

6. Бобков В.П., Виноградов М.Н., Зятнина О.А., Козина Н.В. Метод описания кризиса в каналах сложного поперечного сечения. — Теплоэнергетика, 1995, № 3, с. 37—46.
7. Бобков В.П., Виноградов М.Н., Зятнина О.А., Козина Н.В. Относительное описание кризиса в сборках стержней и других сложных каналах. — Там же, 1997, № 3, с. 1—7.
8. Миронов Ю.В., Разина Н.С., Шпанский С.В. Пучок 2Б — программа для теплогидравлического анализа двухфазных потоков в стержневых сборках с учетом неомогенной структуры поперечного потока смешения. — В кн.: Теплофизические исследования для обеспечения безопасности ядерных реакторов водо-водяного типа, семинар ТФ-78, Будапешт, 1978, т. 2, с. 761—774.
9. Коштылек Я., Свитак Ф. Оценка моделей для поперечного массо- и энергообмена при анализе по ячейкам пучков тепловыделяющих стержней. — Там же, с. 775—790.

Поступила в Редакцию 23.04.99

УДК 539.12.043

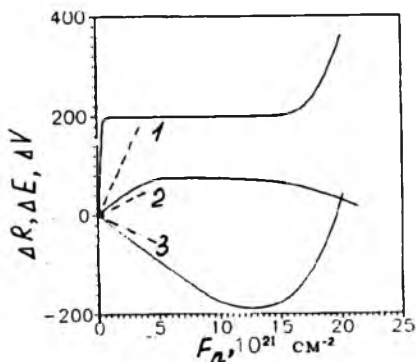
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАДИАЦИОННУЮ ПОВРЕЖДАЕМОСТЬ ГРАФИТА

Николаенко В.А., Карпунин В.И., Кузнецов В.Н., Платонов П.А., Алексеев В.М., Чугунов О.К., Штромбах Я.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т»), Балдин В.Д., Родченков Б.С., Смирнов Ю.И., Субботин А.В., Хандомиров Ю.Э. (НИКИЭТ), Лебедев И.Г. (ГНЦ РФ—НИИАР)

Настоящая работа посвящена определению критического флюенса нейтронов графита ГР-280 РБМК при учете влияния состава излучения (фактора состава излучения), представляющего отношение плотностей потоков нейтронного и γ -излучения.

Критическим принято считать флюенс нейтронов, при котором начинается интенсивная и необратимая деградация графита, в процессе которой материал почти полностью теряет присущие ему физические и механические свойства. На рис. 1 приведены графики изменения свойств графита в зависимости от флюенса нейтронов. Видно, что электросопротивление после резкого возрастания переходит к насыщению, но при достижении критического флюенса катастрофически увеличивается, при этом резко падает теплопроводность. Одновременно графит неограниченно распухает, стремится к минимуму модуль упругости и т.п.

Таким образом, критический флюенс нейтронов можно определять по изменению разных свойств графита, но обычно принято использовать для этого относительные изменения объема. Из рис. 1 видно, что по мере облучения графит сначала усаживается,



Р и с. 1. Зависимость электросопротивления (1), модуля упругости (2) и относительного объемного изменения (3) образцов графита от флюенса нейтронов при облучении в МР при 570 °С (—) и РБМК до флюенса нейтронов (3—4) 10^{21} см^{-2} (---)

что связано с закрытием технологических трещин, затем распухает. В момент, когда усадка компенсируется распуханием, начинается резкое увеличение объема, и флюенс нейтронов, при котором графит достигает этого состояния, был назван критическим. Эта величина в качестве меры предельного состояния графита используется в нормативных документах [1].

Следует отметить, и это очень важно, что критический флюенс нейтронов в экспериментах определяли при облучении графита в исследовательских реакторах, условия облучения в которых, естественно, отличаются от реальных в РБМК.

На рис. 2 приведена схема экспериментов по облучению графита для определения критическо-

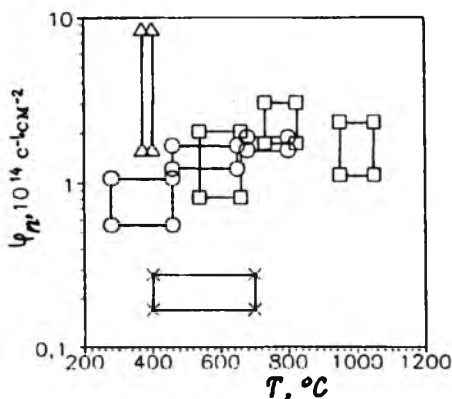
го флюенса. Видно, что температурный диапазон эксплуатации графита в РБМК перекрывается в экспериментах на исследовательских реакторах (МР, СМ-2, БОР-60), но плотность потока нейтронов в РБМК значительно ниже. При этом результаты, полученные в разных реакторах, оказалось невозможным объяснить, используя принцип эквивалентной температуры [2], который при приблизительно одинаковых условиях облучения (одинаковой температуре) позволял пересчитывать и «сшивать» результаты, полученные при разной плотности потока нейтронов.

