прохождение трещин сквозь буферный и внутренний плотный пироуглеродные слои (а) и образование сквозного канала до карбидокремниевого слоя (б)

трещины еще больше расходятся из-за радиационной усадки пироуглерода, в результате чего образуется сквозной канал между керном и слоем из карбида кремния (рис. 5, б). После образования такого канала продукты деления и оксид углерода получают свободный доступ к слою из карбида кремния, вызывая его локальную коррозию (рис. 6, а). Кроме того, такие трещины действуют как концентраторы напряжений и способны при определенных условиях вызвать разрушение слоя из карбида кремния (рис. 6, б, в).

Разрушение буферного слоя на начальной стадии облучения может быть обусловлено возникновением значительных термических напряжений из-за радиального перепада температуры. Перепад температуры, в свою очередь, определяется удельной мощностью тепловыделения в топливном керне. Повышенный градиент температуры приводит к множественному растрескиванию буферного слоя, что необходимо учитывать при выборе регламента вывода реакторной установки на мощность.

Внутренний слой из плотного изотропного пироуглерода выполняет следующие функции: защищает топливный керн от проникновения хлора при осаждении слоя карбида кремния, служит основой (подложкой) при осаждении слоя карбида кремния, создавая в нем сжимающие напряжения, является дополнительным барьером для продуктов деления, предохраняет



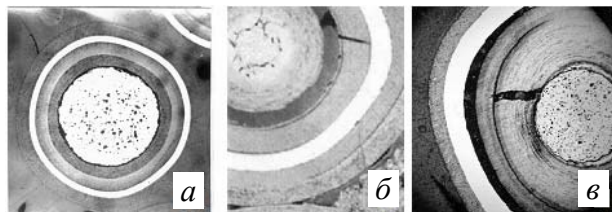
Р и с. 6. Локальная коррозия (а), разрушение карбидокремниевого покрытия вблизи вершины трещины (б, в)

слой карбида кремния от воздействия продуктов деления, а также СО и СО₂. Основные требования к внутреннему плотному слою пироуглерода таковы: низкая исходная анизотропия ($\leq 1,05$), непроницаемость для газов (требование к плотности), сохранение целостности при облучении для защиты карбидокремниевого слоя от агрессивного воздействия топлива, продуктов деления и оксида углерода (требование к прочности и анизотропии).

Важнейшей характеристикой пироуглеродных покрытий являются радиационные размерные изменения, которые непосредственно связаны со структурными изменениями, происходящими в пироуглероде при облучении быстрыми нейтронами [2, 4, 5]. Радиационные размерные изменения могут в 10 раз превышать предельную деформацию при упругом нагружении и имеют анизотропный характер с двумя выделенными направлениями: параллельное и перпендикулярное по отношению к плоскости осаждения. Интенсивность изменения радиационных размерных изменений и степень их анизотропии зависят от температуры облучения и начальной структурной анизотропии пироуглерода. На ранних стадиях облучения рост размера кристаллитов компенсируется пористостью, что вызывает уплотнение слоя и фактически изотропную усадку. Чем меньше начальная плотность, тем больше уплотнение на начальных стадиях облучения.

Поскольку внутренний плотный слой пироуглерода жестко сцеплен со слоем карбида кремния (прочность связи оценивается на уровне ~ 20 МПа), то в нем развиваются растягивающие напряжения, которые могут привести к различным вариантам поведения: слой сохранит целостность (рис. 7, а), произойдет разрушение этого слоя (рис. 7, б), частичное или полное отслоение внутреннего плотного слоя пироуглерода от слоя из карбида кремния (рис. 7, в).

Первые два варианта свидетельствуют о том, что разрушение внутреннего слоя из плот-



Р и с. 7. Поведение внутреннего слоя плотного пироуглерода при облучении: а — слой сохраняет целостность; б — растрескивание слоя; в — отслоение (локальное или полное) от слоя из карбида кремния

