1557680

На правах рукописи

ЧЕРНЯВСКИЙ Александр Олегович

ПРОЧНОСТЬ ГРАФИТОВЫХ МАТЕРИАЛОВ И КОНСТРУКЦИЙ ПРИ МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИИ

Специальность 01.02.06 "Динамика и прочность машин, приборов и аппаратуры"

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук

Челябинск 1997

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Официальные оппоненты:

Член-корреспондент РАН Махутов Н.А.
Профессор, доктор технических наук Виргильев Ю.С.
Профессор, доктор технических наук Данилов В.Л.

Ведущая организация:

ОКБМ, г. Нижний Новгород

состоится "26" 03 1998 г. в 14^30 на заседании
осковском государственном техническом
а по адресу:

анская ул., д.5

1557680

комиться в библиотеке Московского
о университета им. Н.Э.Баумана.

февраля 1998 г.

Дронг В.И.

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана
1557680
Чернявский А.О. Прочность

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Одним из достаточно распространенных материалов высокотемпературной техники являются неармированные конструкционные графиты. Они характеризуются высокой термостойкостью и ростом статической прочности и пластичности с температурой являясь при температуре выше 2500°С одним из самых прочных известных материалов. Высокая теплопроводность и низкие значения модуля упругости и коэффициента линейного теплового расширения определяют высокую термопрочность графита, то есть способность графитовых деталей работать в условиях неравномерного нагрева и охлаждения. Сочетание этих особенностей с рядом специфических физико-химических свойств — электропроводностью, химической инертностью, малым сечением захвата нейтронов — позволяет изготовлять из графитовых материалов ряд основных элементов атомных реакторов, электроды различного назначения, включая крупногабаритные — диаметром до 1200 мм; катодные блоки электролизеров для производства алюминия; тигли и нагреватели для плавки тугоплавких металлов; сопла реактивных двигателей.

1557680

Искусственный графит относится к малопластичным материалам — предельная деформация при растяжении составляет обычно 0.1 ...0.2%. Диаграммы однократного растяжения большинства конструкционных графитов имеют малую кривизну (кроме верхнего участка) и с достаточной точностью схематизируются линейной зависимостью. Поэтому длительное время графитовые детали рассчитывались в предположении идеальной упругости, а предельным состоянием считалось зарождение трещины или ее достаточно большая протяженность. Нелинейными эффектами и малоцикловой усталостью пренебрегали. Однако экспериментальные исследования последних лет убедительно показали, что даже небольшая кривизна диаграммы деформирования приводит при повторных нагружениях к появлению петель пластического гистерезиса и развитию малоцикловой усталости, особенно отчетливо проявляющихся при повышенных температурах. При этом — в отличие от большинства металлических материалов — процессы циклического неупругого деформирования как правило не стабилизируются, на форму и размеры петель гистерезиса заметно влияет образование и развитие микротрещин. При неизотермическом нагружении существенной — как показали эксперименты — оказалась зависимость коэффициента линейного теплового расширения от истории нагружения. Как и в металлических материалах, наблюдается существенное взаимное влияние процессов пластического деформирования и ползучести. Более глубокое изучение закономерностей этих сложных взаимосвязанных явлений требует развития соответствующих математических

МГТУ
им.Н.Э.Баумана
БИБЛИОТЕКА

моделей. Эта работа не может, однако, быть выполнена в отрыве от анализа поведения конструкций, поскольку проявления свойств материала бесконечны и практический интерес представляют лишь те эффекты, которые могут существенно влиять на прочность конструкций.

С другой стороны, опыт эксплуатации ряда графитовых конструкций указывает на недостаточность традиционного линейного подхода к оценке их прочности. Известно, например, что накопление деформаций, вызванное циклической и термической ползучестью (а также - в реакторных условиях - радиационной ползучестью и радиационными объемными изменениями) лимитирует работу электролизеров производства алюминия и кладки канальных уран-графитовых атомных реакторов. Другой проблемой является появление и развитие трещин при циклическом или однократном нагружении. При эксплуатации атомных реакторов, а также крупногабаритных электродов дуговых сталеплавильных печей наряду с традиционными предельными состояниями наблюдается иногда развитие сеток трещин с последующим выкрашиванием поверхностного слоя. Это новое, не рассматривавшееся ранее предельное состояние, также (наряду с учетом сложных реальных свойств материала) должно учитываться при анализе работоспособности конструкций.

Создание новых, более теплонапряженных, атомных реакторов (ВТГР, где графит благодаря ряду его свойств полностью вытеснил металлические детали в активной зоне), крупногабаритных электродов для дуговых сталеплавильных печей, стремление возможно более полно использовать прочностные ресурсы материала и конструкции, с одной стороны, и рост требований к надежности и долговечности конструкций, с другой, приводят к необходимости исследования процессов нелинейного деформирования и малоциклового разрушения графитовых материалов и разработки более точных и полных, чем существующие, методов прогнозирования процессов достижения предельных состояний конструкций.

Тема диссертации связана с выполнением

- постановления Правительства №017 от 16.01.86 о работах по высокотемпературным реакторам с газовым теплоносителем и приказа по Министерству атомной энергетики и промышленности СССР №046 от 28.02.86;
- комплексной программы фундаментальных исследований проблем машиностроения, механики и процессов управления "Машиностроение и технология" Уральского отделения РАН (научное направление 1.10)
- межвузовской научно-технической программы «Динамика, прочность и надежность машин, приборов и конструкций» (1993-97 г.), раздел «Прочность конструкций, работающих в условиях теплосмен»
- грантов Минобразования РФ (1996-97 г.): "Разработка математических моделей и программного обеспечения для анализа деформирования и

разрушения графитовых деталей ЯЭУ на стадии проектирования" и "Анализ развития сеток разгара и выкрашивания поверхности теплонапряженных элементов металлургического и энергетического оборудования"

- хоздоговоров, заключенных ЧГТУ с ОКБМ (г. Нижний Новгород), НИКИЭТ (Москва), ИАЭ им. И.В.Курчатова (Москва), ГосНИИЭП (Челябинск).

Цель работы. Совокупность перечисленных выше проблем определила содержание данной работы. Она посвящена изучению деформирования и разрушения графитовых конструкций при длительном малоцикловом нагружении, в том числе на стадии живучести (в процессе роста трещин), и включает несколько взаимосвязанных частей: исследование деформирования и разрушения материала и его математическое моделирование, анализ не изученных ранее механизмов разрушения конструкций, разработку методов расчета, учитывающих особенности поведения материала и специфические механизмы разрушения, и, наконец, нормирование этих методов. Широта круга рассматриваемых вопросов связана с тем, что в графитовых конструкциях — в отличие от металлических — проблема выделения существенных и несущественных факторов при расчете исследована пока недостаточно.

Научная новизна работы.

1. Разработана математическая модель процессов деформирования графита, использующая, наряду с результатами механических испытаний, информацию о составе и свойствах структурных составляющих материала. В отличие от аналогичных моделей металлических материалов и керамик, модель учитывает существенную микроанизотропию и микронеоднородность графита и рассеянное разрушение, и на этой основе обеспечивает существенно более точное прогнозирование деформационных свойств графита при повторно-переменном длительном неизотермическом нагружении.

2. Для широкого круга программ нагружения установлено, что история нагружения и рассеянное разрушение существенно влияют на нелинейность диаграмм деформирования, образование и изменение петель гистерезиса циклическую ползучесть, взаимодействие процессов циклического деформирования и ползучести, накопление деформаций и тепловое расширение неармированных конструкционных графитов. Получены количественные оценки этого влияния.

3. Проведенный с помощью предложенной модели материала анализ влияния нелинейности процессов (нерадиационного) деформирования графитов на напряженно-деформированное деформированное состояние типовых графитовых конструкций впервые показал (на примере графитовых дисков, используемых в испытаниях на термопрочность, крупногабаритных электродов дуговых сталеплавильных печей и блоков установки "Графитовая колонна", моделирующей кладку реактора РБМК), что учет специфических нелинейных

эффектов деформирования графитов, не принимавшихся ранее во внимание, существенно влияет на результаты расчета напряженно-деформированного состояния и последующий прогноз долговечности конструкций.

4. Разработаны методы и средства расчетного анализа не учитывавшегося ранее в расчетах на прочность специфического предельного состояния теплонапряженных конструкций: прогрессирующего разрушения поверхностного слоя вследствие роста сеток трещин и связанного с ним выкрашивания. Разработанные методики позволяют анализировать развитие сеток поверхностных трещи, вызванных как циклическими воздействиями (повторяющиеся термоудары по поверхности детали), так возникающих в результате усадки (распухания) материала. Рассмотрены возможные причины поворота трещин, приводящего к замыканию систем трещин и выкрашиванию поверхности.

