

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

Е. И. Жмуриков, А.И. Романенко, О.Б. Аникеева,
К.В. Губин, П.В. Логачев, С.В. Цыбуля,
А.Т. Титов, Teschio Luigi

НАДЕЖНОСТЬ И СТАБИЛЬНОСТЬ
КОНВЕРТОРА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ
НЕЙТРОННОЙ МИШЕНИ
НА ОСНОВЕ ГРАФИТОВЫХ КОМПОЗИТОВ

ИЯФ 2005-2

Новосибирск
2005

**Надежность и стабильность
конвертора высокотемпературной
нейтронной мишени
на основе графитовых композитов**

Е.И. Жмуриков^{*}, А.И. Романенко^{**}, О.Б. Аникеева^{**},
К.В. Губин^{*}, П.В. Логачев^{*}, С.В. Цыбуля^{***},
А.Т. Титов^{****}, Tescchio Luigi^{*****}

* Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера

**Институт неорганической химии СО РАН им. А.В.Николаева

**Институт катализа СО РАН им. Г.К.Борескова

***Институт геологии СО РАН им. Трофимука А.А.

630090, Новосибирск, СО РАН

****Национальная лаборатория Леньяро,

Национальный институт ядерной физики, Италия

Аннотация

Проведены измерения проводимости образцов графитовых композитов МПГ-6 и МПГ-7 как исходных, так и после облучения мощным пучком электронов с энергией 1.4 МэВ и прогрева переменным током вплоть до температур, вызывающих разрушение образцов (свыше 2500°C). Показано, что прогрев образца, равно как и облучение пучком электронов, приводит к уменьшению сопротивления образцов и возрастанию дефектности на уровне макроструктуры. При этом вплоть до разрушения образцов не происходит сколь либо заметных изменений рентгеновской дифракционной картины и размеров областей когерентного рассеяния (ОКР). Вся совокупность данных позволяет предположить, что предел прочности графитовых композитов лимитируется межкристаллитной либо межзеренной границами.

© *Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

1. Введение

В ИЯФ СО РАН предложена схема мощного источника быстрых (с энергией до нескольких МэВ) нейтронов на основе дейтронного/протонного ускорителя. Основным узлом этого источника должна являться высокотемпературная нейтронная мишень с графитовым конвертором, охлаждаемая собственным тепловым излучением [1,2]. Ее особенностями являются высокие рабочая температура конвертора и градиент температуры до 1800 – 2000°C и 100°C/мм соответственно. Наиболее перспективным материалом для такого конвертора с точки зрения конструкционной прочности является мелкодисперсные углеродные композиты МПГ-6 или МПГ-7. Последний способен служить в качестве конвертора нейтронов при облучении дейтронным пучком. В данной работе исследовалась электропроводность и магнитосопротивление прогретых током образцов МПГ-7 с точки зрения влияния прогрева на прочность образца.

2. Особенности проводимости поликристаллических углеродных материалов

Абсолютная величина удельного сопротивления графита (и композитов на основе графита) определяется микроструктурой и текстурой материала. Дефекты микроструктуры и текстурные неоднородности (например, пористость) приводят к увеличению удельного электросопротивления, как это имеет место в несовершенных углеродных материалах. Проводимость совершенных (графитизированных) углеродных материалов выше на порядок.

Проводимость углеродных материалов осуществляется главным образом за счет π -электронов вдоль плоскостей гексагональных колец. Поскольку угли представляют собой, в сущности, переходную ступень от конденсированных полициклических соединений к графиту, то их проводимость должна зависеть от степени упорядоченности (графитизации). Хотя продукты карбонизации органических веществ, даже образующиеся при сравнительно низких температурах (600 – 800 К) уже содержат зародыши кристаллической структуры графита, а, следовательно, и проводящие системы, но последние могут быть отделены друг от друга изолирующими, не полностью разложившимися соединениями –

алифатическими цепочками. Это и создает большое сопротивление прохождению тока. При повышении температуры и длительности термообработки такие соединения выгорают, причем с тем большей скоростью, чем выше температура. Структура при этом упорядочивается, кристаллиты графита начинают соприкасаться друг с другом, создавая единую систему, что и вызывает резкое снижение сопротивления углей при их нагревании и активировании.