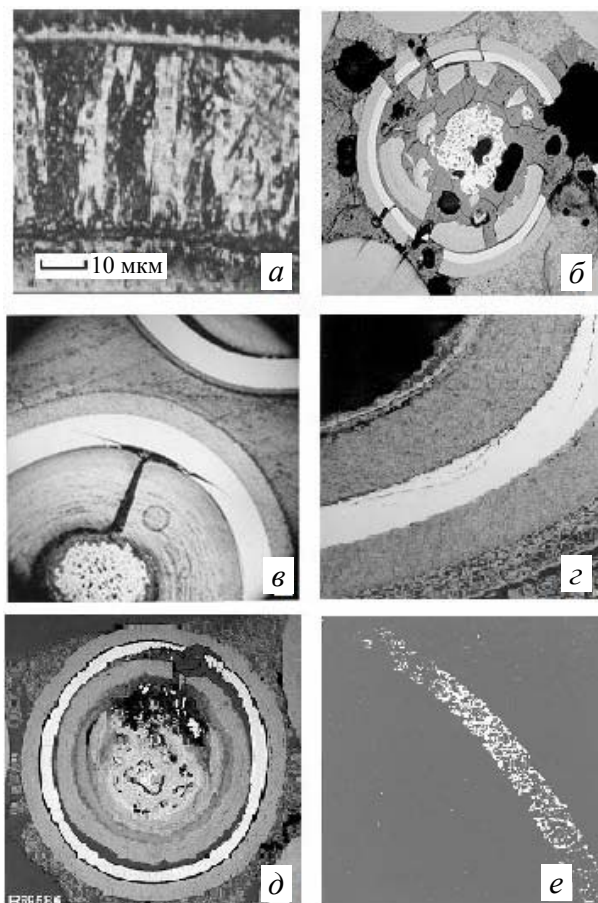
ного пироуглерода (и остальных слоев покрытия) имеет случайный характер. Пироуглерод является хрупким материалом, и его характеристики прочности подчиняются распределению Вейбулла. Третий вариант поведения является наиболее сложным с точки зрения интерпретации результатов. Очевидно, что отслоение, как и разрушение, является случайным процессом, который может быть обусловлен локальным отклонением свойств или геометрии покрытия. Появление дефектов, показанных на рис. 7, б, в, вызовет перераспределение напряжений во всех слоях покрытия микротрещла и изменение конечной суммарной вероятности его разгерметизации.

Слой из карбида кремния является основным силовым слоем, определяющим прочность всего покрытия, а также основным диффузионным барьером, удерживающим фактически все продукты деления, возможно, за исключением изотопов серебра, сведения о диффузии которых в карбиде кремния противоречивы.

Основные требования к слою из карбида кремния: плотность $\geq 3,2$ г/см³, кубическая модификация кристаллической структуры (β -карбид кремния) с периодом решетки $a = 0,4360 \pm 0,0001$ нм, массовая доля свободного кремния менее 0,02%, хлора — не более 0,003%, размер зерна 3—5 мкм (рис. 8, а), высокие характеристики прочности (медианный предел прочности при растяжении > 350 МПа) во всем диапазоне температуры, выгорания и флюенса быстрых нейтронов, низкий коэффициент диффузии продуктов деления во всех температурных режимах.

Реакторные исследования показали высокую стабильность карбида кремния под облучением в диапазоне температуры, характерной для ВТГР (900—1400 °С). Не выявлено наличие существенных размерных изменений и деформации ползучести [6].

Исследования во многом подтвердили ранее полученные результаты. Структурные изменения β -карбида кремния при облучении являются функцией температуры и флюенса. При температуре ниже 800 °С наблюдается образование дефектов типа «черное пятно» и дислокационных петель Франка небольшого размера. Характер повреждения структуры одинаков при облучении нейтронами и ионами. С увеличением флюенса начальные точечные дефекты объединяются сначала в петлевые дефекты Франка и



Р и с. 8. Структурные изменения и механизмы разрушения карбидокремниевых слоев: *а* — исходная микроструктура; *б* — разрушение от внутреннего давления; *в* — разрушение от воздействия трещины в пироуглеродных слоях; *г* — влияние искажения формы (несферичность); *д* — локальная коррозия; *е* — термическое разложение при высокой температуре

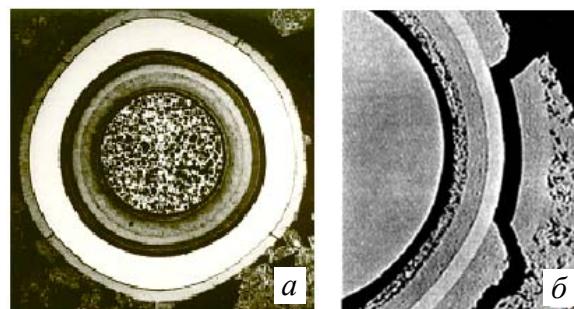
при большом флюенсе в сетки дислокаций. При температуре облучения выше 1000 °C наблюдается образование пор на субграницах зерен и дефектах кристаллической решетки. Образование пор приводит к распуханию карбида кремния, однако размер этого распухания незначителен [7].