5. Выявлен основной механизм развития сеток трещин при дилатационных воздействиях: с увеличением глубины трещин увеличивается интервал между продолжающими расти трещинами, в то время как промежуточные трещины останавливаются. Получены оценки влияния наиболее существенных факторов, определяющих рост сеток трещин.

6. Впервые выполнен анализ кинетики роста сеток трещин для ряда графитовых конструкций. Установлены закономерности достижения предельного состояния, обусловленного сетками трещин.

Достоверность положений и выводов

- обеспечивается использованием известных проверенных теорий пластичности, ползучести и механики разрушения; экспериментальной информации о структуре и свойствах структурных составляющих искусственных неармированных графитов и о поведении графитовых образцов при различных программах нагружения
- подтверждается сопоставлением результатов математического моделирования с экспериментальными данными о деформировании и разрушении графитовых материалов и элементов конструкций из них, а также с результатами численного моделирования поведения конструкций с помощью коммерческих пакетов COSMOS/M и ANSYS.

Практическая ценность. Разработанные модели процессов деформирования и разрушения графитовых конструкций и созданное на их основе программное обеспечение обеспечивают повышение точности прогнозирования долговечности графитовых деталей реакторов и возможность поиска новых конструктивных и режимных решений для повышения их надежности и долговечности. Выполненные расчеты блоков экспериментальной установки "Графитовая колонна" и отражателей высокотемпературных газовых реакторов показали, что полученное уточнение проектного ресурса в ряде случаев оказывается существенным. Разработанные методы и программы расчетов могут

быть использованы также для уточнения прогнозов и выбора путей повышения долговечности крупногабаритных углеграфитовых электродов сталеплавильных печей, подов электролизеров.

Результаты, полученные при анализе развития сеток трещин, могут быть использованы также для оценки и поиска путей повышения долговечности ряда высокотемпературных элементов металлургического и химического оборудования, деталей двигателей, изготовленных из керамических и металлических (как малопластичных, так и обладающих достаточно высокой пластичностью) материалов.

Реализация результатов работы. Разработанные методики и полученные с их помощью результаты были использованы в ИАЭ им. И.В.Курчатова и ОКБМ (г. Нижний Новгород) для оценки работоспособности графитовых кладок реакторов различных типов, а также вошли в отраслевые Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов установки ВГМ.

Апробация работы. Основные результаты работы отражены в 26 публикациях и были доложены на I и II Всесоюзных научно-технических конференциях "Долговечность энергетического оборудования и динамика гидроупругих систем" (г. Челябинск, 1986, и г. Каунас, 1990), всесоюзном симпозиуме с участием стран СЭВ "Нормирование прочности и ресурса высоконагруженных машин" (г. Владимир, 1986), XII научно-техническом совещании по тепловой микроскопии (г. Москва, 1986), всесоюзном симпозиуме "Малоцикловая усталость и критерии разрушения" (г. Волгоград, 1987), научном совещании "Термовязкоупруго-пластические процессы деформирования в элементах конструкций" (г. Канев, 1992), коллоквиуме Euromech-298 (Варшава, 1992), XI Польской конференции по компьютерным методам в механике (Кельце, 1993), международной конференции "Надежность машин и технологического оборудования" (Ростов-на-Дону,1994), IX конференции по прочности и пластичности (Москва, 1996), XXVI международном научно-техническом совещании по динамике и прочности двигателей (Самара, 1996), XV международной конференции "Математические модели в механике деформируемых тел" (С.-Петербург, 1996), ежегодных научно-технических конференциях по пограмме "Динамика, почность и надежность машин" (Москва, 1994-1996), ежегодных научно-технических конференциях Челябинского государственного технического университета (1986-1997).

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, общих выводов, и списка литературы. Работа изложена на 246 страницах машинописного текста, содержит 96 рисунков, 174 наименования литературных источников, 6 приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ экспериментальных и расчетных исследований графитовых материалов и элементов конструкций

Экспериментальные исследования процессов деформирования и разрушения графитовых материалов, проведенные рядом авторов (Барабанов В.Н., Виргильев Ю.С., Зайцев Г.Г., Строков В.И., Трапезников Д.А., Уманский Э.С., Платонов П.А., Карпухин В.И., Чугунов О.К., Гурович Б.А., Лежнев С.В., Швецов А.Г., Мартыненко М.Е., Ивашков И.А., Cundy M.R., Kleist G., Mindermann D., Oku T., Ishiyama S., Eto M., Haag G., Delle W., Nikel H., Hart P.E. и др.), выявили ряд эффектов, учет которых может существенно сказываться на результатах расчета конструкций: неоднородность и анизотропия материала; нелинейность диаграмм деформирования; наличие петель гистерезиса, параметры и форма которых изменяются в ходе нагружения; взаимное влияние циклического деформирования и ползучести, проявляющееся, в отличие от металлов, практически с самого начала нагружения; изменение характеристик материала с температурой и нейтронным облучением; влияние программы предшествующего нагружения на тепловое расширение. Существующие модели деформационного поведения материалов, разработанные, главным образом, для металлов и керамик, не описывают часть этих эффектов (прежде всего тех, что слабо проявляются в металлах и керамиках — влияние программы предшествующего нагружения на тепловое расширение, например) и, таким образом, неприменимы для достаточно точного описания поведения графита.

Исследования материала проводятся различными, дополняющими друг друга методами: механическими испытаниями больших (по сравнению с размерами структурных составляющих материала) образцов и исследованиями структуры материала (с помощью электронной микроскопии и рентгеновских методов), применяются и сочетания этих методов (например, регистрация микроразрушения с помощью акустической эмиссии при механическом нагружении больших образцов). В то же время известные модели деформирования графита опираются на какой-либо один из этих подходов и либо с высокой точностью описывают поведение материала в узком диапазоне условий (модели, построенные по результатам механических испытаний), либо предсказывают - качественно - поведение материала в широком диапазоне условий, но не обладают необходимой точностью. Кроме того, экспериментальными методами выявлено, что на деформирование и разрушение графита в конструкциях оказывают влияние три основных взаимодействующих процесса (пластическое деформирование, рассеянное разрушение и образование макротрещин); в отличие от металлов и керамик их взаимное влияние проявляется уже на начальных стадиях нагружения, при этом практически отсутствует стадия

стабильной работы. Для традиционных металлических материалов взаимодействие этих процессов является существенным лишь в некоторых узких областях, поэтому большинство существующих моделей ограничивается рассмотрением только одного из этих процессов, рассмотрение взаимодействия различных процессов при их описании различными моделями затруднительно.

Особенностью работы графитовых элементов конструкций являются сравнительно малые механические нагрузки и высокие самоуравновешенные термические (или радиационные) напряжения. В таких условиях рост трещин сопровождается снижением напряжений и, соответственно, скорости распространения трещин; при этом - в отличие от механического нагружения - появление трещины не приводит к немедленному разделению элемента конструкции на части. Существующими отраслевыми нормами расчета на прочность допускаются в некоторых случаях трещины, занимающие до 80% сечения детали. Рост трещин может происходить достаточно медленно (рост, связанный с числом циклов или развивающимся с течением времени неоднородным изменением объема материала), время работы конструкции с трещиной при этом будет составлять значительную долю ресурса, и выбранный метод расчета должен позволять анализировать изменение полей напряжений при росте трещины и развитие докритических трещин. Во многих случаях рост трещин в графитовых деталях происходит в условиях однородности воздействий (температур, флюенсов) на значительной части поверхности детали. Такая однородность (и связанная с ней однородность полей напряжений и деформаций) может приводить к образованию не одиночных трещин, а целых систем ("сеток разгара", подобных тем, что наблюдаются в металлургическом оборудовании). Существующие методы расчетов не позволяют анализировать рост подобных трещин: аналитические методы применимы лишь при простейших вариантах нагружения и геометрии сетки трещин, а существующие численные методы, ориентированные на анализ одиночных трещин, в задачах с большим числом трещин оказываются чрезвычайно трудоемкими.

