

Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи

ИВАШКОВ ИГОРЬ АЛЕКСАНДРОВИЧ

ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА НАПРЯЖЕНИЙ НА РАЗРУШЕНИЕ  
ГРАФИТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ СТАТИЧЕСКОМ  
И МАЛОЦИКЛОВОМ НАГРУЖЕНИЯХ

Специальность 01.02.04 -  
"Механика твердого деформируемого тела"

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата технических наук

Челябинск  
1993

Работа выполнена в Челябинском государственном техническом университете.

Научный руководитель - доктор технических наук, профессор Черняевский О.Ф.

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор Виргильев Ю.С.,  
кандидат технических наук, профессор Ихрин В.А.

Ведущее предприятие - Научно-исследовательский и конструкторский институт энергетической техники (НИКИЭТ).

Захита состоится "22" декабря 1993 года на заседании специализированного совета Д.053.13.01 Челябинского государственного технического университета по адресу: 454080, г.Челябинск, проспект им. В.И.Ленина, 76.

Автореферат разослан "11 ноября 1993 года.

Учёный секретарь специализированного совета, кандидат технических наук,  
доцент

В.М.Кононов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Графитовые материалы находят в последние годы всё более широкое применение в высокотемпературных конструкциях различного назначения: электродах (в том числе крупногабаритных для сталеплавильных печей), атомных реакторах, химических аппаратах. У конструкционных искусственных графитов произведение  $\kappa E$  (коэффициента линейного расширения и модуля упругости) в сотни раз меньше, чем у традиционных металлических материалов. Соответственно меньшими являются и температурные напряжения при одинаковых перепадах температур, тогда как прочностные характеристики графитов отличаются от сталей и сплавов лишь в десятки раз. С ростом температуры до 1500..2000 °C у конструкционных графитов улучшаются прочностные и деформационные характеристики. Эти отличия в значительной мере определяют оптимальную область применения конструкционных графитов — это конструкции со сравнительно небольшими механическими нагрузками, но интенсивными тепловыми и радиационными воздействиями, т.е. с существенно неравномерным по объёму распределением тепловых и радиационных расширений.

Известно, что неоднородность напряжённо-деформированного состояния оказывает существенное влияние на поведение изделий из графита. Разрушение (образование магистральных трещин) может происходить при значительно более высоких значениях напряжений и деформаций, чем при однородном напряжённом состоянии (простом растяжении).

В настоящее время в расчётах на прочность, регламентируемых нормативными документами, неоднородность напряжённого состояния не учитывается. Это приводит к тому, что графитовые элементы проектируются с большим запасом, что, в свою очередь, может привести к излишнему расходу графита (довольно дорогостоящего материала), а также к ухудшению рабочих характеристик..

Работа выполнена в соответствии с заданиями Координационного плана работ на 1980-1984 годы по исследованию свойств и работоспособности графитовых материалов установки ВГ-400, а также по Плану научно-исследовательских работ АН СССР по фундаментальным проблемам машиностроения (раздел II, п. I.I, I.I3.2, раздел У, п. I.7), утверждённому постановлением Президиума АН СССР от 21 мая 1986 г. № 642 (кафедра СМиДМ ЧГУ, на которой выполнялась работа, являлась исполнителем указанных разделов планов).

Цель работы состояла в разработке методик и исследовании механического поведения графитовых материалов при неравномерном рас-

пределении напряжений в условиях статического и малоциклового нагружения, что позволило бы выработать приемлемый для указанных условий критерий разрушения графита в неоднородном поле напряжений.

При этом рассматривались следующие основные задачи.

1. Разработка методики и проведение комплекса испытаний графитовых образцов различных сечений на чистый изгиб с записью деформаций и последующим расчётным определением нелинейных диаграмм растяжения и сжатия, проведение исследований для широкого диапазона градиентов напряжений.

2. Исследование кинетики деформирования изгибаемых графитовых образцов на микроуровне (на уровне зерна) для выявления механизма влияния градиента напряжений на разрушение материала.

3. Формулировка критерия прочности графита при неоднородном напряжённом состоянии, проверка его применимости для различных видов нагрузления.

4. Трансформация критерия на сложное напряжённое состояние на основе проведения испытаний при плоском напряжённом состоянии в случае пропорционального статического нагружения, подбор критерия, описывающего с приемлемой точностью поверхность разрушения графита в рамках проведённой серии испытаний.

5. Разработка методики и проведение испытаний на малоцикловое кручение трубчатых и сплошных образцов в условиях нормальной и повышенных температур для изучения влияния градиента напряжений на условия малоциклового деформирования и разрушения, а также с целью исследования закономерностей циклического деформирования и разрушения при плоском напряжённом состоянии.

6. Оценка влияния градиентов напряжений на прочность реальных графитовых деталей - блоков ядерных реакторов и электродов дуговых электропечей.

Научная новизна. На основе проведённых исследований прочностных и деформационных свойств графитовых материалов в широком диапазоне градиентов напряжений получены новые данные по сопротивлению деформированию и разрушению графитов в неоднородном поле напряжений. В частности, установлена зависимость диаграмм деформирования от градиента напряжений и прекращение возрастания предела прочности при изгибе и разрушающей деформации с уменьшением высоты образца меньше некоторой предельной величины. Выявлен механизм влияния градиента напряжений на разрушение материала - более медленное развитие локальных микротрещин, связанное с переходом их

вершин в зоны с меньшим уровнем напряжений, а также с неоднородностью материала. Установлено, что разрушение неравномерно нагруженных графитовых образцов удовлетворительно описывается критерием прочности по средним напряжениям. Анализ экспериментальных данных автора и других исследователей показал, что приближенно, с учётом разбросов, структурный параметр в этом критерии можно считать инвариантным, т.е. независимым от схемы нагружения, направления вырезки образцов, температуры. Определена минимальная величина градиента напряжений, ниже которой влиянием неоднородности напряжённого состояния на прочность графитовой детали можно пренебречь.