Можно выделить три основных механизма разрушения (потери герметичности) слоя из карбида кремния: развитие механических напряжений, коррозия и термическое разложение. Основным источником опасных механических напряжений в карбидокремниевом слое покрытия является нарастающее с выгоранием топлива внутреннее давление в микротвэлах (см. рис. 8, *б*). Разрушение карбидокремниевых слоев может быть также спровоцировано расстрескиванием внутренних пироуглеродных слоев (см. рис. 8, *в*) и отклонением микротвэлов от идеальной сферической симметрии (см. рис. 8, *г*).

Коррозионное повреждение данного слоя происходит вследствие химического взаимодействия с продуктами деления (палладий, редкоземельные элементы, цезий и др.), а также с CO и CO₂ (см. рис. 8, *д*). При высокой температуре (более 1600 °C) наблюдается термическое разложение карбида кремния (см. рис. 8, *е*).

Наружный слой из плотного изотропного пироуглерода защищает слой из карбида кремния от механических повреждений при прессовании компактов и шаровых твэлов, создает в нем сжимающие напряжения при облучении и является дополнительным диффузионным барьером для продуктов деления. Поведение данного слоя в основном аналогично поведению внутреннего плотного пироуглеродного слоя. Под действием быстрых нейтронов в нем развиваются анизотропные радиационные размерные изменения, которые приводят к возникновению растягивающихся напряжений и соответственно его возможному разрушению. Разрушение за счет высоких растягивающих напряжений из-за радиационной усадки, когда плотность слоя в исходном состоянии была более 2 г/см³, проиллюстрировано на рис. 9, *а*. При высокой пористости данного слоя причиной разрушения может быть взаимодействие с матричным графитом (рис. 9, *б*). При разрушении внутренних слоев наружный слой из плотного пироуглерода может служить герметичной оболочкой по отношению к газообразным продуктам деления.

Математические модели и расчетные коды поведения микротвэлов. Большинство математических моделей и расчетных кодов для моделирования поведения микро топлива при нормальных условиях были разработаны в 1960—1970-е годы. В табл. 1 приведены характеристики наиболее известных кодов, предназначенных для моделирования поведения и прогнозирования ресурса топлива ВТГР [8—22].



Р и с. 9. Разрушение наружного слоя из плотного пироуглерода от радиационной усадки (*а*) и взаимодействия с матричным графитом (*б*)

Анализ данных табл. 1 показывает, что все основные разрабатываемые в настоящее время коды строятся на базе моделирования термомеханического поведения микротвэла. Термомеханический модуль учитывает основные процессы, влияющие на развитие напряжений и деформаций в микротвэле, включая радиационные размерные изменения и радиационную ползучесть пироуглеродных слоев. В коде PARFUME (США) [19] в качестве основы используется универсальный конечно-элементный код, что позволяет рассматривать различные механизмы разрушения покрытий, включая образование трещин, расслоение покрытия и отклонение от сферической симметрии.

К базисному термомеханическому модулю в дальнейшем подключаются блоки, моделирующие поведение топливного зерна и продуктов деления (распухание, образование, диффузия и выход газообразных продуктов деления из топливного зерна под оболочку). Затем вводится учет статистической неопределенности параметров микротвэлов и условий облучения. В дальнейшем подключаются модули, отвечающие за химическое повреждение покрытий и перенос продуктов деления в микротвэле и топливном компакте (шаровом твэле). Конечными выходными данными являются доля микротвэлов с разгерметизировавшимся покрытием и доля продуктов деления, вышедших из топливного элемента. Таким образом, общей тенденцией в настоящее время является разработка интегральных кодов, которые представляют собой комплекс взаимозависимых модулей, определяющих термомеханические, химические и диффузионные процессы.