Таким образом, проблема прогнозирования прочности и долговечности графитовых элементов теплонапряженных конструкций на современном этапе — с учетом накопленного опыта эксплуатации, условий работы новых конструкций и многочисленных новых экспериментальных данных о свойствах графитовых материалов — требует для своего решения изучения и развития методов прогнозирования специфических особенностей поведения этих материалов и механизмов разрушения конструкций из них. В связи с этим в данной работе поставлены следующие взаимосвязанные задачи:

1) Разработка — с учетом данных о составе и свойствах структурных составляющих материала — математической модели процессов повторного

неизотермического деформирования конструкционных графитов. Модель должна описывать процессы деформирования и разрушения графита во всем диапазоне условий, характерном для соответствующих элементов конструкций (неизотермическое повторно-переменное длительное нагружение, нейтронное облучение, сложное напряженное состояние) с учетом взаимодействия пластического деформирования, ползучести, рассеянного разрушения, влияния истории нагружения применительно к специфическим особенностям протекания этих процессов в графитовых конструкционных материалах. Модель должна быть пригодна как для исследования влияния различных факторов на поведение материала и предельные состояния конструкций, так и для выполнения практических расчетов на прочность на стадии проектирования.

2) Развитие методов расчета напряженно-деформированного состояния элементов конструкций из графита с учетом особенностей их деформирования, описываемых указанной выше моделью и исследование - с помощью этих методов - влияния не учитывавшихся ранее специфических свойств материала на условия достижения традиционных предельных (по накопленным деформациям и одиночным трещинам) состояний.

3) Разработка методов прогнозирования роста сеток трещин в поверхностном слое детали и связанного с ним выкрашивания этого слоя как специфического предельного состояния теплонапряженных конструкций, не учитывавшегося ранее в расчетах на прочность. Апробация разработанных методов при расчетах реальных конструкций.

4) Подготовка, на основе проведенного комплекса исследований, предложений по нормированию разработанных методов расчета предельных состояний графитовых элементов конструкций в рамках отраслевых Норм расчета элементов реакторов.

Математическая модель процессов деформирования и разрушения графита при малоцикловом изотермическом и неизотермическом нагружении

Моделирование ведется на основе подхода, хорошо зарекомендовавшего себя при описании свойств металлических материалов: элемент объема представляется в виде набора подэлементов с различающимися характеристиками, деформации подэлементов полагаются одинаковыми, а напряжения в элементе объема получаются усреднением напряжений по подэлементам (структурная модель среды в форме, предложенной Мазингом, развитая в работах Н.Н.Афанасьева, Бесселинга, Д.А.Гохфельда и О.С.Садакова, Ю.П.Самарина и В.П.Радченко и др.).

При построении модели, то есть выборе свойств подэлементов и определении их численных характеристик, здесь используется как информация,

полученная при исследовании состава и свойств структурных составляющих материала физическими методами, так и при механических испытаниях больших, по сравнению с размерами структурных составляющих материала, образцов. Конструкционный графит состоит, в общих чертах, из двух типов структурных составляющих - зерен и связующего. Зерна представляют собой кристаллиты с ярко выраженной анизотропией (например, коэффициенты линейного температурного расширения по различным направлениям имеют не только разную величину, но и разные знаки) и пластическими свойствами (реализующимися, главным образом, путем двойникования по плоскости базиса, единственной для каждого кристаллита). Связующее по своим свойствам близко к изотропному хрупкому материалу. Соответственно в модели — в отличие от моделей металлических материалов — задаются два типа подэлементов: пластичные и линейно-упругие хрупкие (с возможностью разрушения). Как показали предварительные численные эксперименты и их сопоставление с результатами испытаний образцов, использование только физической информации позволяет отразить качественные особенности процессов деформирования, но не позволяет добиться точности описания свойств материала, необходимой для расчетов конструкций, в силу того, что выбранная схема модели не отражает ряд особенностей реальной структуры материала, связанных прежде всего с дефектами различных типов. Поэтому для задания характеристик подэлементов, наряду с данными физических исследований (коэффициенты линейного теплового расширения - к.т.р. - монокристалла графита по различным направлениям, матрица его упругих констант, статистический закон распределения ориентаций осей кристаллитов - зерен) используются результаты механических испытаний больших, по сравнению с размерами зерна, образцов. При этом сохраняются зависимости между характеристиками подэлементов, полученные из физических соображений: например, к.т.р. подэлемента является параметрической функцией модуля упругости, так как и к.т.р. и модуль упругости по заданному направлению определяются свойствами анизотропного монокристалла и его ориентацией. Параметры этих зависимостей определяются из результатов механических испытаний.

Модель описывается следующей системой уравнений:

$$\varepsilon_i = \varepsilon \qquad \sigma(\varepsilon) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\sigma_i(\varepsilon_i) \qquad i = 1\ldots N$$

Здесь ε - тензор деформаций; σ - тензор напряжений; величины без индексов относятся к модели в целом, а с индексами - к подэлементам. Для подэлементов, моделирующих кристаллиты ($i = 1\ldots m$, $m < N$), используются следующие уравнения:

$i = 1 \ldots m$

$$\varepsilon_i : \quad \sum_p \sum_q \left(\varepsilon \cdot\cdot e_p e_q - \varepsilon_i \cdot\cdot e_p e_q \right)^2 \to \min$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon = \mathbf{e}_i + \alpha \Delta T \ , \qquad \mathbf{e}_i = \mathbf{r}_i + \mathbf{p}_i$$

Здесь $\bar{e}_p$, $\bar{e}_q$ - единичные координатные орты; T - температура, α - тензор коэффициентов линейного теплового расширения; $\mathbf{r}$ - упругая и $\mathbf{p}$ - неупругая деформация; причем $\mathbf{r}_i$, $\mathbf{p}_i$, $\mathbf{e}_i$ удовлетворяют условиям

$$\forall \mathbf{x} \in \{\mathbf{r}, \mathbf{p}, \mathbf{e}\} \quad \mathbf{x}_i \cdot\cdot \mathbf{l}_i \mathbf{n}_i \neq 0 \ , \quad \mathbf{x}_i \cdot\cdot \mathbf{m}_i \mathbf{n}_i \neq 0 \ ,$$

$$\mathbf{x}_i \cdot\cdot \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i = \mathbf{x}_i \cdot\cdot \mathbf{l}_i \mathbf{l}_i = \mathbf{x}_i \cdot\cdot \mathbf{m}_i \mathbf{m}_i = \mathbf{x}_i \cdot\cdot \mathbf{m}_i \mathbf{l}_i = 0$$

($\mathbf{n}$,$\mathbf{l}$,$\mathbf{m}$ - векторы, определяющие ориентацию подэлемента (моделируемого кристаллита) и

$$\mathbf{p}_i = \frac{\mathbf{r}_i}{|\mathbf{r}_i|} \Phi\left(|\mathbf{r}_i|, T\right) , \quad \Phi\left(|\mathbf{r}_i| \to R_i, T\right) \to \infty , \quad R_i = R_i(\lambda_i) ; \quad \lambda_i = \int |d\mathbf{p}_i| \ .$$

Напряжение в подэлементе вычисляется как

$$\sigma_i = \mathbf{E} \cdot\cdot \mathbf{r}_i$$

где $\mathbf{E}$ - тензор упругих постоянных кристаллита. Статистический закон распределения направлений векторов $\mathbf{n}_i$ совпадает с экспериментально определяемым законом распределения ориентаций кристаллитов в материале

$$\mathbf{n}_i : \quad \tilde{f}(\mathbf{n}_i) = f(\mathbf{n})$$

Для описания подэлементов второй группы, моделирующих связующее, используются следующие выражения:

$$i = m + 1 \ldots N$$

$$\varepsilon_i = \varepsilon \cdot\cdot \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i \quad \sigma_i = \sigma_i \mathbf{n}_i \mathbf{n}_i \ , \qquad \sigma_i = \sigma_i(\varepsilon_i)$$

$$\sigma_i(\varepsilon_i) = E_i r_i \left\{ 1 + \left[H(-E_i r_i) - 1 \right] H\left(\max \frac{r_i}{\varepsilon_i^{\text{вр}}} - 1 \right) \right\} H\left(\min \frac{r_i}{\varepsilon_i^{\text{вр}}} - k \right)$$

(H - функция Хэвисайда - используется для описания возникновения односторонних связей при разрушении подэлементов по достижении предельной деформации при растяжении $\varepsilon_i^{\text{вр}}$ или сжатии $\varepsilon_i^{\text{вс}}$)

$$E_i = E_i^0 \cdot f\left(\int |d\varepsilon_i| \right) \quad r_i = \varepsilon_i - \alpha_i T \quad k = \varepsilon_i^{\text{вр}} / \varepsilon_i^{\text{вс}} = \text{const} \ ;$$

предельные деформации при растяжении $\varepsilon_i^{\text{вр}}$ имеют некоторое статистическое распределение $\tilde{\gamma}(\varepsilon_i^{\text{вр}})$.