Разработана методика проведения испытаний конструкционных графитов на циклическое кручение при нормальной и повышенных температурах. Обнаружено, что закономерности малоциклического деформирования и разрушения при кручении в основном соответствуют растяжению и сжатию. В отличие от растяжения-сжатия при кручении в мягком симметричном цикле наблюдается заметное падение числа циклов до разрушения по сравнению с пульсирующим циклом. Кроме того, в случае мягкого симметричного цикла деформационный критерий разрушения дал значительную ошибку. Установлено, что с приемлемой точностью разрушение неравномерно нагруженных графитовых образцов при кручении в случае мягкого пульсирующего цикла может прогнозироваться с помощью критерия средних напряжений.

Практическая ценность и внедрение. Получены конкретные данные о сопротивлении деформированию и разрушению в неоднородном поле напряжений, а также при плоском напряжённом состоянии в условиях статического и малоциклического нагружения графитов ГР-280, ГРН2-125, используемых в активной зоне реакторов. Полученные результаты позволяют на стадии проектирования аппаратов более полно и дифференцированно анализировать влияние различных факторов на прочность деталей из графита. Эти данные необходимы также при разработке математических моделей деформирования и разрушения элементов графитовых конструкций при различных программах нагружения.

Развитая применительно к графиту методика оценки прочности на основании критерия разрушения по средним напряжениям позволяет расчитывать на прочность произвольно нагруженные графитовые детали. В частности, выполнена оценка прочности реальных элементов конструкций из графита - блоков ядерных реакторов РБМК, ВГМ и электродов дуговых электросталеплавильных печей.

Разработанные экспериментальные установки, а также методики испытаний и расчётов позволяют определять характеристики деформирования и разрушения, оценивать прочность графитов и других аналогичных материалов в различных условиях нагружения.

Результаты работы частично вошли в "Нормы расчёта на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канавочных реакторов НТР-01-90" и используются в научно-исследовательских и конструкторских организациях НИКИЭТ, ИАЭ им. Курчатова и других при проектировании аппаратов типа ВПР.

Авторская работа. Основные положения работы были доложены на межреспубликанской студенческой научно-технической конференции "Проблемы повышения прочности элементов машиностроительных конструкций" (г. Пермь, 1983), У Всесоюзной научно-технической конференции электродной промышленности "Повышение качества и эксплуатационной стойкости углеродной продукции" (г. Челябинск, 1983), Всесоюзной конференции молодых учёных и специалистов "Современные достижения в области исследования, производства и эксплуатации углеродных материалов и изделий" (г. Челябинск, 1984), областной научно-практической конференции "Участие молодых учёных и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологии" (г. Челябинск, 1986), конференции "Экспериментальные методы в механике деформируемого твёрдого тела" (г. Калининград, 1987), XII Юбилейной конференции молодых учёных Института машиноведения "Актуальные проблемы машиноведения" (г. Москва, 1989), VII Международной конференции по механике разрушения материалов (г. Киев, 1993), Всесоюзном совещании по исследованию установки ВГ-400 (г. Москва, 1984), XXXI-ILY научно-технических конференциях ЧТУ (г. Челябинск, 1983-1992).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 работ.

Объём работы. Диссертация состоит из введения, четырёх глав, общих выводов, списка литературы (232 наименования) и приложений. Она изложена на 151 странице машинописного текста, содержит 72 рисунка и 20 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Обоснование задач исследования. Известно, что в графитовых элементах наиболее распространённых конструкций (блоках ядерных реакторов и электродах дуговых сталеплавильных печей) имеет место неоднородное напряжённое состояние. Исследования, посвящённые вли-

янию градиента напряжений на деформирование и разрушение графитов. проводили как советские (В.Н.Барабанов, Ю.С.Виргильев, Л.Н.Зайцев, Н.А.Лобастов, Д.А.Трапезников и др.), так и зарубежные (J.E.Brock, Lehurst, M.I.Darby, Y.Sato, P.Tong) учёные. Проведённый анализ экспериментальных данных и результатов расчёта показал, что большинство исследований имеет ограниченный характер. Систематизации данных, опирающихся на комплекс исследований в широком интервале градиентов напряжений для различных видов нагружения, достаточно полного объяснения и обобщения механизмов, реализующихся при разрушении в неоднородном поле напряжений, практически нет.

Проведённые исследования основывались на результатах, полученных на ряде других материалов (керамика, мрамор, бетон, чугун, различные сплавы и стали) Н.Н.Давиденковым, А.В.Караваевым, М.Я.Леоновым, К.А.Малышевым, В.В.Новожиловым, Г.А.Пранцкевичем, С.В.Серенсеном, Л.П.Трапезниковым, В.Т.Троленко, A. Bascom, R.W. Hawood, W.Kuntze, J.C. Mass, G. Neuber, R.J. Nusmier, Y.M. Whitney, T. Yokoborgu и др.