Основная цель расчетного моделирования — оценить выход радионуклидов в теплоноситель. Принимается, что микротвэлы со сквозным повреждением покрытия являются основным источником загрязнения. Повреждение покрытий обуславливается развитием механических напряжений, химическим взаимодействием с продуктами деления, высокой температурой и радиационными повреждениями, вызывающими деградацию свойств материалов покрытия.

Математическая модель и расчетный код GOLT (Россия) [22]. Для моделирования поведения микротоплива при облучении во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара в настоящее время разрабатываются вероятностно-статистическая модель и код GOLT. Изначально предусматри-

валось, что разрабатываемая модель должна быть применимой для нормальных и аварийных условий облучения, что позволяет моделировать аварийные ситуации при различных начальных условиях — как на начальных стадиях облучения, так и при большом выгорании и флюенсе быстрых нейтронов. Модель должна учитывать как можно большее число значимых механизмов разрушения покрытия и быть пригодной для использования в составе интегральной, рассчитывающей разрушение покрытия и выход продуктов деления из микротвэлов по другим механизмам (диффузия, коррозия).

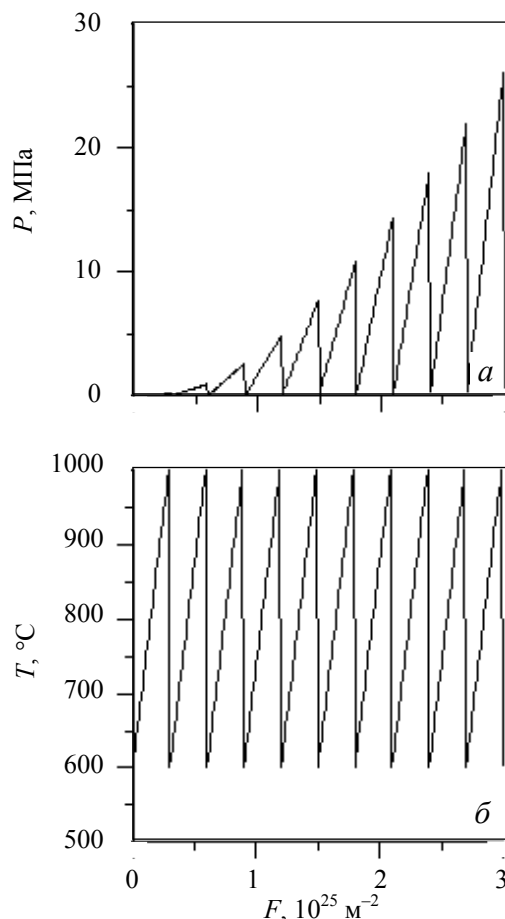
В последней версии кода GOLT-v3 [23] учитываются все основные радиационные, термомеханические и некоторые химические и термические процессы, которые позволяют достаточно адекватно моделировать поведение микротоплива как при нормальных условиях облучения, так и при возникновении аварийных ситуаций. Наиболее значимые из них — распухание зерна и возможность его силового воздействия на покрытие с разрушением по механизму зерно—покрытие—механический контакт, образование газообразных продуктов деления и их выход под оболочку, образование СО и СО₂ в микротвэлах с оксидными зернами, анизотропные радиационные размерные изменения в пироуглеродных слоях, включая буферный, радиационная ползучесть пироуглеродных слоев, разрушение внутренних плотных слоев из пироуглерода с расчетом вероятности этих процессов и поведение микротвэла с разрушенными пироуглеродными слоями, статистический разброс свойств, конструкционных и эксплуатационных параметров с использованием метода Монте-Карло, термическое разложение и коррозионное воздействие продуктов деления на карбидокремниевый слой. Этот перечень не является полным, так как код находится в стадии развития. В дальнейшем в него войдут модели, учитывающие такие эффекты, как уплотнение буферного слоя, частичное расслоение покрытия, различные виды отклонений от сферической симметрии.

Верификация кода GOLT. Важнейшим этапом в разработке расчетных кодов является получение доказательства правильности их расчета во всем диапазоне используемых параметров, т.е. верификация. Верификация кода GOLT проводится по двум направлениям: расчетное тестирование и сравнение расчетных результатов с экспериментальными данными. В настоящее время в рамках программы координационно-исследовательского проекта МАГАТЭ «Успехи в разработке топлива ВТГР» (Advances in HTGR Fuel Technology CRP-6) проводится сравнительная характеристика 12 кодов девяти стран, предназначенных для моделирования поведения топлива ВТГР.