Обоснован минимальный набор данных, которые необходимо получить из испытаний больших образцов для идентификации модели: коэффициент линейного расширения, определенный при медленном нагреве отожженных образцов; диаграммы деформирования при изотермическом циклическом

жестком нагружении при нескольких - как минимум двух - размахах деформаций в цикле и при однократном кратковременном и длительном изотермическом нагружении до разрушения. Разработана процедура идентификации - определения параметров подэлементов по этим испытаниям и определены параметры модели материала ГР-280 при температурах 20 ..800°С. Модель отражает процессы изменения микронапряжений в материале при нагружении (в том числе тепловом - вследствие различия к.т.р. подэлементов модели), неупругого деформирования (за счет деформаций пластичности и ползучести в подэлементах, моделирующих кристаллиты) и микроразрушения (за счет разрушения хрупких подэлементов) материала. При этом, как показали численные эксперименты, описываются следующие основные эффекты, наблюдаемые при механических испытаниях: неупругое деформирование и образование петель гистерезиса, взаимное влияние циклического нагружения и ползучести, влияние истории нагружения на термическое расширение (рис. 1).

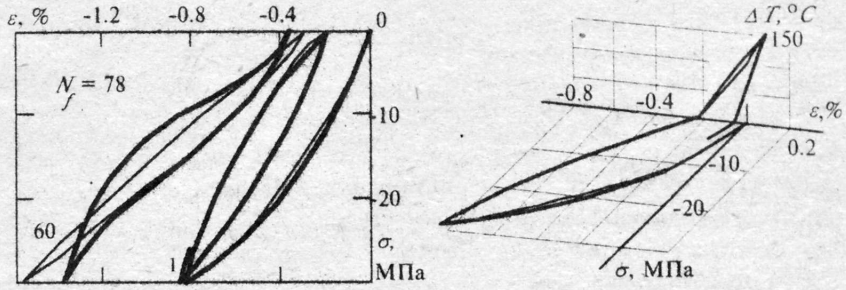


Рис. 1. Циклическое изотермическое и неизотермическое нагружение графита (тонкая линия - модель, жирная - эксперимент)

Сопоставление численных экспериментов с моделью с результатами испытаний при различных программах нагружения, отличающихся от базовых (мягкое циклическое нагружение без выдержек и с выдержками, неизотермическое нагружение) показало, что кривые деформирования, полученные с помощью модели, лежат в полосе разброса экспериментально полученных кривых. Использование физической информации (свойств микрообъемов) обеспечивает расширение диапазона применимости и повышение точности модели, так, например, при неизотермическом нагружении абсолютная погрешность определения деформаций при помощи модели, у которой, аналогично моделям традиционных металлических материалов, к.т.р. всех подэлементов равны, достигает 0.2% (величина, примерно равная предельной деформации растяжения для данного материала), а данной модели — 0.03% (сопоставление

расчетов с результатами неизотермических испытаний, проведенных в ЧПИ С.В.Лежневым и А.Г.Швецовым и в ГосНИИЭП Н.В.Негуторовым).

Введение возможности разрушения подэлементов (для описания которого используется деформационный критерий) приводит к появлению у модели возможности "разрушения" — достижения максимума на кривой "деформация-напряжение". Деформация, при которой происходит такое "разрушение" модели, зависит от программы нагружения (поскольку разупрочнение пластичных и хрупких подэлементов различно). Число циклов до разрушения при циклическом нагружении, описываемом с помощью модели, удовлетворительно согласуется с наблюдаемым в опытах — отличия не превышают разброса экспериментальных данных (рис. 2).

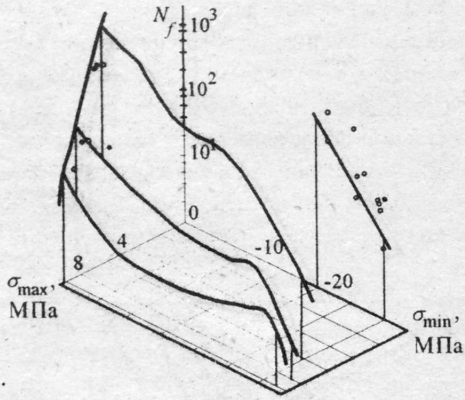


Рис. 2. Зависимость числа циклов до разрушения от минимального и максимального напряжений цикла (ГР-280||, 700°С).

Для моделирования облученного материала характеристики модели представлены как функции температуры облучения и флюенса нейтронов. В первом приближении, вследствие недостаточного количества данных по циклическим и реологическим свойствам материалов, полученных в послереакторных и, тем более, внутриреакторных испытаниях, принято, что эти функции не зависят от интенсивности облучения (скорости набора флюенса) и программы облучения и нагружения. Определены значения параметров модели для материалов, облученных при 300°С до флюенса 0.8 ...1.0·10^{21} нейтрон/см^2 и при 700°С до флюенса 5.3 ...7.2·10^{21} нейтрон/см^2. Значения характеристик при других сочетаниях флюенса и температуры облучения пока предлагается определять интерполяцией (экстраполяцией), по мере накопления экспериментальных данных модель может быть уточнена.

При обобщении модели деформирования графита на сложное напряженное состояние сохранены основные положения модели, разработанной для линейного напряженного состояния: схема Мазинга, два типа подэлементов. Анализ экспериментальных данных показал, что пластичная составляющая модели может рассматриваться как изотропное тело, имеющее единую кривую деформирования в координатах "интенсивность напряжений — интенсивность

деформаций" и разупрочняющееся в зависимости от параметра Удквиста путем уменьшения предела текучести при неизменных упругих характеристиках. Хрупкая составляющая должна отражать разносопротивляемость и анизотропию материала, а также возможность рассеянного разрушения материала в процессе нагружения. В то же время подэлементы модели должны обладать достаточно простыми свойствами, допускающими идентификацию по ограниченному набору базовых опытов. Учитывая эти требования, в качестве схемы модели выбран набор работающих параллельно различно ориентированных подэлементов, в каждом из которых реализуется одноосное напряженное состояние. Ранее попытка применить такую схему для описания деформирования пластичных металлических материалов при сложном напряженном состоянии была предпринята Ю.П.Самариным и В.П.Радченко; данная модель отличается наличием двух типов подэлементов и возможностью их разрушения.

Модель, идентифицированная только по результатам испытаний на одноосное растяжение-сжатие, позволяет прогнозировать поведение материала при плоском напряженном состоянии и описывать такие эффекты, как накопление осевых деформаций при циклическом кручении и кручении с растяжением-сжатием (рис. 3), разупрочнение и смещение центра петли гистерезиса, разрушение при достижении предельной деформации при однократном нагружении или накоплении деформаций при циклическом нагружении (испытания при однократном и циклическом кручении и кручении с растяжением-сжатием, выполнялись в ЧГТУ И.А.Ивашковым и М.Е.Мартыненко). Модель реализована в виде программы для ЭВМ, которая может быть использована как блок уравнений состояния при расчете конструкций.

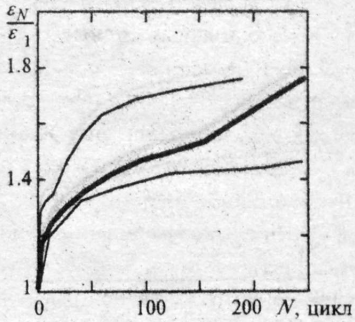


Рис. 3. Накопление осевых деформаций при осевом сжатии и циклическом кручении ($\Delta\tau = 1.25\tau_в$ $\sigma = 0.4\sigma_{вс}$); тонкие линии — границы разброса экспериментальных данных, жирная — расчет

Расчет графитовых элементов конструкций

Все рассмотренные факторы — нелинейность диаграмм деформирования, циклическое разупрочнение, анизотропия, а также технологическая неоднородность материала — влияют на деформирование и разрушение элементов конструкций.

Влияние учета нелинейности диаграммы деформирования на поле напряжений в конструкции при однократном нагружении продемонстрировано на примере дисков, используемых в электродной промышленности для сравнительной оценки термостойкости углеграфитовых материалов. Диски подвергаются неравномерному нагреву пропусканием тока через центральную часть. Температурные поля в дисках фиксировались с помощью термопар и - в тех точках, где измерение было затруднено протеканием тока по образцу - определялись расчетом.