Деформирование и разрушение графита при чистом изгибе. На основе разработанной методики проведены испытания образцов из двух марок реакторного графита (ГР-280 и ГРП2-125) на чистый изгиб. При этом варьировали форму и размеры поперечного сечения с целью получения разных градиентов напряжений. В отличие от других авторов исследования были проведены для широкого диапазона градиентов: испытывали образцы квадратного сечения 25x25 и 16x16 мм; прямоугольного - 16x32, 32x16, 8x12, 12x8 и 12x4 мм; круглого - диаметром 30 мм; двутаврового; таврового, расположенного оптимально и неоптимально. В процессе испытаний фиксировали нагрузку Р и деформации крайних растянутых  $\varepsilon_p^u$  и сжатых  $\varepsilon_c^u$  слоёв. Показано, что, поскольку диаграммы деформирования нелинейны, прямой расчёт напряжений по формулам сопротивления материалов может привести к существенным погрешностям. Поэтому диаграммы растяжения и сжатия крайних слоёв в случае прямоугольного сечения  $b \times h$  рассчитывали методом Нада по формулам:

$$\sigma_p^u = \alpha (P + \tilde{\varepsilon} / (2\tilde{\varepsilon}')) (1 + (\varepsilon_c^u)' / (\varepsilon_p^u)') / (bh^2), \quad (1)$$

$$\sigma_c^u = \alpha (P + \tilde{\varepsilon} / (2\tilde{\varepsilon}')) (1 + (\varepsilon_p^u)' / (\varepsilon_c^u)') / (bh^2).$$

Здесь  $\tilde{\varepsilon} = (\varepsilon_p^u + \varepsilon_c^u) / 2$ ; "штрих" означает дифференцирование по нагрузке. Для других типов сечений напряжения рассчитывали численными методами. Необходимое число испытываемых образцов каждого сечения определяли в соответствии с разбросом свойств:

$$N_{min} = t^2(\alpha, k) \cdot \delta U^2 / \delta^2 \quad (2)$$

где  $\delta U$  - коэффициент вариации параметра;  $\delta$  - необходимая точность;  $t(\alpha, k)$  - критическая точка распределения Стьюдента с  $k$  степенями свободы;  $\alpha$  - уровень значимости.

В результате обнаружено, что диаграммы деформирований растянутых слоёв при различных градиентах напряжений совпадают (рис.1), разница состоит лишь в разрушающих напряжениях  $\sigma_f$  и деформациях  $\epsilon_f$ . С увеличением градиента они возрастают (рис.2). Однако при высоте изгибаемого образца меньше некоторой величины не наблюдается возрастание предела прочности и разрушающей деформации с ростом градиентов. Следует отметить, что данное явление характерно не только для конструкционных графитов, но и для других структурно-неоднородных материалов. Так, прекращение возрастания прочности и разрушающей деформации при изгибе, начиная с некоторой минимальной высоты образца, для бетонных материалов отмечает А.В. Караваев. При достаточно малых образцах (высота вытянутой зоны меньше 6-7 зёрен) результаты испытаний становятся непредставительными, и разбросы резко возрастают.

Разрушающие напряжения и деформации, как показали испытания, зависят от формы сечения. Так, несмотря на одинаковые градиенты, прочность образцов двутаврового сечения ниже, чем квадратного.

Испытания при силовом и кинематическом растяжении. Была сделана попытка объяснить возрастание прочности с увеличением градиента только традиционными для ряда материалов причинами – нелинейностью диаграммы деформирования и жёсткостью нагружающего устройства. Учёт нелинейности диаграмм влияет на результаты расчёта разрушающих напряжений и деформаций, но это влияние существенно меньше, чем разница между  $\sigma_f$  и  $\sigma_c$ . Предполагалось, что причиной различия в разрушающих напряжениях и деформациях при растяжении и изгибе является стеснённость более нагруженных крайних слоёв менее нагруженными внутренними частями. Из-за этого слои работают в условиях, близких к кинематическому растяжению. Для проверки данного предположения проводили испытания графитовых образцов диаметром 20 мм на растяжение с различной жёсткостью нагружающего устройства:

- а) испытания на стандартной испытательной машине УМЭ-10Т;
- б) испытания на кинематическое растяжение путём подключения параллельно образцу дополнительных элементов большой жёсткости;
- в) испытания на силовое растяжение.

Однако существенных различий в прочностных

и деформационных характеристиках с изменением жёсткости нагружающего устройства не наблюдается. Результат находится в некотором противоречии с теоретическими представлениями, а также с экспериментальными данными при циклическом и длительном нагружении. Объяснение может быть дано на основании результатов микроиспытаний. Таким образом, пока нет оснований считать, что жёсткость нагружения является основной причиной влияния градиента напряжений на прочность.

Исследование микродеформаций графита. Была исследована кинетика деформирования графитовых образцов при изгибе и при растяжении. Деформации замеряли двумя способами: с помощью цепочки тензорезисторов малой базы (1 мм), соизмеримой с размером зерна материала, и методом голограммической интерферометрии, позволяющим регистрировать непрерывное поле деформаций. В результате обнаружена существенная (до 60%) неравномерность распределения микродеформаций по длине образца, увеличивающаяся с возрастанием нагрузки. Макродеформация, замеренная на базе, на порядок превышающей размер структурного элемента, при этом является одинаковой по всей длине. Неравномерность может быть вызвана различной ориентацией анизотропных зёрен относительно приложенной нагрузки, разной жёсткостью наполнителя (коакса) и связующего (каменноугольного пека), а также наличием в графите пор и начальных микротрещин. Кроме того, распределение микродеформаций по высоте отклоняется от линейного закона.