Удельное электросопротивление графитизированных материалов образует минимум в интервале температур 300 – 1300 К. При этом у более совершенных графитов минимум на температурной зависимости электросопротивления появляется при более низких температурах указанного интервала [3, стр.113]. Минимум в температурной зависимости удельного электросопротивления углеродных материалов обусловлен взаимодействием двух процессов: падением с ростом температуры электросопротивления аморфного углерода, который обладает полупроводниковыми свойствами, и ростом электросопротивления упорядоченного углерода, обладающего свойствами полуметалла при температурах выше 300 К. В процессе термообработки количество аморфного углерода уменьшается, в результате чего графит приобретает свойства полуметалла, поэтому минимум удельного электросопротивления сдвигается в сторону более низких температур.

Удельное электросопротивление поликристаллического графита зависит также от его плотности и размеров кристаллитов. В [4, стр.213] показано, что для одних и тех же блоков из графита различной плотности удельное электросопротивление обратно пропорционально плотности графита в четвертой степени. Такую зависимость электросопротивления от плотности нельзя объяснить лишь пористостью графитового материала, и что она связана, вероятно, с изменениями в области контактов между кристаллитами.

Для характеристики макроструктуры графитовых материалов используют данные электронной и оптической микроскопии, методы ртутной и газовой порометрии, данные по плотности и т.д. Однако из-за сложности учета формы пор и условий контактирования между кристаллитами полученные данные не всегда позволяют в полной мере прогнозировать влияние макроструктуры на свойства графита.

В работе [5] рассмотрена возможность количественной характеристики макроструктуры графита по величине K отношения электропроводности макрообразца σ_m к электропроводности σ_0 его беспористых микрообъемов.

По своему смыслу K является мерой связности макрообразца как единого целого и может изменяться от значения $K \cong 0$ для порошка графита до $K = 1$ для монокристалла. В некотором смысле связность является мерой сплошности, но, в отличие от последней, учитывает особенности контакта или взаимодействия между кристаллитами.

Оценка связности по K позволяет выделить влияние макроструктуры на свойства графита, и такая оценка обоснована для макроизотропных или слабоанизотропных графитов. Для графитов с большей макроанизотропией при определении связности в выбранном направлении необходимо учитывать текстуру образца – например, с помощью текстурного фактора F , сложным образом зависящего от анизотропии проводимости и взаимной пространственной ориентации соседних кристаллитов относительно оси текстуры [6].

3. Приборы и техника эксперимента

Порошковый дифракционный эксперимент был выполнен на дифрактометре URD-6 с использованием монохроматизированного $\text{CuK}\alpha$ -излучения. Дифрактограммы были сняты методом сканирования по точкам с шагом 0.05° и временем накопления 10 с в каждой точке в интервале углов $10 - 110^\circ$ по 2Θ .

Электронно-микроскопические съемки образцов были выполнены на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100С (Япония) при ускоряющем напряжении 100 кВ и разрешении 0.5 нм. Для съемки образцы готовили из спиртовых суспензий, капля которых помещалась на углеродные подложки, закрепленные на медных сетках-объектодержателях.

Температурные зависимости электросопротивления образцов измерялись на постоянном токе четырехконтактным методом в атмосфере гелия и на воздухе. Использовалась оригинальная установка с двумя измерительными блоками, рассчитанными на интервалы температур 4.2 – 300 К и 300 – 1100 К. Образцы для измерений изготавливались следующим образом – из исходной таблетки вырезался блок с размерами $1 \cdot 0.5 \cdot 10 \text{ мм}^3$. Электрические контакты приготавливались серебряной пастой G 3692 Acheson Silver DAG 1415 mit Pinsel (Германия) и имели сопротивление 1 Ом.