Показано, что вследствие нелинейности диаграммы деформирования в диске происходит перераспределение напряжений: уровень максимальных напряжений уменьшается, и точка, в которой они возникают, смещается ближе к краю диска (рис. 4).

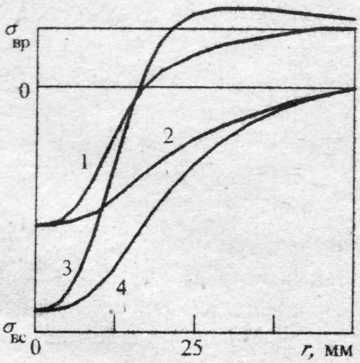


Рис. 4. Напряжения в диске. 1,2 - окружные и радиальные напряжения, вычисленные с учетом реальной диаграммы, 3,4 - в предположении линейной упругости материала

Показано, что использование экспериментальных данных о тепловом расширении материала при программах нагружения, отличных от реализующихся в конструкции, может приводить к существенным ошибкам. Так, в соответствии с опытами Н.В.Негуторова (измерение коэффициента линейного расширения после предварительного нагружения) к.т.р. в центральной части образца должен был бы возрасти примерно в 2 раза, тогда как в реальной конструкции при одновременном росте температуры и напряжений он уменьшается примерно на 10%.

После выполнения расчетов была проведена серия специальных испытаний с дисками, отличающимися по диаметру от обычно применяемых при испытаниях на термопрочность. Регистрация моментов возникновения трещин (с помощью акустической эмиссии) и выхода трещин на поверхность образца (путем измерения изменения диаметра в ходе испытаний) показала хорошее соответствие расчета и эксперимента.

На примере расчета напряжений в электроде дуговой сталеплавильной печи показано, что влияние различных факторов (нелинейности диаграмм деформирования, технологической неоднородности, анизотропии материала) имеет один порядок и ни одним из них нельзя пренебречь без соответствующего анализа.

На примере расчета блока экспериментальной установки "Графитовая колонна", моделирующего геометрию и условия работы блоков кладки РБМК, показано влияние учета неупругих деформаций на результаты расчета конструкций, работающих при длительном повторно-переменном нагружении. Главную роль при этом играет ползучесть и циклическое разупрочнение. Влияние нелинейности диаграмм деформирования и различия диаграмм в полуциклах нагружения и разгрузки оказывается меньше в силу не очень высоких уровней напряжений (до 0.5 от предела прочности). Кроме того, размахи напряжений в цикле (связанные с изменениями температур в блоке при изменении режима работы установки) значительно меньше среднего напряжения цикла (связанного с радиационной усадкой материала) и составляют 0.1 ...0.15 от предела прочности. В этих условиях петля гистерезиса сравнительно мала и расчет может выполняться как для упругого тела с коррекцией модуля упругости (в каждой точке конструкции) по результатам моделирования поведения материала в ней. Предложенная модель материала позволяет не только выполнять такую коррекцию, но и оценивать остаточную прочность материала в каждый момент времени - рис. 5.

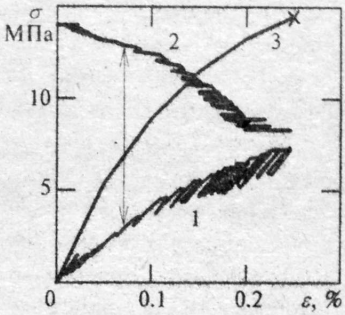


Рис. 5. Напряжения и деформации в опасной точке блока (1) и расчетный предел прочности (2). Для сравнения - кривая деформирования при быстром нагружении (3).

Наличие ползучести и циклического разупрочнения приводит к перераспределению напряжений и уменьшению уровня максимальных напряжений. Расчет с помощью модели согласуется с результатами наблюдений блоков (отсутствие разрушения в случае отсутствия контакта блока с циркониевой трубой технологического канала), в то время как расчеты без учета неупругого поведения материала предсказывают разрушение блока.

Расчетный анализ с помощью модели обладает приемлемой трудоемкостью и достаточной точностью для оценки напряженно-деформированного состояния конструкций в процессе проектирования.

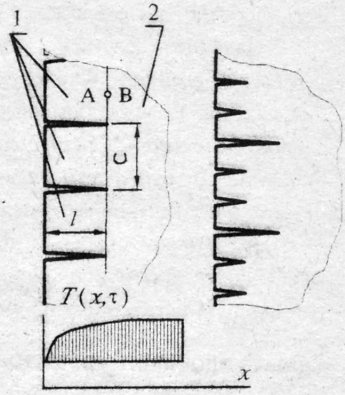
Оценка прочности графитовых конструкций на стадиях роста трещин

Для ряда теплонапряженных деталей характерна работа в условиях, когда в приповерхностных слоях температура быстро меняется с глубиной, но слабо зависит от координаты, параллельной поверхности. При этом место зарождения трещины не может быть однозначно определено, а разгрузка в прилегающей к

трешине области — при не слишком длинных трещинах — не запрещает появления других трещин. Следствием может явиться появление сеток трещин — специфического механизма разрушения, при анализе которого необходимо учитывать, что подрастание трещин может привести к их взаимному влиянию и изменению скорости их роста. Подобные "сетки разгара" часто наблюдаются в металлургическом оборудовании. Ревизия блоков отработавших ядерных реакторов, выполненная сотрудниками ИАЭ, показала, что и там в некоторых случаях наблюдаются сетки трещин. Наличие у поверхности детали достаточно часто расположенных глубоких трещин может привести к выкрашиванию и прогрессирующему развитию сетки трещин, для оценки возможности которого необходимо учитывать не только глубину, но и расстояние между трещинами.

Методы расчета конструкций с одиночными трещинами достаточно хорошо разработаны. Рассмотрение одновременного роста большого числа взаимодействующих трещин представляет собой более сложную задачу, в которой аналитические решения могут быть получены только для некоторых простых случаев (работы В.З.Партона, Е.М.Морозова, Л.Т.Бережницкого, С.И.Артыковой), а численные решения — при использовании методов, ориентированных на одиночные трещины — слишком трудоемки. В данной работе рассматривается приближенный подход к решению таких задач, использующий предположение о периодичности сетки трещин у поверхности детали. (Такое предположение, очевидно, несправедливо для коротких трещин. Но последующий анализ показал, что на развитие достаточно длинных трещин это влияет слабо.)

Для анализа развития таких сеток предлагается использовать энергетический подход линейной механики разрушения. Особенностью его применения в данном случае является приближенный метод вычисления упругой энергии неравномерно нагретого тела с большим числом взаимодействующих трещин. Для вычисления упругой энергии деталь разбивается на части, ограниченные ее поверхностью, берегами трещин и линией, соединяющей их вершины (рис. 6).



а) б)

Рис. 6. Сетка трещин в полуплоскости (полупространстве)

Поле напряжений в каждой из частей раскладывается на ортогональные в энергетическом смысле составляющие: напряжения, вызванные неравномерным нагревом данной части, и напряжения,

необходимые для обеспечения совместности деформирования различных частей. Упругая энергия последних вычисляется с использованием принципа Лагранжа: действительными перемещениями в элементе конструкции будут те, которые доставляют упругой энергии минимальное значение. Величина этой энергии вычисляется приближенно с помощью метода Рица: задаются функции, описывающие распределение перемещений, и параметры этих функций определяются из условия минимума потенциальной энергии поля напряжений. Решение этой вариационной задачи дает следующую оценку:

$$U_F = E\left(1-\mu^2\right)\Delta\varepsilon^2 \frac{c}{\xi}\cdot\frac{\psi}{1+\psi} \quad \text{где} \quad \psi = \frac{e^{4\xi l}-1}{(e^{2\xi l}+1)^2}\ , \quad \xi = \frac{1-\mu}{c}\sqrt{12(1+\mu)}$$

Здесь $\Delta\varepsilon$ — разница деформаций в точках А и В (рис 6), вычисленных в предположении, что части типа 1 и типа 2 деформируются независимо, l - глубина трещин, c - расстояние между ними, e - основание натуральных логарифмов. Показано, что по сравнению с аналитическим решением (для случая растягиваемой полуплоскости с системой параллельных краевых трещин одной длины) данная оценка завышена не более чем на 7%. Подобный подход можно распространить и на периодическую сетку трещин различной длины (рис. 6б).