С целью выявления закономерностей распределения деформаций по длине для каждого тензодатчика подсчитывали коэффициент неравномерности

$$\Delta \varepsilon_j = \Delta \varepsilon_{ij} / (\Delta \varepsilon_j)_c, \quad (3)$$

где  $\Delta \varepsilon_{ij}$  - приращение деформации  $i$ -го датчика на  $j$ -й ступени нагрузки;  $(\Delta \varepsilon_j)_c$  - осреднённое по всем датчикам приращение деформации; кроме того, подсчитывали коэффициент связи

$$B_j = \alpha_{ij} / \alpha_{io}. \quad (4)$$

Здесь  $\alpha_{io}$  - коэффициент неравномерности на нулевой ступени нагрузки. С их помощью определены три стадии деформирования графита. Пока в материале нет значительных изменений, коэффициенты связи  $B$  близки к единице, примером может служить график, изображённый на рис. 3,  $m = 0,32$ . При этом формирование общей картины микронеоднородного деформирования протекает так, что весь макрообъём материала ведёт себя как многоэлементная конструкция с практически неизменяющимися связями.

Закономерность распределения деформаций по длине образца нарушается лишь с возникновением существенных изменений в состоянии материала. Характерная для данного этапа черта:  $\delta$  значительно отличается от единицы (график,  $m = 0,64$ , выходит за пределы заштрихованного коридора). В случае малопластичного материала это указывает, по-видимому, на образование и интенсивный рост сети разорванных микротрещин, характерный для второго этапа деформирования.

При дальнейшем увеличении нагрузки на отдельных участках образца коэффициенты  $\alpha$  и  $\beta$  интенсивно возрастают (рис. 3,  $m = 0,96$ ). Наблюдения показывают, что именно через один из этих участков проходит магистральная трещина. Характерная для этого картина продольных перемещений  $\bar{U}$ , полученная методом голографической интерферометрии, приведена на рис. 4. На седлообразную интерферограмму, характерную для первых двух этапов, накладывается возмущение I, вызванное локальным нарушением характера деформирования. Непосредственно перед разрушением размер этого возмущения вглубь образца (в направлении оси  $Y$ ), независимо от градиента напряжений, составляет для графита ГР-280 около 10 мм. Вдоль продольной оси образцов (оси  $X$ ) зона имеет длину 2...4 мм. Полученные результаты в основном коррелируют с данными акустической эмиссии (В.Я.Котосонова, М.Т.Соболевский, G. Kraus, J. Semmler и др.).

Были определены границы этапов. Обнаружено, что объёмное микрорастескивание не зависит от градиента напряжений и начинается при максимальных макронапряжениях около 0,55-0,65 от предела прочности при растяжении; начало развития микротрещин в локальных зонах также не зависит от градиента и происходит при напряжениях, приблизительно равных  $\sigma_{cr}$ . Однако дальнейшее развитие этих зон существенно зависит от градиента. Это связано с переходом вершин трещин в области с меньшим уровнем напряжений и с неоднородностью материала. Таким образом, основным механизмом, определяющим увеличение прочности структурно-неоднородного материала в неравномерном поле напряжений, является более медленное развитие локальных микротрещин. Отметим, что аналогичный механизм обнаружен для бетона, имеющего, как и графит, неоднородную структуру. Так, К.А.Мальзовым экспериментально установлено наличие локальных зон нарушения сплошности в крайнем растянутом слое изгибаемой балки, когда напряжения в нём, вычисленные с учётом нелинейности диаграммы деформирования, превышают  $\sigma_{cr}$ .

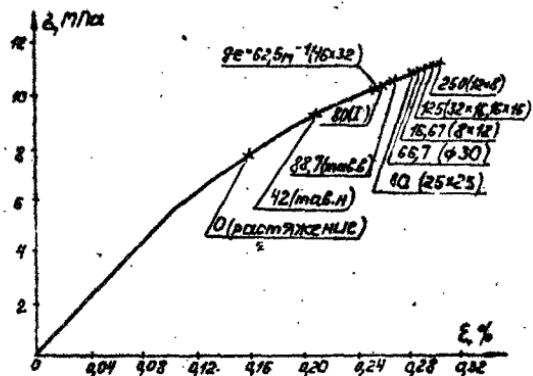


Рис.1. Диаграммы деформирования растянутых слоёв при изгибе (графит ГР-280)

II

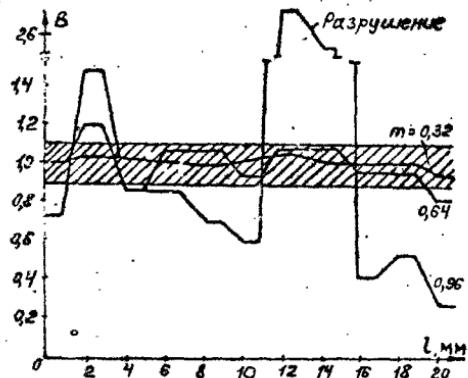


Рис.3. Изменение коэффициента  $B$  с возрастанием нагрузки ( $t = M/M_0$ )

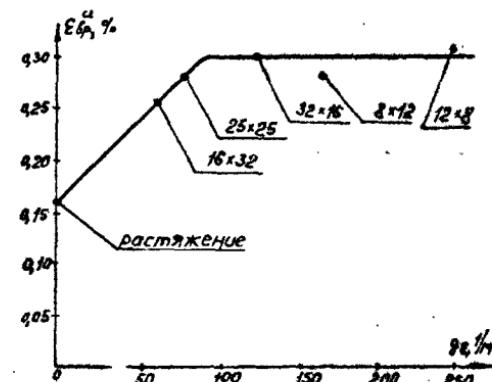


Рис.2. Зависимость предельной растягивающей деформации от градиента деформаций (графит ГР-280)

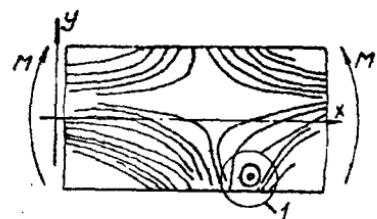


Рис.4. Картина перемещений на боковой поверхности образца (графит ГР-280, 16x32 мм,  $m = 0.95$ )

Полученные результаты позволяют объяснить данные по жёсткости нагружения. Дело в том, что испытания с различной жёсткостью нагружающего устройства не совсем адекватно отражают работу материала при неоднородном напряжённом состоянии. Поскольку локальные зоны имеют малый размер (не более 10% от длины образца), изменение жёсткости зоны практически не сказывается на жёсткости всего образца. В случае изгиба картина иная – каждый участок работает как бы вместе со своим кинематическим элементом в виде менее нагруженных слоев.