Хотя непосредственная связь критического флюенса с плотностью потока нейтронов отсутствует, обнаруживается зависимость от плотности потока γ -излучения. Более того, выясняется, что не отдельно плотность потока повреждающих нейтронов или плотность потока γ -квантов влияют на радиационную повреждаемость графита, важно их отношение.

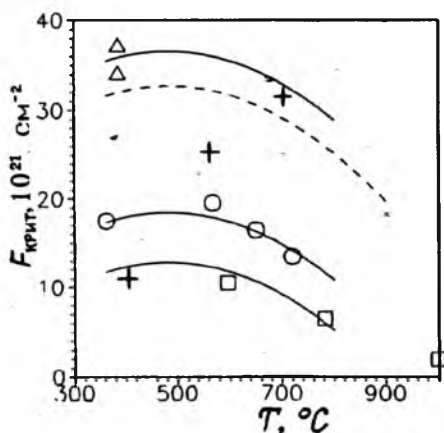
Действительно, свойства облучаемого материала зависят от концентрации и типа дефектов. При этом концентрация определяется скоростью создания дефектов, т.е. плотностью потока нейтронов, тип дефектов в большей мере контролируется γ -излучением, которое, конверсируясь в излучение электронов, трансформирует спектр дефектов, уже созданных нейтронами. Поэтому свойства облучаемого в реакторе материала определяются совместным влиянием плотности потока повреждающих нейтронов и γ -излучения. Во многих случаях это оказывается не менее значимым, чем флюенс быстрых нейтронов или температура облучения.

Влияние γ -излучения на радиационную повреждаемость впервые было обнаружено на модельном материале — алмазе [3]. Позже было проведено большое число экспериментов по облучению алмаза в разных каналах нескольких реакторов, в том числе с усиливающими и ослабляющими γ -излучение экранами [4]. Предварительно облученный в реакторе алмаз повторно облучали γ -квантами на источнике из радиоактивного кобальта и электронами в электронном микроскопе [5]. Результаты экспериментов показали, что при реакторном облучении проявляется эффект радиационного γ -отжига дефектов. Тогда же было предположено, что γ -излучение может влиять и на конструкционные материалы [6, 7].

Результаты экспериментов по определению критического флюенса нейтронов по схеме на рис. 2 (облучение графита в МР, СМ-2 и БОР-60) представлены на рис. 3. Видно, что, как это было известно уже ранее, критический флюенс нейтронов уменьшается с увеличением температуры облучения. Но более важно то, что этот флюенс еще более существенно (в диапазоне температуры облучения 400—800 °С) зависит от облучательного устройства. Например, при одной и той же температуре около 600 °С облучение в СМ-2 и МР приводит к критическому флюенсу нейтронов $11 \cdot 10^{21}$ и



Р и с. 2. Предел изменения температуры облучения и плотности потока нейтронов в экспериментах по определению критического флюенса нейтронов в МР (○), СМ-2 (□) и БОР-60 (Δ); условия облучения графита в РБМК (×)



Р и с. 3. Зависимость критического флюенса нейтронов графита ГР-280 от температуры облучения в МР (○), СМ-2 (□), БОР-60 (Δ) при факторе состава излучения 0,13, 0,1 и 4 соответственно и РБМК, наружное ребро блока (---) (расчет по уравнению, полученному путем статистического анализа)

$17 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ соответственно. Еще большая разница наблюдается при облучении при температуре 400°C в МР и БОР-60: $18 \cdot 10^{21}$ и $36 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Как уже отмечалось, предварительный анализ показывал, что критический флюенс нейтронов зависит от плотности потока γ -излучения и фактора состава излучения. Поэтому были проведены расчеты плотности потока и спектров γ -квантов для всех вариантов облучения графита в исследовательских реакторах. Расчеты выполнены по единой методике с помощью программ ANISN и DOT, и их результаты использованы для определения состава излучения и проведения статистического анализа.

Статистическую обработку данных проводили путем нахождения в результате анализа оптимального подмножества независимых переменных, соответствующего «наилучшей» регрессии, с использованием шаговой процедуры по методу «включения» [8]. На основании предварительного рассмотрения и из общих соображений в качестве независимых переменных приняты следующие факторы: температура облучения, плотность потока повреждающих нейтронов ($E_n > 0,18 \text{ МэВ}$), плотность потока энергии γ -излучения ($E_\gamma > 0,2 \text{ МэВ}$), состав излучения. Модель многомерных регрессий представляла собой полный кратный полином второй степени с парными взаимодействиями. Ввиду малого объема выборки данных — число строк регрессионной матрицы $n = 8$ анализ регрессий проводили в несколько этапов.