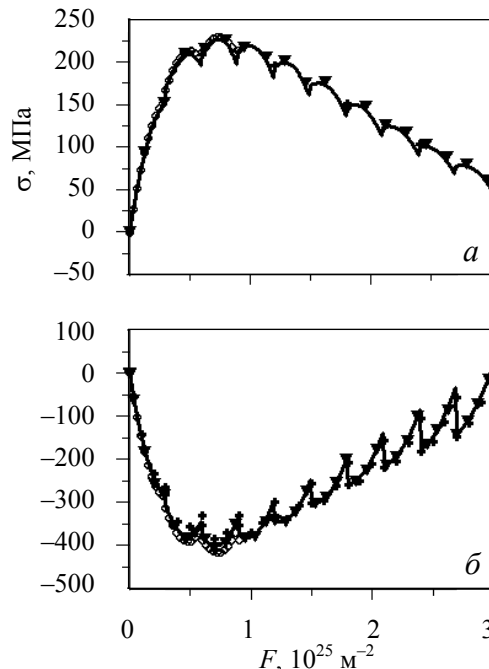
Для проведения тестовых сравнительных расчетов при нормальных условиях облучения ($t_{\text{обл}} < 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$) была разработана матрица исходных данных о свойствах материалов, конструкции микротвэлов и условий их облучения. Всего было рассмотрено 11 гипотетических вариантов, четыре варианта расчетов поведения топлива при радиационных испытаниях, проведенных в 1980—1990 гг. (HRB-22, HFR-K3, HFR-P4, NPR-1A), и два варианта расчетов прогнозирования поведения микро топлива в ходе проводившихся в это время и будущих реакторных испытаний (HFR-EU1 и HFR-EU2).

В качестве примера приведем результаты бенчмарк-расчетов для одного из вариантов (Case-8). В этом примере задавалось циклическое изменение внутреннего давления в микротвэлах (рис. 10, а) и температуры топлива (рис. 10, б), что моделирует условия облучения в ВТГР с шаровой засыпкой и многократным прохождением твэлами активной зоны. Результаты расчетов представлены на рис. 11. Некоторые коды, включая STRESS3- STAPLE (Великобритания) [17], ATLAS (Франция) [18], PARFUME (США) [19], а также GOLT показали почти совпадающие результаты.

Один из вариантов предусматривал прогнозирование поведения топлива при реакторных испытаниях в эксперименте HFR-EU1 [24]. Этот эксперимент был проведен в высокопоточном реакторе HFR в Петтене (Нидерланды), где облучили три графитовых шаровых твэла обогащением 16,7% производства Германии (AVR GLE-4) и два шаровых твэла обогащением 17,08%, изготовленных в Китае (INET). Испы-



Р и с. 10. Зависимость внутреннего давления (а) и температуры (б) от флюенса быстрых нейтронов в бенчмарк-расчетах по варианту Case-8



Р и с. 11. Зависимость максимального напряжения во внутреннем плотном слое пироуглерода (а) и слое из карбида кремния (б) от флюенса быстрых нейтронов в варианте Case-8, рассчитанная с помощью кода PARFUME (США) (●), ATLAS (Франция) (▼), STRESS3-STAPLE (Великобритания) (+), GOLT (Россия) (—)

Таблица 3. Экспериментальная и расчетная с помощью кодов PARFUME и GOLT доля микротрещин с разрушенным слоем покрытия в эксперименте NPR

Эксперимент	Объем выборки, число твэлов	Доля разрушенных, %	Доверительный интервал при уровне значимости 0,05	Расчет с помощью кода		
				PARFUME	PARFUME при удвоенном коэффициенте ползучести	GOLT
	Внутренний плотный пироуглеродный слой					
NPR-2 A4	83	65	54—76	100	99,6	50
NPR-1 A5	39	31	17—47	100	34	23
NPR-1 A8	53	6	2—16	100	94	50
NPR-1A A9	17	18	5—42	100	15	15
	Карбидокремниевый слой					
NPR-2 A4	287	3	2—6	40,7	2,2	0,45
NPR-1 A5	178	0,6	0—3	16,1	0,2	0,32
NPR-1 A8	260	0	0—2	33,4	1,4	0,07
NPR-1A A9	83	1	0—5	10,8	0,04	0,01

гов обрабатываются.