Критерий прочности по средним напряжениям следует непосредственно из результатов микроиспытаний. Согласно этому критерию разрушение (образование макротрещин) происходит, когда напряжение, осреднённое по некоторому структурному параметру  $m_o$  (точнее, по площади части сечения, имеющей высоту  $m_o$ ), достигает предела прочности при равномерном растяжении:

$$\bar{\sigma} = \frac{\int \sigma_b dy}{\int b dy} / \frac{\int b dy}{m_o} = \sigma_{fr} \quad (5)$$

Параметр  $m_o$  характеризует представительный объём и имеет порядок размера нескольких зёрен материала. Физический смысл его состоит в том, что для начала разрушения максимально напряжённый объём должен содержать определённое число неблагоприятно ориентированных зёрен. Величину  $m_o$  можно определить приближенно, исходя из данных по структуре материала. Рассмотрим растягиваемый образец круглого сечения.  $m_o$  в данном случае является минимальным диаметром образца представительного объёма. Учитывая, что минимальная прочность зёрен на отрыв примерно на порядок ниже максимальной (коэффициент вариации при этом равен  $\delta V = 81,8\%$ ), по формуле (2) можно получить минимальное число зёрен в сечении  $N_{min}$  и рассчитать  $m_o$  через средний размер зерна  $d$ :

$$m_o \approx \sqrt{N_{min} d} \quad (6)$$

Так, для  $d = 0,95$ ;  $\delta = 10\%$  найдём  $N_{min} = 250$ . Тогда имеем: для графита ГР-280 –  $d \approx 0,7$  мм,  $m_o \approx 11$  мм; для графита ГР2-125 –  $d \approx 0,3$  мм,  $m_o \approx 5$  мм.

Однако такой способ определения структурного параметра не всегда обладает достаточной точностью. Более точно величину  $m_o$  можно определить из базовых экспериментов. В данном случае за базу были приняты испытания на изгиб образцов 25x25 мм. Тогда для графита ГР-280 имеем:  $m_o = 9,8$  мм, что практически совпадает с ранее полученным значением. По критерию (5) был выполнен расчёт прочности образцов различных сечений. Результаты расчёта с погрешностью не

более 5% согласуются с экспериментом. В частности, критерий прогнозирует влияние формы сечения на прочность образца. Это связано с тем, что площади, по которым производится осреднение напряжений, различны. Отметим, что если высота растянутой зоны меньше структурного параметра, объём образца не является представительным, и мы находимся за границами применимости критерия. В связи с этим качество экспериментальных данных, получаемых в случае крупно- и среднезернистых графитов на образцах диаметром 6 мм, которые регламентируются Нормами прочности реакторного оборудования, понижено. Целесообразно использовать образцы диаметром не менее  $2m_0$ . Однако в некоторых случаях, если отличие ещё не слишком существенно, критерий может быть использован в качестве первого приближения. Напряжения при этом осредняются по всей высоте растянутой зоны, а разрушающее напряжение оказывается независимым от высоты изгибаемой балки, что соответствует экспериментальным данным, приведённым на рис.2. Таким образом, параметр  $m_0$  является инвариантным по отношению к размерам и форме поперечного сечения. Из проведённого численного анализа экспериментальных данных "Норм расчёта на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых каналных реакторов" следует независимость параметра в первом приближении от направления вырезки образцов (для графитов, изготовленных методом гидростатического прессования) и температуры.

Определена минимальная величина градиента напряжений (зависящая от структурного параметра), ниже которой влиянием неоднородности напряжённого состояния на прочность графитовой детали можно пренебречь:

$$\vartheta_0 \leq 0,18/m_0. \quad (7)$$

Так, например, расчёт на прочность блоков реактора РБМК-1000 можно вести без учёта влияния градиента ( $\vartheta_0 = 8 \text{ м}^{-1}$ ). Вообще следует отметить, что данный подход с использованием критерия средних напряжений предназначен как бы для промежуточного случая - напряжения вычисляются в предположении сплошности материала, а расчёт на прочность ведётся с учётом неоднородной структуры материала. При малых градиентах и больших объёмах для оценки прочности достаточно традиционного метода - по напряжению в точке. При высоких градиентах и малых объёмах напряжения необходимо рассчитывать по модели, явно учитывающей структуру материала.