С использованием описанного способа вычисления упругой энергии и, соответственно, коэффициентов интенсивности напряжений, выполняется пошаговый расчет кинетики трещин. Приведенные примеры (графитовый блок прямоугольной формы при циклических термоударах по поверхности и стенка чугунной изложницы для разливки хромоникелевых сплавов) иллюстрируют изменение сетки трещин в ходе нагружения: развитие вначале сетки частых и мелких трещин, затем остановку части из них и продолжение роста других с образованием сетки более редких и более глубоких трещин вплоть до образования одной магистральной трещины. Сопоставление результатов расчетов с сетками трещин, наблюдающимися на металлических изложницах, показало достаточную точность методики.

В рамках данной методики несложно учесть как влияние циклического нагружения, так и влияние монотонно изменяющейся составляющей поля деформаций (деформации распухания или усадки, вызванные различными причинами - облучением, структурными изменениями вследствие изменений температуры и т.д.). При этом, даже в том случае, когда основным воздействием является именно монотонно изменяющаяся во времени составляющая поля деформаций (что имеет место, например, в некоторых деталях ядерных реакторов), система трещин в детали не может быть определена только по конечному моменту времени без расчета кинетики. Это связано с отсутствием единственности решения: существует бесконечно много систем трещин, которые не подрастают при заданном воздействии. В конструкции единственность

системы трещин связана именно с кинетикой развития этой системы; определяющей здесь является невозможность изменения расстояния между уже существующими трещинами и уменьшения длины этих трещин.

Расчет кинетики развития сетки трещин даже в упругой постановке является достаточно трудоемким, поскольку для достижения приемлемой точности требует достаточно мелкого шага по времени и длине трещин. В некоторых (возможно — в большинстве) практически важных случаев может оказаться достаточно знания области на плоскости "длина трещин - расстояние между ними", включающей все развивающиеся (или неразвивающиеся) при заданном воздействии системы трещин. Для получения приближенной оценки границы этой области можно обойтись без расчетов кинетики, что позволяет более чем на порядок уменьшить трудоемкость задачи.

Для описания границы области возможных трещин, соответствующей температурному полю $T(x)$, в работе получено выражение, связывающее длину трещин l и расстояние между ними c:

$$\left.\frac{\partial T(x)}{\partial x}\right|_{x=l} + \frac{E\left(1-\mu^2\right)}{4\sqrt{3}}\left[-48\Delta\varepsilon^2(l)l\exp(-2\xi l) + \left(1-\exp(-2\xi l)\right)\frac{\partial\left(\Delta\varepsilon(l)\right)^2}{\partial l}c^2\right] = \kappa\frac{B}{c}$$

На рис. 7 приведено сопоставление результатов расчетов кинетики сетки трещин (треугольники, наличие нескольких точек соответствует сетке трещин различной длины - см. рис. 6б), экспериментальных данных (точки) и прямых оценок сетки трещин (линии) в стенке изложницы для разливки хромоникелевых сплавов. Тонкие линии соответствуют оценкам для температурных полей в отдельные моменты времени цикла, жирная - объединению полученных оценок. При достижении этой линии рост трещин прекращается вследствие снижения коэффициентов интенсивности напряжений у их вершин, поэтому точки, соответствующие трещинам в конструкции, должны оказываться левее ($l_i \le l$) этой линии (что совпадает с экспериментом - рис. 7).

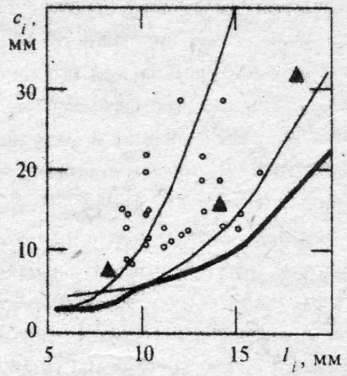


Рис. 7. Оценки параметров сетки трещин

Расчеты развития сеток трещин проведены для блоков бокового отражателя проектируемых высокотемпературных газовых реакторов ВГ-400 и ВГМ-С. Рост трещин в блоках атомных реакторов вызывается сочетанием циклических

изменений температуры (связанных с пусками и остановками, срабатываниями АЗ и т.п.) и накапливающихся деформаций радиационного изменения объема. Показано, что в ВГ-400 сетки могут представлять реальную опасность вследствие большой глубины трещин (рис. 8), возможности разгерметизации каналов охлаждения и возможности выкрашивания частей блоков достаточно большого размера, которые могут нарушить нормальное функционирование системы выгрузки и сортировки шаровых ТВЭЛов.

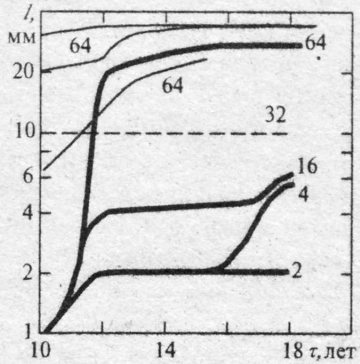


Рис. 8. Развитие сетки трещин в блоке с гладкой поверхностью (жирные линии) и с различными вариантами нарезки (тонкие линии). Числа у кривых - расстояния между трещинами

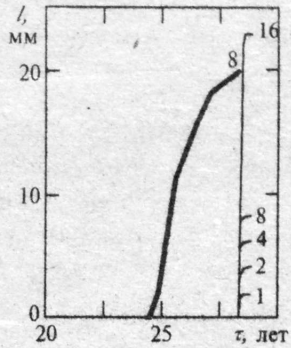


Рис. 9. Развитие сетки трещин при частых (жирная линия) и редких (тонкие линии) термоциклах

Одним из возможных способов борьбы с данным видом разрушения является управление параметрами развивающейся сетки трещин с помощью предварительного нанесения надрезов на поверхность конструкции. Для блоков бокового отражателя ВГ-400 предварительная нарезка поверхности может обеспечить получение лучшей - с точки зрения работоспособности конструкции - сетки, состоящей из более частых, но менее глубоких трещин (при этом снижается опасность разгерметизации каналов и уменьшаются максимальные размеры выкрашивающихся фрагментов блоков); рассчитаны возможные параметры такой нарезки.

Продемонстрировано (на блоках ВГМ-С) что рост трещин происходит в моменты, когда сумма остаточных и термических напряжений максимальна, и, таким образом, связан с цикличностью нагружения. Однако подрастание трещин связано в данной конструкции главным образом с достижением критического коэффициента интенсивности напряжений; циклическим ростом, описываемым формулой Пэриса, можно пренебречь. При этом увеличение частоты циклов

выше определенного значения не приводит к ускорению роста трещин. Уменьшение частоты термоциклов на некоторое время может уменьшить скорость роста трещин и даже привести к прекращению их роста. Однако первый же цикл после длительной выдержки вызывает скачкообразный рост трещин, длина полученных трещин может быть равна длине трещин, развивающихся при достаточно частых циклах, или даже превышать ее - за счет образования системы более редких трещин - рис. 9.

Отказ от предположения о плоском напряженном (деформированном) состоянии при расчете сетки трещин превращает задачу из 2-мерной в 3-мерную, чем существенно усложняет ее. Численные эксперименты (МКЭ) показали, что оценки глубины трещин и расстояния между ними, полученные с помощью 2-мерной модели, оказываются достаточно точными. В то же время эти эксперименты позволили сформировать из свойств материала и параметров температурного поля некоторый безразмерный комплекс, в зависимости от величины которого энергетически выгодными являются различные (в плане) сетки трещин. Сделанные расчеты объясняют, например, появление сеток трещин в виде шестиугольников в базальтовых массивах и прямоугольные сетки трещин в изложницах.

Развитие сеток поверхностных термических трещин является случайным процессом, и детерминированный подход к его описанию может рассматриваться только как начальное приближение. Вероятностный характер задачи связан как с неоднородностью материала, так и с неоднородностью условий нагружения. При анализе роста одиночных трещин этому вопросу посвящен целый ряд исследований. Для систем трещин достаточно исследована задача определении вероятности подрастания наиболее опасной трещины; при этом трещины полагаются не взаимодействующими. С точки зрения анализа работоспособности конструкции может потребоваться оценка возможности выкрашивания, то есть появления соседних трещин с определенными соотношениями глубины и расстояния между трещинами. В данной работе рассматривалось развитие случайной сетки взаимодействующих трещин при циклическом тепловом нагружении. Удалось построить рекуррентные соотношения, связывающие распределение длин

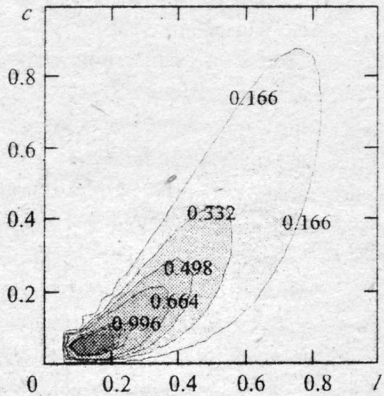


Рис. 10. Распределение длин трещин

трещин и расстояний между ними в последовательные моменты истории нагружения. Пример результатов расчета показан на рис. 10, где изображены линии равной вероятности обнаружения трещин заданной длины l при расстоянии между трещинами, равном c (числа у кривых — величины вероятностей). Сравнение с экспериментом (как натурным - рис. 7, так и численным — методом Монте-Карло) показало, что модель отражает происходящие процессы. При этом качественная картина оказывается такой же, как для детерминированной модели: образование — по мере роста — сетки все более редких и глубоких трещин. Однако детерминированная модель дает только оценку "среднего", что может оказаться недостаточным в случаях, когда требуется оценить опасность возникновения выкрашивания.