Наиболее близким по режимам эксплуатации и некоторым параметрам конструкции к ос-

NPR-1A A9	1,9	1052	64
-----------	-----	------	----

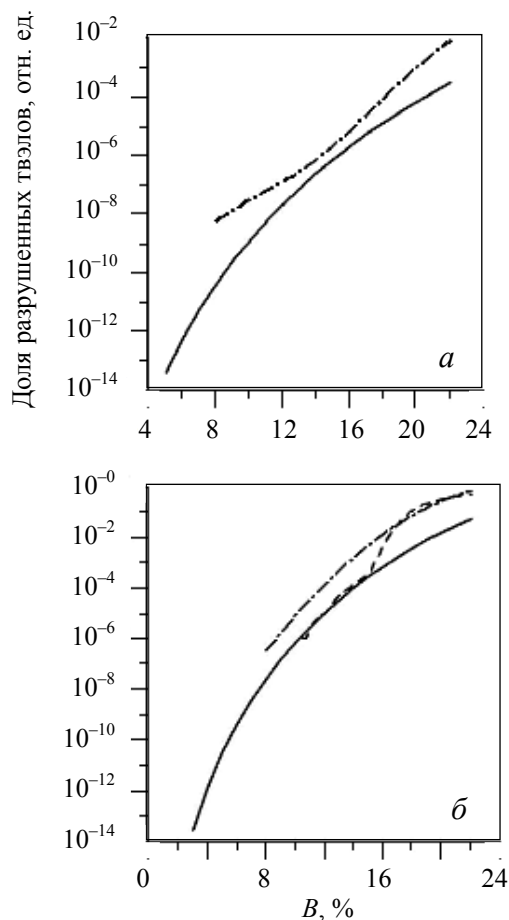


Рис. 12. Зависимость доли микротрещин с поврежденным покрытием от выгорания в эксперименте HFR-EU1 при температуре облучения 950 (а) и 1100 °С (б), рассчитанная по программе PANAMA (Германия) (—), STRESS3-STAPLE (Великобритания) (---), GOLT-v1 (Россия) (- · -)

Как можно видеть из представленных данных, в некоторых случаях получено удовлетворительное соответствие экспериментальных и расчетных результатов. Следует отметить, что при расчете с помощью кода GOLT принимали температурную зависимость коэффициента ползучести пироуглерода [27]. Код PARFUME для лучшего удовлетворения экспериментальным данным о разрушении слоя из пироуглерода потребовал корректировки коэффициента ползучести. В то же время он показал более близкую к экспериментальным данным вероятность разрушения слоя из карбида кремния. Металлографические исследования микротрещин не могут дать статистически надежные данные, поэтому результаты сравнения являются лишь оценкой. Тем не менее можно отметить, что код GOLT показал удовлетворительное соответствие расчетных и экспериментальных результатов. Работа по его верификации в настоящее время продолжается.

Заключение. Важнейшим барьером, обеспечивающим высокую степень безопасности ВТГР, а также достижение требуемых эксплуатационных параметров, включая высокую температуру гелия на выходе (до 1000 °С), является многослойное покрытие микротрещин. Накопленный в НПО «Луч» опыт изготовления топлива для ВТГР в полной мере используется при разработке топлива ГТ-МГР. Расчетное моде-