Деформационные и прочностные свойства графита при плоском напряжённом состоянии. С целью трансформации критерия средних напря-

жений на сложное напряжённое состояние были проведены испытания при плоском напряжённом состоянии в области двухосного растяжения-сжатия в случае пропорционального статического нагружения. Для испытаний использовали установку СЛОН-2, разработанную на кафедре сопротивления материалов ЧГУ для металлов, которая позволяет проводить совместное нагружение осевой силой и крутящим моментом. Испытания проводили для следующих соотношений главных напряжений:  $|\sigma_3|/\sigma_1 = 0$  (растяжение), 1 (сдвиг), 3, 9 и  $\infty$  (сжатие). В результате получено, что для графита, как структурно-неоднородного материала, в общем характерно отсутствие единой кривой деформирования в интенсивностях напряжений и деформаций. Это объясняется, по-видимому, влиянием шаровой части тензора напряжений. Однако разница между интенсивностями напряжений при какой-либо интенсивности деформаций для различных кривых (за исключением тех, где значительно преобладает скимающее напряжение, и при этом  $|\sigma_3|/\sigma_1 > 6-7$ ) составляет не более 10-15%. Это обычно не выходит за рамки разброса свойств графита по объёму детали. Поэтому во многих случаях, если отношение  $|\sigma_3|/\sigma_1$ , не превышает 6-7, в расчётах можно принять существование единой кривой. Построенная по экспериментальным данным поверхность разрушения для графита ГР-280 с высокой точностью описывается модифицированным критерием энергии деформации, предложенным  $E_y$ :

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\bar{\sigma}_1^2 + \bar{\sigma}_2^2 + \bar{\sigma}_3^2 - 2\mu(\bar{\sigma}_1\bar{\sigma}_2 + \bar{\sigma}_2\bar{\sigma}_3 + \bar{\sigma}_3\bar{\sigma}_1)}, \quad (8)$$

где  $\bar{\sigma}_j = \sigma_j$ , если  $\sigma_j \geq 0$ ;  $\bar{\sigma}_j = \sigma_j \sigma_{\text{ср}} / \sigma_{\text{ср}}$ , если  $\sigma_j < 0$ ;  $\mu$  - коэффициент Пуассона. Был предложен один из вариантов видоизменённого критерия средних напряжений для более общего случая сложного напряжённого состояния:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{1}{V_0} \int_V \sigma_{\text{экв}}^2 dV} / \sqrt{\frac{1}{V_0} \int_V dV} = G_F. \quad (9)$$

Здесь  $V_0$  – объём, по которому производится осреднение.

Деформирование и разрушение графита при циклическом кручении. В выполненных ранее работах практически не исследовалось циклическое кручение. В данной работе исследования проводили с целью изучения влияния градиента напряжений на условия деформирования и разрушения при циклическом нагружении. Разработана методика, позволяющая проводить испытания на малоцикловое кручение трубчатых и сплошных образцов. При этом испытательная установка была модернизирована на повышенные температуры. Нагрев образца осуществляли с помощью карбидокремниевого нагревателя КЭНБ, помещаемого вовнутрь

образца. Для уменьшения окисления в полость образца подавали инертный газ - аргон. Кроме того, с этой же целью, а также для большей равномерности температурного поля по длине внешнюю поверхность образца изолировали асбестовой нитью. Испытания проводили при температурах 20 и 700 °С в мягком пульсирующем и симметричном, а также в жёстком пульсирующем и симметричном циклах.

Обнаруженные при кручении закономерности деформирования и разрушения - циклическое разупрочнение, изменение петель гистерезиса по мере развития процессов рассеянного разрушения, циклическая ползучесть и циклическая релаксация при мягком и жёстком нагружении, соответственно, падение малоцикловой прочности с увеличением температуры - в основном соответствуют растяжению и сжатию.

Разрушение образца в мягком пульсирующем цикле удовлетворительно описывается деформационным критерием квазистатического разрушения: полная (с учетом накопленной) разрушающая деформация  $\gamma_{rf}$  примерно равна предельной деформации  $\gamma_s$  при статическом нагружении. Различие величин  $\gamma_{rf}$  и  $\gamma_s$  не превышает 25%, что соответствует разбросам деформационных характеристик при однократном нагружении.

Некоторые отличия от растяжения-сжатия наблюдаются в мягком симметричном цикле. При больших размахах наблюдается непрерывное уменьшение наклона петли гистерезиса. У отдельных образцов обнаруживается незначительная циклическая ползучесть, направление которой не зависит от направления первого нагружения. Однако величина полной односторонней деформации в момент разрушения  $\gamma_{rf}$  не достигает разрушающей деформации при статическом нагружении, составляя лишь  $(0,75-0,9)\gamma_s$ . Отметим, что данное отклонение является систематическим:  $\gamma_{rf}$  для всех образцов, как правило, меньше  $\gamma_s$ . Таким образом, в отличие от растяжения-сжатия в данном случае деформационный критерий, по-видимому, неприменим. Кроме того, заметно падает число циклов до разрушения по сравнению с пульсирующим циклом, чего не наблюдается при линейном напряжённом состоянии.

Была сделана попытка оценки малоцикловой прочности при линейном напряжённом состоянии по данным растяжения-сжатия. Получено, что предельное напряжение при кручении для случая мягкого пульсирующего цикла, как и статическая прочность, с удовлетворительной точностью может быть рассчитано через соответствующую кривую при линейном напряжённом состоянии с помощью модифицированного критерия энергии деформации.

Установлено, что с приемлемой точностью разрушение неравномерно нагруженных графитовых образцов при циклическом кручении (как и при статическом) может прогнозироваться с помощью критерия прочности по средним напряжениям. Критерий в этом случае имеет вид:

$$\Delta \bar{\sigma}_{\text{экв}} = \int_{V_p} \Delta \sigma_{\text{экв}} dV / \int_{V_c} dV = \Delta \bar{\sigma}_p, \quad (10)$$

где  $\Delta \bar{\sigma}_{\text{экв}}$  - эквивалентный размах напряжений, вычисляемый по критерию (8) (вместо величин главных напряжений в формулу необходимо подставить их размахи);  $\Delta \bar{\sigma}_p$  - размах напряжений при растяжении, соответствующий данному числу циклов до разрушения  $N_f$  (снимается с кривой малоциклического разрушения при растяжении). Выполнимость критерия проверена для сплошных образцов в случае мягкого пульсирующего цикла (рис.5). Отметим, что структурный параметр  $m$ , имеет то же значение, что и при статическом изгибе.