Магнитосопротивление и эффект Холла измерялся при температуре 4.2 К в атмосфере гелия на оригинальной установке со сверхпроводящим соленоидом до 1.15 Т. Образцом служила пластинка размерами $1.5 \cdot 0.2 \cdot 5 \text{ мм}^3$ вырезанная из исходной таблетки. Электрические контакты приготавливались серебряной пастой G 3692 Acheson Silver DAG 1415 mit Pinsel (Германия) и имели сопротивление 1 ом. Магнитосопротивление измерялось как при ориентации образца вдоль поля, так и поперек.

Микрофотографии были выполнены на растровом сканирующем микроскопе LEO 1430 VP с энергодисперсионным спектрометром EDX ONFORD.

Образцы графита МПГ-7 размером $60 \times 5 \times 1 \text{ мм}$ прогревались переменным током в вакууме 10^{-4} торр, температура образцов измерялась пирометром IS10 производства «Impac electronics».

4. Экспериментальные результаты и обсуждение

4.1 Рентгенография и микроскопия

На рентгенограмме (рис. 1) исходных образцов МПГ-6 и МПГ-7 проявляются дифракционные пики 001 и $hk0$ типа, причем последние имеют характерную асимметричную форму с более значительным размытием в сторону больших углов. Такая дифракционная картина соответствует турбостратной структуре графита [7], т.е. структуре, в которой графитоподобные сетки накладываются друг на друга случайным образом (со случайным вектором смещения одного слоя относительно другого и/или разворотом одного слоя относительно другого). Прогрев образцов МПГ-7 в вакууме вплоть до температур, вызывающих разрушение образца (выше 2500°C), не приводит к сколь либо заметным изменениям рентгенограммы образца.

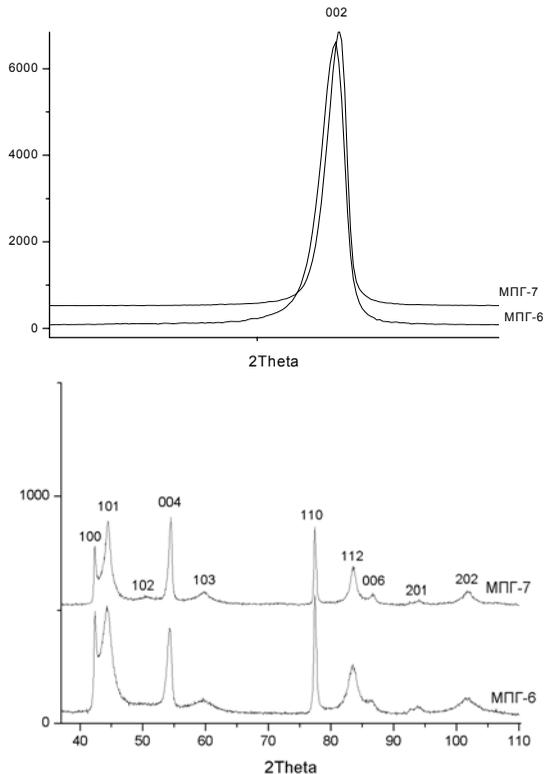


Рис. 1. Рентгенограмма образцов МПГ-6 и МПГ-7. Рефлекс 002 представлен отдельно.

На рентгенограмме образца МПГ-6 присутствуют практически все рефлексы, характерные для 2H политипа графита, однако степень их уширения очень различна. Узкие рефлексы типа 001 и hk0 свидетельствуют об относительно больших размерах областей когерентного рассеяния (областей, в пределах которых сохраняется периодическая структура) как в направлении, перпендикулярном к графитовым слоям, так и в плоскости слоев. В то же время значительное уширение пиков с индексами общего типа hkl означает, что в структуре этого образца сохраняется большое число дефектов упаковки (ошибок в чередовании слоев). Концентрация дефектов упаковки может быть установлена только из специальной процедуры моделирования дифракционной картины.

Параметры элементарной ячейки были уточнены методом наименьших квадратов (МНК) с помощью программы с использованием положений дифракционных максимумов. Оценка размеров области когерентного рассеяния (ОКР) и величины микроискажений проведена по полуширинам дифракционных пиков методом аппроксимации в приближении лоренцевской формы пиков. Для разделения эффектов уширения за счет размеров ОКР и микроискажений использовались полуширины дифракционных пиков 002 и 004.