лирование поведения микротопливных частиц в условиях реакторного облучения позволяет выбрать оптимальные конструкционные параметры топлива, прогнозировать его ресурс, планировать реакторные испытания. Во ВНИИНМ им. А.А. Бочвара разрабатывается код GOLT, основная цель которого состоит в поддержке разработки топлива для ГТ-МГР. Код протестирован на задачах, имеющих аналитическое решение (упругие, термоупругие, вязкоупругие) и показал хорошее согласие с результатами реакторных испытаний NPR. Почти полное совпадение результатов, полученных с помощью кода GOLT и разработанных в других странах, подтвердило правильность выбора основных термомеханических моделей. В настоящее время завершается разработка версии кода GOLT для моделирования поведения и оценки выхода продуктов деления при аварийных условиях. Полученные первые результаты коррелируют с экспериментальными данными термических испытаний облученного микротоплива. Для расчетных исследований проблем, связанных с несферичностью реальных микротвэлов, в настоящее время используется независимый конечно-элементный код. В дальнейшем предполагается подключить его к коду GOLT в качестве дополнительного термомеханического модуля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Черников А.С., Пермяков Л.Н., Курбаков С.Д. и др. Ядерное топливо для ВТГР на основе микросфер из оксида плутония. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 1, с. 35—38.
2. Котельников Р.Б., Башлыков С.Н., Каштанов А.И., Меньшикова Т.С. Высокотемпературное ядерное топливо. М.: Атомиздат, 1978. 432 с.
3. Дегальцев Ю.Г., Пономарев-Степной Н.Н., Кузнецов В.Ф. Поведение высокотемпературного ядерного топлива при облучении. М.: Энергоатомиздат, 1987. 208 с.
4. Джадд А. Реакторы-размножители на быстрых нейтронах. Пер. с англ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 136 с.
5. Черников А.С., Шокина З.А., Столяров В.И. Радиационное поведение микротвэлов и твэлов реакторов НТГ. Обзор. М., ЦНИИатоминформ, 1985. 124 с.
6. Price R. Properties of silicon carbide for nuclear fuel particle coatings. — Nucl. Technol., 1977, v. 35, p. 320—336.
7. Katoh Y., Nashimoto N., Kondo S. e.a. Microstructural development in cubic silicon carbide during irradiation at elevated temperatures. — J. Nucl. Mater., 2006, v. 351, p. 228—240.
8. Prados J., Scott I. The influence of pyrolytic carbon creep on coated particle fuel performance. — Nucl. Appl., 1967, v. 3, p. 488—491.
9. Kaae J. A mathematical model for calculating stresses in a four-layer carbon-silicon-carbide coated fuel particle. — J. Nucl. Mater., 1969, v. 32, p. 322—329.
10. Walther H. On mathematical models for calculating the mechanical behaviour of coated fuel particles. — Nucl. Engng Des., 1972, v. 18, p. 11—39.
11. Martin D. A normally permissible method of simplifying, without any loss in accuracy, the Walther model for calculating the mechanical performance of coated fuel particles. — Ibid., 1974, v. 30, p. 73—82.
12. Verfonderen K., Nabielek H. PANAMA. Ein Rechenprogramm zur Vorhersage des Partikelbruchanteils von TRISO-Partikeln unter Stofallbedingungen. Jül-Spez-298, 1985.
13. Covacs W., Bongartz K., Goodin D. High temperature gas-cooled reactor fuel pressure vessel performance models. — Nucl. Technol., 1985, v. 68, p. 344.
14. Bennett R. Finite element stress analysis for coated particle fuel modeling under normal operating conditions. — Ibid., 1991, v. 96, p. 117—122.
15. Miller G., Bennett R. Analytical solution for stresses in TRISO-coated particles. — J. Nucl. Mater., 1993, v. 206, p. 35—49.
16. Sawa K. e.a. Development of coated particle failure model under high burnup irradiation. — J. Nucl. Sci. Technol., 1996, v. 33, № 9, p. 712—720.
17. Martin D.G. Considerations pertaining to the achievement of high burn-ups in HTR fuel. — Nucl. Engng Des., 2002, v. 213, p. 241—258.
18. Philip M., Degeneve G., Michel F. e.a. The ATLAS HTR fuel simulation code objectives, description and first results. — In: Proc. Conf. on High Temperature Reactors. Beijing, China, 22—24 Sept., 2004. IAEA: Vienna, HTR-2004, p. 1—10.
19. Miller G., Petti D., Varicalle D., Maki J. Statistical approach and benchmarking for modeling of multi-dimension behaviour in TRISO-coated fuel particles. — J. Nucl. Mater., 2003, v. 317, p. 69—82.
20. Пономарев-Степной Н.Н., Сазыкина Т.А., Тихонов Н.И. Методы расчета напряженно-деформированного состояния микротвэлов ВТГР и выбор их конструкции. — Атомная энергия, 1984, т. 56, вып. 2, с. 77—81.
21. Еремеев В.С., Иванова Е.А., Михайлов В.Н. и др. Математическая модель для описания напряжений в микротвэлах. — Там же, 1985, т. 58, вып. 3, с. 189—190.
22. Golubev I., Kadarmetov I., Makarov V. Mathematical model and computer code for coated particles performance at normal operating conditions. — In: Proc. Conf. on High Temperature Reactors. Petten (NL), April 22—24, 2002. Vienna: IAEA, HTR-2002, p. 1—16.