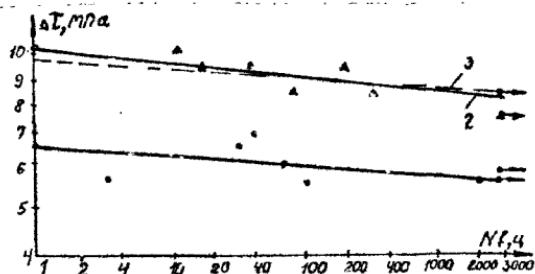


Рис.5. Кривые малоциклического разрушения при кручении сплошных и трубчатых образцов (графит ГР-280, 20 °C, мягкий пульсирующий цикл): 1 - трубчатый образец, 2 - сплошной образец (эксперимент), 3 - сплошной образец (расчет)

Экспериментальная проверка и практическое применение критерия средних напряжений. Для установления границ применимости критерия инвариантность структурного параметра была проверена для других видов нагружения, в частности, поперечного изгиба, когда напряжения изменяются по двум осям, и нагружения цилиндра внутренним давлением. Кроме того, рассматривались случаи более высоких градиентов – растяжение образца с нарушением геометрической однородности и нагружение тела с трещиной. Если напряжения изменяются по двум или трем осям, необходимо уточнить вид области  $V_c$ . В качестве гипотезы был предложен один из вариантов, согласно которому она имеет вид

аллипсоида. Большая полуось данного аллипсоида, очевидно, равна  $M$ . Поскольку с увеличением максимального градиента напряжений разрушение становится более локализованным, другие размеры (полусоси  $m_1$  и  $m_2$ ) примем зависимыми от отношений градиентов в разных направлениях:

$$m_1 = m_0 g_\sigma^{(1)} / g_\sigma, \quad m_2 = m_0 g_\sigma^{(2)} / g_\sigma. \quad (II)$$

Здесь  $g_\sigma$  - максимальный градиент напряжений;  $g_\sigma^{(1)}, g_\sigma^{(2)}$  - градиенты по двум другим осям. Отметим, что если градиент напряжений в одном из направлений незначителен, аллипсоид вырождается в эллипс. В результате получено, что критерий средних напряжений позволяет с удовлетворительной точностью прогнозировать разрушение при перечисленных видах нагружения. Таким образом, структурный параметр можно считать константой материала, не зависящей от схемы нагружения. Приближённость этого подхода очевидна, но тем не менее он позволяет более обоснованно подойти к оценке прочности.

Следует отметить, что применение критерия к телу с нарушением геометрической однородности и о трещиной позволило расширить границы его применимости. Поскольку градиенты высоки, напряжения в точке разрушения, строго говоря, не могут быть рассчитаны по критерию средних напряжений. Однако, поскольку осреднение производится по представительному объёму, критерий позволяет с достаточно высокой точностью прогнозировать интегральные прочностные характеристики, такие как номинальное разрушающее напряжение и коэффициент интенсивности напряжений  $K_{Ic}$ . Кроме того, из критерия вытекает зависимость  $K_{Ic}$  от длины трещины, т.е. аналог  $R$ -кривой для пластичного материала.

С использованием критерия сделана оценка прочности реальных графитовых деталей - блоков ядерных реакторов и электродов дуговых электросталеплавильных печей. Показано, что учет градиентов напряжений позволяет более точно прогнозировать момент образования макротрещин.

Критерий средних напряжений включён в "Нормы расчёта на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-О1-90".

### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. На основании проведённых испытаний образцов из двух марок реакторного графита на чистый изгиб с варьированием формы и разме-

ров поперечного сечения установлено, что диаграммы деформирования растянутых слоёв при различных градиентах практически совпадают, разница состоит лишь в разрушающих напряжениях и деформациях.

2. Проведённые расчётные и экспериментальные исследования показали, что в отличие от ряда других материалов повышение прочности графитов с ростом градиентов напряжений не может быть объяснено только влиянием нелинейности диаграммы деформирования и жёсткости испытательных систем.

3. На основании исследования микродеформаций графита с помощью цепочки тензорезисторов малой базы, соизмеримой с размером зерна, а также методом голографической интерферометрии установлено, что основным механизмом увеличения прочности структурно-неоднородного графитового материала с ростом градиента напряжений является более медленное развитие локальных микротрещин, связанных с переходом их вершин в области с меньшим уровнем напряжений. Замеры локальных зон микротрещин на образцах прямоугольного сечения показали, что разрушение (образование макротрещины) происходит, когда абсолютный размер зоны достигает предельной величины, равной некоторому структурному параметру.

4. Установлено, что разрушение изгибаемых графитовых образцов удовлетворительно описывается критерием прочности по средним напряжениям, согласно которому разрушение происходит, когда напряжение, осреднённое по структурному параметру, достигает предела прочности при равномерном растяжении. Кроме того, проведённый анализ экспериментальных данных, полученных автором и другими исследователями, показал, что приближённо, с учётом разбросов, структурный параметр можно считать константой материала, не зависящей от схемы нагружения, направления вырезки, температуры.

5. Установлено, что при высоте растянутой зоны изгибающего образца меньше структурного параметра, но большие суммарной длины 6–7 зёрен, не наблюдается возрастания предела прочности и разрушающей деформации с ростом градиента.