Погрешности определения параметров решетки приведены в скобках, погрешность определения размеров ОКР составляет около 10%. Величина микроискажений характеризует вариацию межплоскостных расстояний (в данном случае, межслоевого расстояния в направлении [001]) и определяется как среднее относительное отклонение межплоскостного расстояния от его среднего значения $\varepsilon = \langle \Delta d \rangle / \langle d \rangle$.

Рентгенограмма образцов МПГ-7 характеризуется более узкими рефлексами общего типа hkl и, как следствие, меньшими размерами межплоскостного расстояния и микроискажений, а также несколько большими значениями ОКР.

В табл. 1 приведены параметры решетки и микроструктурные характеристики образцов. Для обоих образцов параметр решетки *c* далек от стандартной величины 6.7 Å, что, по-видимому, связано с высокой концентрацией дефектов упаковки (для определения этой величины требуется проведение дополнительных исследований и построение структурной модели с использованием методики [7]).

Таблица 1.

Образец	Параметры решетки		Размеры ОКР, Å		Величина микроискажений ε_{001}
	<i>a</i> , Å	<i>c</i> , Å	001 Lc	hk0 La	
МПГ-6	2.464(1)	6.766(3)	> 1500	250	0.0065
МПГ-7	2.464(1)	6.744(4)	> 1500	290	0.0040

На рис. 2,а представлена микрофотография данного образца, на которой видно, что он состоит из агрегатов большого размера (свыше 1000 нм), образованных, в свою очередь, тонкими ограненными пластинками в виде неправильных многогранников. Отдельная типичная пластинка с размером в поперечном направлении около 500 нм представлена на рис. 2,б. Картина микродифракции электронов, приведенная на врезке к рис. 2,а, является точечной, что свидетельствует о монокристаллическом характере структуры отдельной пластики, составляющей агрегат, а ее гексагональная симметрия указывает на то, что развитой плоскостью пластины является плоскость (111) графита.

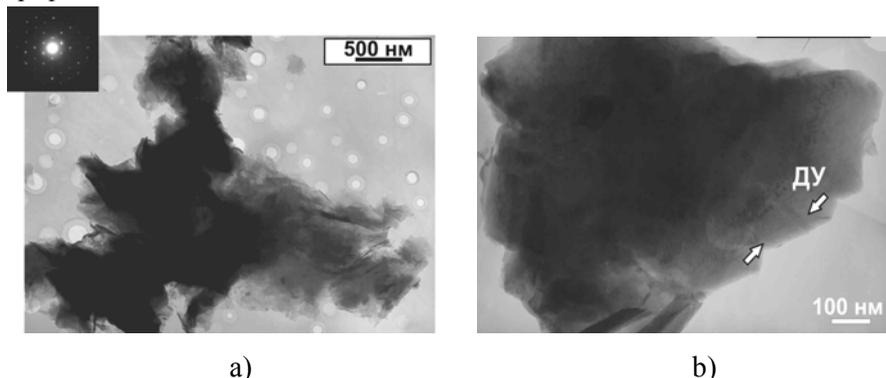
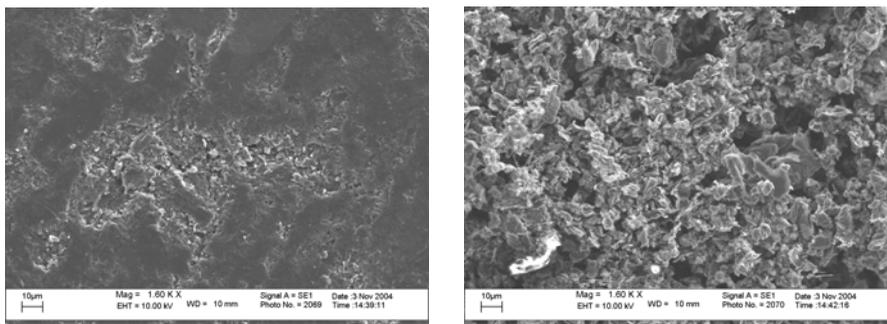


Рис. 2. Микрофотографии и микродифракционная картина образца МПГ-6. Электронно-микроскопические измерения выполнены на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100С (Япония) при ускоряющем напряжении 100 кВ и разрешении 0.5 нм.