При варьировании переменных в пределах по температуре облучения от 360 до 780°C и составу излучения от $0,1$ до 4 нейтр./МэВ было получено уравнение регрессии при уровне значимости $\alpha = 0,15$. Если обозначить фактор состава излучения как ФСИ, уравнение можно написать в виде

$$F_{\text{крит}} = 19,85 + 0,0721T_{\text{обл}} - 7,49 \cdot 10^{-5}T_{\text{обл}}^2 - 2,44/\text{ФСИ}.$$

При этом среднеквадратичная ошибка составляет $1,55 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Для графитовых блоков, расположенных в активной зоне РБМК, фактор состава излучения равен $0,65$ — отверстие в блоке, $0,61$ — наружная грань блока и $0,55$ — наружное ребро блока, соответствующие значения критического флюенса нейтронов согласно приведенному выражению составляют для угла блока $32,7 \cdot 10^{21}$, $31,7 \cdot 10^{21}$ и $29,2 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ при температуре облучения 500 , 600 и 700°C .

Таким образом, критический флюенс нейтронов для графита ГР-280 при облучении в РБМК оказывается в $1,5$ — 2 раза больше, чем при облучении в МР, а именно данные об облучении в МР заложены в современные нормы прочности. Поэтому теперь имеются основания для их пересмотра.

Статистический анализ проведен при использовании всего восьми экспериментальных точек, которые, как видно из того же рис. 3, заполняют поле эксперимента недостаточно сбалансированно, и для повышения надежности результата желательно расширить поле этого фактически пассивного эксперимента. На рис. 3 символом + обозначены условия, в которых было бы целесообразно поставить контрольные эксперименты по определению критического флюенса нейтронов (в БОР-60 при повышенной, в СМ-2 при пониженной температуре облучения и факторе состава излучения 1 — 2). Такие эксперименты технически достаточно просто осуществимы, и на их проведение потребуется не более 2 лет. Эти эксперименты должны существенно улучшить исходные данные для дальнейшего уточнения статистических выводов.

Следует отметить, что полученное выражение для критического флюенса устойчиво. Чтобы проверить чувствительность результата к исходным данным, в расчетах были исключены экспериментальные точки с наиболее высоким значением флюенса или, например, с минимальной температурой облучения и т.п. Получаемые при этом уравнения регрессии незначительно отличались от основного, статистическая погрешность варьировала в пределах $(0,93$ — $2,57)10^{21} \text{ см}^{-2}$.

Корректность проведенных оценок критического флюенса нейтронов подтверждается и первыми результатами по облучению графита в условиях РБМК. Регламент эксплуатации реакторов типа РБМК предусматривает облучение в активной зоне (примерно в районе ребер блоков) образцов-свидетелей из того же графита ГР-280, и первые результаты исследования этих образцов-свидетелей, которые к настоящему времени уже облучены до флюенса нейтронов около $3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$, показывают, что темп радиационного повреждения графита в РБМК замедлен по сравнению с облучением в МР. Эти результаты для объемных изменений, модуля и электросопротивления приведены на рис. 1 пунктиром.

Полученные результаты показывают, что с помощью γ -излучения можно в определенных пределах целенаправленно воздействовать на скорость изменения свойств графита при облучении. Известно, что γ -кванты возникают в реакторе в результате трех процессов: деления урана, распада осколков деления и атомов, захвативших нейтроны. Средняя энергия γ -квантов около 1 МэВ. Плотность потока γ -излучения определяется удельным энерговыделением. Но она может варьировать за счет различий в поглощающих свойствах среды. Практически это означает возможность нового способа регулирования радиационной повреждаемости материала при реакторном облучении.

Радиационные явления, происходящие в графите, сложны, однако в области 500—700 °С образование дефектной структуры можно упрощенно описать следующим образом. Под действием быстрых нейтронов, вызывающих каскады соударений, формируются комплексы внедренных атомов и вакансий, размещающиеся параллельно базисным плоскостям графита. Комплексы из внедрений образуют островки зарождающихся дополнительных базисных кристаллических плоскостей, и это приводит к росту кристаллитов в направлении оси С.

Вакансионные комплексы, наоборот, вызывают сжатие кристаллитов по тому же направлению. Однако часть вакансий диффундирует на границы, что порождает дисбаланс этих двух типов комплексов. Следствием этого является рост кристаллитов в направлении оси С и усадка в перпендикулярном направлении.

В исходном состоянии графит характеризуется наличием специфической пористости, связанной с технологией изготовления. Поры-микротрещины ориентированы вдоль базисных плоскостей, и их закрытие за счет роста кристаллитов по оси С в первый период облучения обеспечивает начальную усадку поликристаллического графита при облучении.