6. Определена минимальная величина градиента напряжений, ниже которой влиянием неоднородности напряжённого состояния на прочность графитовой детали можно пренебречь. Она рассчитывается через структурный параметр.

7. Проведены испытания при плоском напряжённом состоянии в области двухосного растяжения–сжатия. Построенная по экспериментальным данным поверхность разрушения для графита ГР-280 с доста-

точно высокой точностью описывается модифицированным критерием энергии деформации.

8. Разработана методика и проведены испытания на малоцикловое кручение в условиях нормальной и повышенных температур. Обнаруженные при кручении закономерности циклического деформирования и разрушения в основном соответствуют растяжению и сжатию. В отличие от линейного напряжёного состояния при кручении в мягком симметричном цикле наблюдается заметное падение числа циклов до разрушения по сравнению с пульсирующим циклом. Кроме того, в данном случае деформационный критерий дал значительную ошибку.

9. Установлено, что с приемлемой точностью разрушение неравномерно нагруженных графитовых образцов при циклическом кручении может прогнозироваться с помощью критерия прочности по средним напряжениям. При этом переход от растяжения к кручению осуществляется посредством модифицированного критерия энергии деформаций.

10. С использованием критерия средних напряжений сделана уточнённая оценка прочности реальных графитовых деталей - блоков ядерных реакторов и электродов дуговых печей. Результаты работы частично вошли в "Нормы расчёта на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-01-90" и используются на предприятиях НИКИЭТ, ИАЭ им. Курчатова, ОКБМ г. Нижний Новгород при проектировании аппаратов типа ВГР.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

1. Ивашков И.А. Методика испытаний и расчёта конструкционного графита при изгибе //Проблемы повышения прочности элементов машиностроительных конструкций: Тез.докл./Межреспубликанская студенческая научно-техническая конференция, Пермь, февраль 1983 г.- Пермь, 1983.- С.54-55.

2. Механика деформирования графитированных материалов при изгибе /В.Г.Артельных, В.П.Качаев, И.А.Ивашков и др.///Повышение качества и эксплуатационной стойкости углеродной продукции: Тез.докл. и сообщ./У Всесоюзная конференция электродной промышленности, Челябинск, сентябрь 1983 г.- Челябинск, 1983.- С.130-132.

3. Исследование влияния жёсткости нагружения на деформационные и прочностные характеристики графита /И.А.Ивашков, И.В.Кожевников, А.Ю.Постников, А.О.Черняевский //Современные достижения в области исследования, производства и эксплуатации углеродных материалов и изделий: Тез.докл. и сообщ./Всесоюзная конференция моло-

дых учёных и специалистов, Челябинск, май 1984 г.- Челябинск, 1984.  
- С.67-68.

4. Исследование механики деформирования графитовых материалов при изгибе /И.А.Ивашков, И.В.Кожевников, А.Ю.Постников, А.О.Чернявский //Современные достижения в области исследования, производства и эксплуатации углеродных материалов и изделий: Тез.докл.и сообщ./Всесоюзная конференция молодых учёных и специалистов, Челябинск, май 1984 г.- Челябинск, 1984.- С.72.

5. Деформационные и прочностные характеристики графита при силовом и кинематическом нагружении /И.А.Ивашков, И.В.Кожевников, А.Ю.Постников, А.О.Чернявский //Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузлениях: Тематический сб.науч.тр./Под ред. Д.А.Гохфельда.- Челябинск: ЧПИ, 1986.- С.87-93.

6. Ивашков И.А., Ботов С.Г., Никандров В.В. Деформирование и разрушение конструкционных графитов при сложном неоднородном напряжённом состоянии //Участие молодых учёных и специалистов в реконструкции и модернизации предприятий, во внедрении новой техники и технологий: Тез.докл.и сообщ./Областная научно-практическая конференция, Челябинск, октябрь 1986 г.- Челябинск, 1986.- С.14.

7. Ивашков И.А. Влияние градиента напряжений на деформирование и разрушение графитовых материалов //Прочностные и деформационные характеристики машин и конструкций: Межвуз.сб.науч.тр./Под ред.В.Л.Колмогорова.- Пермь: ИШИ, 1988.- С.56-65.

8. Ивашков И.А., Калагина С.М. Влияние градиента напряжений на разрушение графитовых материалов //Актуальные проблемы машиноведения: Тезисы докл./XII Юбилейная конференция молодых учёных Института машиноведения, Москва, январь 1989 г.- М., 1989.- С.100.

9. Ивашков И.А., Калагина С.М. Влияние градиента напряжений на разрушение графитовых материалов //Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузлениях: Тематический сб.науч.тр./Под ред. О.Ф.Чернявского.- Челябинск: ЧПИ, 1989.- С.61-69.

10. Ивашков И.А. Влияние градиента напряжений на разрушение графитовых материалов //Прочность машин и аппаратов при переменных нагрузлениях: Тематический сб.науч.тр./Под ред. И.Я.Березина.- Челябинск: ЧПИ, 1991.- С.63-67.

II. Ivaškov I.A. Stress gradient effect on graphite materials fracture//Fracture mechanics: successes and problems. Collection of abstracts/Eighth International Conference on Fracture, Ukraine, Kiev, june 1993.-Lviv, 1993.-Pt. II.-P.430.

Ивашков

Техн. редактор А.В.Миних

Издательство при Челябинском  
государственном техническом университете

---

ЛР №20364. 20.01.92. Подписано в печать 27.10.93. Формат бумаги  
60Х84 1/16. Печать офсетная. Печ. л. 1,25. Уч.-изд. л. 1.  
Тираж 100 экз. Заказ 275/531.

---

УОП издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И.Ленина, 76.