23. **Golubev I., Kadarmetov I.** Current status of development of coated particle performance code GOLT. — In: Proc. Conf. on High Temperature Reactors. Johannesburg, South Africa, October 1—4, 2006, p. B176.
24. **Phelip M.** European programme on HTR fuel technology. — In: Proc. 2 Intern. Top. Meeting on High Temperature Reactor Technology HTR-2004. Beijing, China, Sept. 22—24 2004. Vienna: IAEA, HTR-2006, p. 1—9.
25. **Phelip M., Golubev I., Petti D. e.a.** The CRP-6 benchmark on HTGR fuel behaviour under normal operation. — In: Proc. the Nuclear Fuel and Structural Materials for the Next Generation Nuclear Reactors. Reno, USA, June 6—8, 2006.
26. **Maki J., Petti D., Hobbins D. e.a.** NP-MHTGR Fuel Development Program Results. INEEL/EXT-1268, 2002.
27. **Платонов П.А., Штромбах Я.И., Карпухин В.И. и др.** Действие излучения на графит высокотемпературных газоохлаждаемых реакторов. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Атомно-водородная энергетика и технология, 1984, вып. 6, с. 77—81.

Поступила в Редакцию 2.04.08

УДК 621.039.536

ТЕОРИЯ РАДИАЦИОННО-ИНДУЦИРОВАННОГО ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ГРАФИТА

Панюков С.В. (Физический ин-т им. П.Н. Лебедева), Субботин А.В. (ЗАО НПК «Атомтехпром»)

Графит различных марок, используемый в ядерной технике в качестве одновременно замедлителя и конструкционного материала, подвергается высокодозовому повреждающему радиационному воздействию, в основном, нейтронному. Возникающие при этом в графите радиационно-индуцированные физико-механические и размерные эффекты существенно влияют на его эксплуатационные характеристики.

Детальный анализ таких радиационных эффектов, как формоизменение [1—6], эволюция с дозой облучения модуля упругости [1, 3, 7, 8], коэффициента термического расширения, температуро- и электропроводности, радиационной ползучести и др., позволил сделать вывод, что при прочих равных условиях существенную

Ансамбль микротрещин изначально является следствием сильной анизотропии свойств на уровне микрокристаллита и ослабленной, более или менее переменной на уровне зерна. Под действием облучения ансамбль микротрещин эволюционирует, что в значительной степени и является причиной наблюдаемых радиационных эффектов. На уровне поликристалла в целом радиационные эффекты либо изотропны, либо ортотропны в зависимости от способа получения графита — от изостатического до экструзионного.

Движущей силой всех перечисленных процессов является радиационно-индуцированное изменение формы микрокристаллита, вызываемое развитием в нем микроструктуры, преимущественно в базисной плоскости. Хотя перечисленные эффекты описаны эмпирически и поняты на качественном уровне, теория, позво-

роль играет морфология графита, а для небольших образцов и соотношение размера зерна к минимальному линейному размеру образца [9].

Морфология графита характеризуется двумя главными составляющими — наполнителем и связующим и наличием ансамбля микротрещин и технологических пор [1, 2, 10]. Связующее имеет мелкокристаллическую однородную структуру, наполнитель — иерархическую, в основе которой лежит микрокристаллит с более или менее совершенной кристаллической структурой. Микрокристаллиты образуют различного рода образования — зерна с разной степенью выраженности текстуры, и наиболее типичной является упаковка микрокристаллитов с резко выраженной текстурой [10].

Для описания радиационных эффектов в графите на макроуровне (для поликристалла), отсутствует.

В настоящей работе предлагается теория радиационных эффектов в графите, в основу которой положено радиационно-индуцированное изменение формы кристаллитов, вызывающее эволюцию ансамбля трещин.

Микропористую подсистему графита моделировали ранее численно методом конечных элементов [11—13]. Однако наличие огромного числа параметров и неизвестных функций распределения делает такой подход неконструктивным. Нами предлагается аналитическая модель, в которой на основе рассмотрения ортотропного континуума со случайно расположенными формоизменяющимися включениями (кристаллитами) удалось связать развитие внут-