В настоящее время представляется, что основными параметрами, влияющим на ресурс конвертора, является температура и время прогрева. Для исследования закономерностей разрушения были проведены исследования, моделирующие нагрев под воздействием нейтронного пучка с помощью пропускания через образец размером 60x5x1мм переменного тока. Закономерность такого моделирования подтверждается косвенно тем, что как при длительном воздействии (более 30 часов) высокоэнергетичного электронного пучка, так и при прогреве образца происходит заметное уменьшение сопротивления образца. Это уменьшение тем более существенно, чем выше температура или время прогрева образца.

На рис. 3 представлены микрофотографии поверхности образцов МПГ-7, выполненные при помощи электронного сканирующего микроскопа LEO 1430VP с энергодисперсионным спектрометром EDX OXFORD. В исходном образце наблюдается достаточно ровная поверхность, на которой текстурированные частицы имеют неправильную пластинчатую форму (рис. 3,а) Образец МПГ-7, прогретый до температур, вызывающих

разрушение образца, имеет гораздо более развитую поверхность с большим количеством пор и отверстий. Температура разрушения образца, к сожалению, не могла быть зафиксирована, поскольку пирометр не позволял производить измерения при температурах выше 2500°C [8].



a)

b)

Рис. 3. Поверхность образцов МПГ-7 при увеличении в 800 раз. Измерения выполнены на сканирующем электронном микроскопе LEO 1430VP: а) исходный образец б) прогретый переменным током до разрушения – снимок выполнен в области разрушения.

5. Измерения проводимости

Образцы МПГ-6 и МПГ-7 демонстрируют подобие кривых $\rho(T)$ кривым $\rho(T)_{II}$ кристаллов искусственного графита вдоль плоскости графеновых слоев. Увеличение удельного сопротивления $\rho(T)$ в 10 раз в МПГ-6,7 по сравнению с $\rho(T)_{II}$ связано с разориентацией графеновых плоскостей. Температурные зависимости кривых $\rho(T)$ у этих образцов выше 10 К определяются зависимостями характерными для квазидвумерных графитов [9-11].

Магнитосопротивление образцов МПГ-6 и МПГ-7 имеет две особенности. Первая – в слабых полях (до 500 Гс) наблюдается отрицательное магнитосопротивление связанное с квантовой интерференцией носителей тока в неупорядоченных системах при их диффузном движении (эффекты локализации) [9]. Отсюда следует вывод, что в образце МПГ-6 и МПГ-7 существует локальный беспорядок на атомном уровне, что и обеспечивает диффузный характер движения носителей тока. Вторая особенность – в полях выше 500 Гс наблюдается классическое положительное магнитосопротивление связанное с наличием пакетов графеновых слоев. Но малая величина этого положительного магнитосопротивления $\rho(H)/\rho(0) = 0.12$ при 11500 Гс по сравнению с

кристаллами графита $\rho(H)/\rho(0) = 3$ при 11500 Гс указывает на разориентацию этих графеновых слоев в пакете.

Кроме того, уменьшение соотношения $\rho(H)/\rho(0)$ при прогреве образцов МПГ-7 позволяет предположить, что дефектность слоев графитового композита увеличивается. К дефектам в микрокристаллах графита относятся точечные дефекты замещения и внедрения, вакансии, линейные дислокации, границы 2D кристаллитов и дефекты смещения самих слоев. Неизменность параметров ОКР вплоть до разрушения согласно рентгенографическим данным позволяет предположить, что именно увеличение количества планарных дефектов, т.е. границ 2D-кристаллитов, дислокаций и т.д. отвечает за уменьшение $\Delta\rho/\rho$ прогретых образцов МПГ-7 (рис. 4,б). Последнее обстоятельство находит косвенное подтверждение в том, что изменения в низкотемпературной области зависимости проводимости от температуры (рис. 4,а) свидетельствуют в пользу совершенствования кристаллической структуры области ОКР.