Для учета влияния нелинейности диаграмм деформирования материала на развитие трещин (для малопластичных материалов типа графита) удается использовать δ_c-подход Леонова-Панасюка-Дагдейла. Этот подход удалось распространить на случай взаимодействующих периодических трещин, ключевыми моментами при этом явились используемое в этом подходе предположение об отсутствии сингулярной составляющей напряжений и способ вычисления упругой энергии тела с периодической системой взаимодействующих трещин, полученный при решении задачи о сетке трещин в хрупком теле. Показано, что распространение сетки трещин в упругопластическом теле в случае, когда может быть использован подход Дагдейла, может быть описано так же, как распространение сетки трещин в упругом теле с заменой K_{1c} на $K_{1c}\left(1+\varphi\left(l_p\right)\right)$, где

$$\varphi(l_p)=\frac{\pi}{3}\left(1-\mu^2\right)\frac{dl_p}{dl}\ ,$$

l_p удовлетворяет уравнению $K^2(l+l_p)=\dfrac{\sigma_{\text{т}}^2}{E}c\dfrac{du}{dl}$,

K — коэффициент интенсивности напряжений для упругой задачи, $u=u\,(l/c,\ l_p/c)$ — упругая энергия тела с $E=1$, $\sigma_{\text{т}}=1$, $c=1$, нагруженного на продолжении трещины $x\in[l,\ l_p]$ напряжениями $\sigma=1$. По результатам расчетов МКЭ найдена аппроксимация

$$\frac{du}{dl}\approx f_1\left(\frac{l_p}{c}\right)\cdot\left[\frac{l}{c}+f_2\left(\frac{l_p}{c}\right)\right]^{-f_3\left(\frac{l_p}{c}\right)}$$

$$f_1(x)=0.0065\left(1-e^{14x^3}\right)\ ,\quad f_3(x)=2.7+3x\ ,\quad f_2(x)=0.15+0.24\left(1-e^{14x^3}\right)$$

В некоторых случаях, как уже отмечалось, действующие на конструкцию нагрузки могут приводить к повороту трещин, их смыканию и, в результате, выкрашиванию поверхностного слоя. Причины, вызывающие поворот трещин,

могут быть различны: силы трения (например, при извлечении слитка из изложницы), вибрации (в электродах дуговых печей), неравномерность нагрева детали с сеткой трещин (в том числе вследствие движения источника тепла), резкое изменение свойств по глубине детали (отслоение покрытий, такыр), химические изменения при нагреве с образованием газов в объеме детали (тепловая защита летательных аппаратов) и т.д.

Выкрашивание поверхностного слоя представляет обычно для конструкции большую опасность, чем непосредственно образование сетки трещин, так как оно приводит либо к повышенному расходу материала (как в электродах дуговых сталеплавильных печей), либо к необходимости прекращения дальнейшей эксплуатации конструкции (невозможность извлечь слиток из изложницы при слишком большой площади выкрошенных участков поверхности).

Опасность выкрашивания связана и с тем, что оно приводит к проникновению теплоносителя и распространению зоны высоких градиентов температур вглубь детали и дальнейшему (прогрессирующему) развитию сетки трещин и выкрашиванию. Такое предельное состояние типично для ряда элементов металлургического оборудования, оно может стать существенным для конструкций активной зоны новых мощных энергетических реакторов с высокими рабочими температурами.

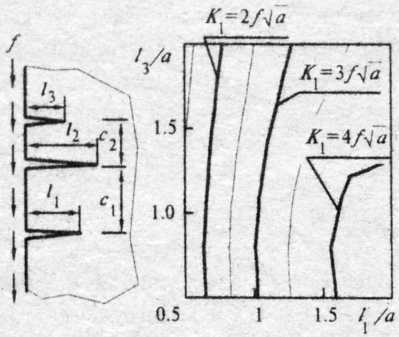


Рис. 11. Коэффициенты интенсивности напряжений в случае трещин неравной длины ($c_1=c_2=l_2=a$)

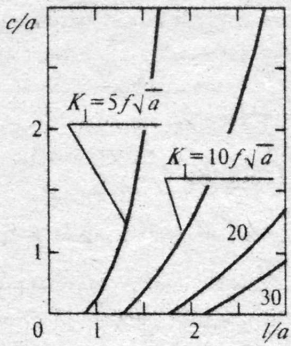


Рис. 12. Линии равных значений КИН в зависимости от длины трещин и расстояния между ними

В работе получены оценки величин воздействий, при которых поворот трещин и связанное с ним выкрашивание возможно, для следующих возможных причин выкрашивания: силы трения на поверхности детали с сеткой трещин, неравномерность нагрева, потеря устойчивости прямолинейного распространения трещин. Для случая нагружения детали силами трения полученные оценки приведены на рис. 11, 12.

При тепловом нагружении поворот трещин может происходить вследствие неравномерности нагрева. В случае стационарного теплового потока (рис. 13, $\nu = 0$) продвижение трещины вызывает разгрузку перед ее фронтом и поэтому возможно только при увеличивающейся во времени величине теплового потока. При перемещении теплового фронта трещина может достигать значительной длины — около 60% расстояния до соседней трещины — прежде чем коэффициент интенсивности напряжений перед ее вершиной начнет снижаться (рис. 10, $\nu \neq 0$).

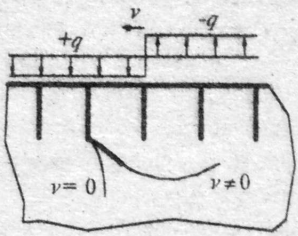


Рис. 13. Рост трещины при подвижном тепловом фронте (жирная линия — без снижения коэффициента интенсивности напряжений)

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

Накопленные к настоящему времени данные об эксплуатации конструкций из неармированных графитов и результаты лабораторных испытаний материалов показали, что для обеспечения прочности конструкций в условиях теплосмен необходимо исследование влияния ряда не учитывавшихся ранее эффектов, связанных с нелинейностью процессов деформирования материала, на поведение конструкций; изучение процессов развития не рассматривавшегося до сих пор предельного состояния - развития сетки трещин и выкрашивания; и создания на этой основе и доведения до практического использования соответствующих методов расчета конструкций. В рамках решения этой проблемы в диссертации получены следующие основные результаты.

1. Разработанная новая математическая модель процессов деформирования и разрушения искусственных конструкционных графитов, относящаяся к классу структурных моделей и использующая вместе с результатами испытаний макрообразцов экспериментальные данные о структуре и свойствах существенно анизотропных структурных составляющих этих материалов, позволяет - в отличие от других существующих моделей - прогнозировать в широком диапазоне условий и с приемлемой точностью характеристики повторно-переменного кратковременного и длительного неизотермического деформирования и разрушения графитов при линейном и сложном напряженном состоянии с учетом взаимодействия пластического деформирования, ползучести, рассеянного разрушения, влияния истории

нагружения. Модель приближенно отражает также основные радиационные эффекты, но без учета влияния истории нагружения.

2. С помощью разработанной модели исследовано влияние ряда факторов на поведение графитовых материалов и показано, что история нагружения и рассеянное разрушение могут существенно влиять на нелинейность диаграмм деформирования, образование и изменение в процессе нагружения петель гистерезиса, циклическую ползучесть, взаимодействие процессов циклического деформирования и ползучести, изменение характеристик материала при нейтронном облучении, накопление деформаций и тепловое расширение конструкционных графитов. Достоверность полученных качественных и количественных оценок этого влияния подтверждена сравнением с экспериментальными данными.