После закрытия технологических трещин объем графита начинает увеличиваться — это процесс вторичного распухания, при котором анизотропное формоизменение кристаллитов за счет их силового взаимодействия приводит к деградации свойств графита.

γ -Излучение, конвертируясь в быстрые электроны, стимулирует диффузионные процессы и ускоряет трансформацию дефектной структуры, тем самым приближая начало деградации материала. В этом отношении эффект увеличения интенсивности γ -излучения по отношению к интенсивности потока нейтронов аналогичен эффекту повышения температуры, хотя механизм этих процессов различен.

Практическим результатом проведенной работы является возможность обоснования увеличения срока службы графитовой кладки РБМК по сравнению с оцениваемым на основе принятых в нормативных документах зависимостей, полученных главным образом на основе данных экспериментов в исследовательских реакторах МР и СМ-2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нормы расчета на прочность типовых узлов и деталей из графита уран-графитовых канальных реакторов НГР-01-90. М., 1990.
2. Valette L. Correlation of fast-neutron damage for HTGR core material. — In: Proc. Symp. Radiation Damage in Reactor Materials, v. 2. Vienna, 2—6 June 1969. Vienna: IAEA, p. 97—113.

3. Карпухин В.И., Чугунов О.К. Влияние реакторного гамма-излучения на радиационный отжиг дефектов: Препринт ИАЭ-1649, 1968. 38 с.
4. Nikolaenko V.A., Gordeev V.G., Karpukhin V.I. Effect of gamma-irradiation on defect annealing in diamond. — Rad. Eff., 1996, v. 139, p. 173—182.
5. Николаенко В.А., Карпухин В.И. Радиационный отжиг электронами и гамма-квантами облученного нейтронами алмаза. — Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 3, с. 194—197.
6. Николаенко В.А., Карпухин В.И., Гордеев В.Г. Влияние γ -излучения на кристаллические материалы при облучении в реакторе. — Там же, 1994, т. 77, вып. 3, с. 186—189.
7. Николаенко В.А., Карпухин В.И., Красиков Е.А. и др. Гамма-излучение как один из основных факторов влияния реакторного облучения на свойства металлов. — Изв. РАН, сер. Металлы, 1998, т. 2, с. 112—117.
8. Себер Дж. Линейный регрессионный анализ. Пер. с англ. под ред. М.Б. Малютова. М.: Мир. 456 с.

Поступила в Редакцию 6.04.99

УДК 539.12.043

ВЛИЯНИЕ НЕОДНОРОДНОСТИ ОБРАЗЦОВ ГРАФИТА НА ИХ ФОРМОИЗМЕНЕНИЕ ПРИ ОБЛУЧЕНИИ

*Николаенко В.А., Кузнецов В.Н., Платонов П.А., Чугунов О.К.
(РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Графит блоков РБМК, выполняя функцию замедлителя, одновременно служит несущим элементом конструкции. При этом графитовая кладка является единственной незаменимой частью конструкции, и ресурс реактора определяется ее работоспособностью. Поэтому на графит РБМК (графит марки ГР-280) обращено пристальное внимание.

Одним из основных параметров при определении ресурса графитовой кладки является критический флюенс нейтронов — флюенс, по достижении которого свойства графита как материала перестают удовлетворять требованиям эксплуатации.

При облучении изменяются многие физические и механические свойства реакторного графита: электро- и теплопроводность, прочность, параметры кристаллической решетки, объем и т.п. Но при превышении критического флюенса нейтронов ухудшение его характеристик нарастает лавинообразно: резко снижается теплопроводность, графит катастрофически распухает, фактически теряются его механические свойства. Поэтому критический флюенс нейтронов можно определять по разным свойствам, но обычно критерием служит изменение объема.

Критический флюенс нейтронов определяется по результатам экспериментов в исследовательских реакторах, где плотность потока нейтронов в десять раз больше, чем в РБМК. Это позволяет быстрее достигать высоких значений флюенса нейтронов и, следовательно, его критического значения.

Графитовые блоки изготавливаются горячим выдавливанием, поэтому графит обладает заметной текстурой, и это определяет различие его свойств в разных направлениях по блоку. Процедура исследования состоит в следующем: из готовых графитовых блоков вырезают образцы диаметром 5, длиной 40 мм в направлении оси — параллельная вырезка и в поперечном направлении — перпендикулярная вырезка. Торцы образцов обрабатывают на специальном приспособлении, которое обеспечивает их параллельность и чистоту поверхности, оговариваемые в нормах прочности [1].

Образцы помещают в реактор (МР, СМ-2, БОР-60 и БР-10) и после облучения измеряют их свойства.

Флюенс нейтронов оценивают расчетно-экспериментальным методом с использованием пороговых индикаторов активации. Температуру облучения определяют с помощью термопар, алмазных датчиков или расчетно.