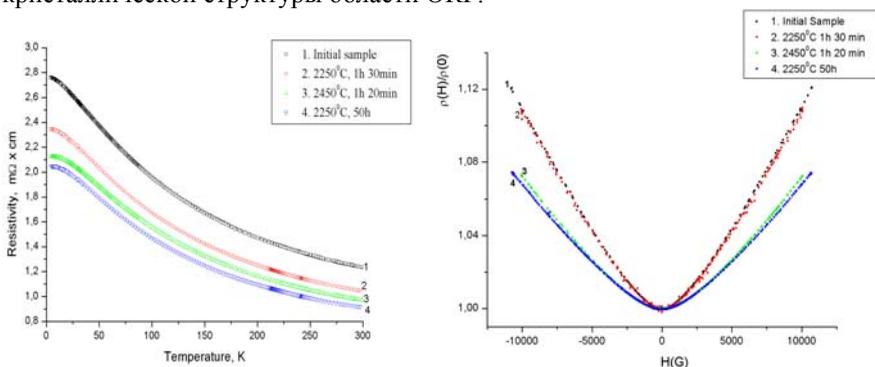


Рис. 4. а) температурная зависимость удельного электросопротивления прогретых и непрогретого образцов; б) относительное магнитосопротивление прогретых и непрогретого образцов.

Согласно [6], при расчете проводимости поликристаллических графитов с явно выраженной микротекстурой принимается модель макрооднородных полей, когда складываются проводимости отдельных кристаллитов с учетом их угловой ориентации. Хотя модель однородных полей является общепринятой, из-за высокой анизотропии электропроводности отдельных кристаллитов влияние деталей взаимного контакта между слоями соседних кристаллитов на проводимость образца может быть заметной. Так, в той же работе [6] предполагается, что повышенное по сравнению с расчетным сопротивление пиролитического углерода при низких температурах связано с тем, что для части углеродных слоев контакты с соседними кристаллитами или прерываются, или являются энергетическими барьерами.

Туннелирование (просачивание) через такого рода барьеры может объяснить такой вклад в составляющую проводимости (рис. 4,а), что общая макроскопическая проводимость образца увеличивается при прогреве образца. В приближении аппроксимации эффективной среды [12] этот вклад в макроскопическую проводимость образца с точностью до множителя можно выразить в виде:

$$\Delta \rho = \rho_0 a u_0^\nu \exp(u_c), \quad (1)$$

где a – ширина энергетического барьера, а u_0 , u_c представляют собой предельную и критическую высоту энергетического барьера. Выражение (1) получено в [12] в предположении равномерного распределения высоты барьеров

$$F(u) = 1/u_0 \quad \text{при } u \leq u_0 \\ 0 \quad \text{при } u > u_0 .$$

Здесь ν является так называемым критическим индексом, значение которого зависит только от размерности решетки и в случае трехмерной случайной решетки $\nu = 0.75$.

Можно предположить, что как облучение электронами, так и прогрев образца переменным током может приводить к уменьшению высоты и ширины барьеров (за счет выгорания части аморфного углерода, например), и, соответственно, к уменьшению величины $\Delta \rho$ в формуле (1)

Можно предположить также, что именно границы 2D-кристаллитов, а также границы зерен в еще большей степени, лимитируют также порог прочности графитового композита. Измерения в области отрицательного магнитосопротивления предполагают относительно небольшой рост числа точечных дефектов (вакансий, дефектов замещения и внедрения и т.д.) в области ОКР.

Для оценки подвижности μ_0 носителей заряда в беспористых объемах можно воспользоваться согласно [3] формулой:

$$\mu_0 = (1/H) \sqrt{\Delta \rho / \rho}, \quad (2)$$

где $\Delta \rho = (\rho(H) - \rho(0))$ есть увеличение магнитосопротивления образца при наложении магнитного поля, причем соотношением (2) можно пользоваться при $\mu_0 H \ll 1$. Проводимость беспористых микрообъемов можно определить из соотношения

$$\sigma_0 = e n_0 \mu_0, \quad (3)$$

где e – заряд электрона.