3. Методика расчета напряженно-деформированного состояния конструкций из неармированных графитов, базирующаяся на разработанной модели материала, впервые позволила учесть зависимости характеристик графита от реальных программ нагружения. На примерах дисков, используемых в электродной промышленности при испытаниях на термопрочность, крупногабаритных электродов дуговых сталеплавильных печей и блоков установки «Графитовая колонна», моделирующей работу кладки реактора РБМК, показано, что учет специфических эффектов деформирования графита (нелинейности диаграмм деформирования, зависимости теплового расширения от истории нагружения, формы петель гистерезиса, технологической анизотропии и неоднородности материала, циклических ползучести и разупрочнения), не принимавшихся ранее во внимание, существенно влияет на результаты расчета напряженно-деформированного состояния и последующий прогноз прочности и долговечности конструкций. Показано, что предложенная методика расчета позволяет избежать существенных ошибок, связанных с использованием экспериментальных характеристик деформирования графита при программах нагружения, отличных от использованных в эксперименте.

Сопоставление результатов расчетов с экспериментальными данными испытаний графитовых дисков на термопрочность и данными эксплуатации электродов , а также с результатами расчетов с другими моделями материала подтвердило достоверность расчетов .

4. Разработанные методы и средства расчетного анализа не учитывавшегося ранее в расчетах на прочность специфического предельного состояния теплонапряженных конструкций - прогрессирующего разрушения поверхностного слоя вследствие роста сеток трещин и связанного с ним выкрашивания - позволяют анализировать развитие сеток поверхностных трещин, вызванных как циклическими воздействиями (повторяющиеся термоудары по поверхности детали), так и возникающих в результате усадки (распухания)

материала. Предложенная методика расчета впервые позволила прогнозировать кинетику роста регулярных сеток трещин и форму таких сеток в плане.

Показано, что с увеличением глубины проникновения трещин увеличивается интервал между растущими трещинами сетки, в то время как промежуточные трещины перестают расти. Процесс может продолжаться вплоть до образования одной магистральной трещины или прекращения роста трещин вследствие снижения номинальных напряжений (при развитии трещин в конструкциях, нагруженных самоуравновешенными тепловыми напряжениями).

В дополнение к методике расчета кинетики роста сеток трещин предложен приближенный метод непосредственной (без анализа кинетики) оценки систем трещин, не подрастающих при заданном воздействии, дающий верхнюю оценку длин трещин.

Учет нелинейности диаграмм деформирования графитов и ее зависимости от истории нагружения может быть выполнен с использованием предложенных в данной работе математической модели материала и методики расчета напряженно-деформированного состояния конструкции.

Разработана методика решения одной из стохастических задач расчета сетки трещин: определения вероятности появления заданной комбинации соседних трещин и показано, что параметры сетки трещин к моменту ее остановки слабо зависят от начальной случайной сетки мелких и частых трещин.

Показано, что причинами поворота трещин, приводящего к замыканию систем трещин и выкрашиванию поверхности могут быть силовое нагружение поверхности детали (силы трения) и подвижные температурные поля; получены оценки величин воздействий, вызывающих выкрашивание.

5. Впервые показана возможность зарождения и развития сеток трещин у поверхности блоков отражателя высокотемпературных газовых реакторов. Анализ, проведенный с учетом нелинейности процессов длительного циклического деформирования и радиационного изменения объема (с помощью предложенной здесь модели среды) показал, что рост сеток трещин и выкрашивание могут существенно влиять на долговечность блоков. Для рассмотренных вариантов конструкции основным фактором, влияющим на рост сетки трещин, оказался флюенс нейтронов. В качестве способа повышения долговечности может быть предложена нарезка поверхности детали. Расчеты позволили выявить количественные закономерности процесса развития сеток трещин в деталях с гладкой и надрезанной поверхностью. Определены параметры нарезки, снижающие скорость роста сеток трещин в блоках проектируемого высокотемпературного реактора ВГ-400.

6. Разработанные взаимосвязанные методы прогнозирования свойств графитов, напряженно-деформированного состояния конструкций и процессов

роста сеток трещин, оформленные в виде пригодной для практических расчетов ЭВМ-программы, обеспечили регламентацию методов расчетного анализа этого нового предельного состояния в рамках Норм расчета на прочность оборудования и трубопроводов установки ВГМ.

Основные положения диссертации опубликованы в работах:

1. Чернявский А.О. Прочность графитовых материалов и конструкций при малоцикловом нагружении Челябинск: ЧГТУ, 1997. - 148 с.
2. Cherniavsky A.O. Nonlinear behavior of low-plastic structures // Inelastic Behavior of Structures under Variable Loads. Kluwer Academic Publishers (Netherlands). - 1995. - P. 83-91
3. Чернявский А.О. К расчетному анализу развития сеток термических трещин // Проблемы прочности. - 1990. - N3. - С.59-63
4. Чернявский А.О. Образование и развитие сеток трещин в теплонапряженных элементах конструкций // Динамика, прочность и износостойкость машин. - 1995. - Вып. 1, С.56-60
5. Чернявский А.О. Расчетный анализ развития сеток поверхностных трещин // Заводская лаборатория. - 1995. - N9. - С.44-48.
6. Чернявский А.О. Анализ систем взаимодействующих поверхностных трещин// Проблемы машиностроения и надежности машин. - 1995. - N3. - С.47-52.
7. Чернявский А.О. Математическое моделирование деформирования и разрушения графита при сложном напряженном состоянии // Динамика, прочность и износостойкость машин. - 1996. - Вып. 2. - С.29-34
8. Cherniavsky A.O. Probabilistic approach to calculation of kinetics of crack meshes // Динамика, прочность и износостойкость машин.- 1997.- Вып. 3. - С.91-95
9. Деформирование и разрушение графитовых материалов при силовом и кинематическом нагружении / И.А.Ивашков, И.В.Кожевников, А.Ю.Постников, А.О.Чернявский // Прочность машин и аппаратов при переменных нагружениях: Тематический сборник научных трудов. - Челябинск: ЧПИ, 1986. - С.87-93
10. Чернявский А.О. Расчетный анализ образования и развития сеток термических трещин// Прочность машин и аппаратов при переменных нагружениях: Тематический сборник научных трудов. - Челябинск, ЧПИ, 1989 .- С. 54-61.
11. Деформационные и прочностные характеристики графитовых материалов энергетических установок при повторных нагружениях / Д.А.Гохфельд, С.В.Лежнев, А.Г.Швецов, А.О.Чернявский // Долговечность энергетического оборудования и динамика гидроупругих систем: тезисы докладов Всесоюзной конференции. - Челябинск, 1986. - Часть 1. - С.22-25 д.с.п.

12. Деформирование и разрушение графитовых материалов и конструктивных элементов при повторных нагружениях / Д.А.Гохфельд, С.В.Лежнев, А.Г.Швецов, А.О.Чернявский // Нормирование прочности и ресурса высоконагруженных машин: тезисы докладов всесоюзного симпозиума с участием стран СЭВ. - Владимир, 1986. - С.50-53
13. Чернявский А.О. Численное моделирование деформирования и разрушения микронеоднородных и микроанизотропных графитов при повторных нагружениях // Малоцикловая усталость и критерии разрушения: тезисы докладов всесоюзного симпозиума. - Волгоград, 1987 .- Т. 1, С.35-37.
14. Чернявский А.О. К расчетному анализу долговечности графитовых элементов конструкций // Гидроупругость и долговечность конструкций энергетического оборудования: тезисы докладов II Всесоюзной научно-технической конференции. - Каунас, 1990 .- С.157-158.
15. Cherniavsky A.O. Numerical modeling of nonisothermal low-cycle deforming and failure for structural-inhomogeneous materials// Proc. of XI Polish conf. on Computer Methods in Mechanics. - Kielce (Poland), 1993. - P.153-156
16. Cherniavsky A.O. Crack mesh grow calculations// Proc. of XI Polish conf. on Computer Methods in Mechanics.-Kielce (Poland), 1993. - P.157-162
17. Чернявский А.О. Моделирование деформирования и разрушения искусственных графитов с использованием информации о свойствах их структурных составляющих// IX конференции по прочности и пластичности: тезисы докладов. - Москва: ИПМ, 1996. - С.109-110
18. Чернявский А.О. Численное моделирование взаимодействующих термических трещин// XV международная конференция "Математические модели в механике деформируемых тел": тезисы докладов. - С.-Петербург: СПбГТУ, 1996

Издательство Южно-Уральского государственного университета

ЛР № 020364 от 10.04.97. Подписано в печать 09.01.98. Формат 60*84 1/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,68. Тираж 100 экз. Заказ 1/10.

УОП Издательства. 454080, Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.