Тогда количественная оценка макроструктуры образца может быть произведена по величине отношения электропроводности макрообразца σ_m к электропроводности σ_0 его беспористых объемов:

$$K = \sigma_m / \sigma_0. \quad (4)$$

Для графитов с температурой получения выше 2400°C (к каковым относится и МПГ-7) концентрация и подвижность носителей заряда могут

быть оценены независимым способом. Обычно значение n_0 для графитов, получаемых из графитирующего сырья, близко к значению концентрации носителей для кристалла графита ($n \cong 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$) при 300 К.

Тогда для коэффициента связности исходного образца согласно формуле (4) получим $K \approx 0.3$, что представляется несколько заниженным по отношению к предельно возможному $K = 0.83$. Если $\sigma_0 = en_0\mu_0$ растет вследствие увеличения числа дефектов (и связанной с ними концентрацией несобственных носителей), то коэффициент связности уменьшается, и, следовательно, уменьшается прочность образца.

Таким образом, оценка связности K по σ_m и $\Delta\rho/\rho$ позволяет выделить влияние макроструктуры на свойства графита независимо от других структурных уровней. Для подтверждения в работе [5] проведено сопоставление значения K с модулем Юнга E графитов, полученных термообработкой до 2800°C серии композиций на основе прокаленного нефтяного кокса и каменноугольного пека.

Из сопоставления K и E , представленного на рис. 5, видно, что изменение модуля E с высоким коэффициентом корреляции действительно предопределяется изменением связности K .

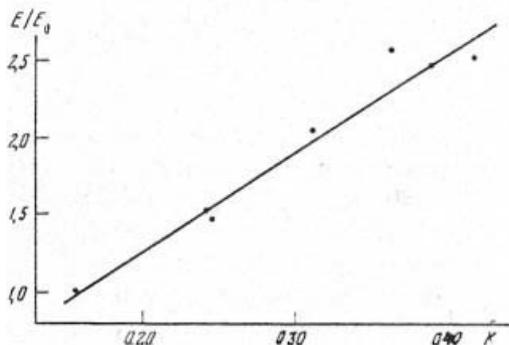


Рис. 5. Зависимость модуля E от связности K для серии образцов графита с одинаковой плотностью ($\gamma = 1.70 \pm 0.02 \text{ г/см}^3$) (данные из работы [3]).

Таблица 2. Паспортные данные графитового композита МПГ-7

Плотность, г/см^3	1.87
Предел прочности при сжатии, МПа	119.2
при изгибе, МПа	51.9
Удельное сопротивление, $\mu\Omega \cdot \text{м}$	9.5
Модуль Юнга, ГПа	10 – 12

Значение приведенного к нулевой пористости модуля Юнга:

$$E^0 = E/(1 - \varepsilon),$$

где ε – доля пористости в объеме материала, равная $(d - d_k/d)$,
при $d = 2.26 \text{ г/см}^3$ так называемой рентгеновской плотности материала
и $d_k = 1.87 \text{ г/см}^3$ так называемой кажущейся плотности графита МПГ-7.

Используя приведенное, уже не зависящее от пористости значение модуля Юнга, можно в соответствии с теорией Гриффитса [13] привести выражение для прочности:

$$\Pi_{\text{кр}} = \sqrt{2E\gamma / \pi c_k}. \quad (5)$$

Здесь $\Pi_{\text{кр}}$ является пределом прочности или разрушающего напряжения материала, γ – удельная поверхностная энергия разрушения (от $50 - 100 \text{ Дж/м}^2$ по одним данным и от $30 - 114 \text{ Дж/м}^2$ по другим [14], c_k – критический размер дефекта.

Уравнение Гриффитса в рассмотренной форме определяет прочность идеально хрупких материалов, вообще говоря. В современной форме эта идея выражается уравнением, подобным (5), где вместо γ используется сумма энергий поверхностной и пластической деформации. А для критического размера дефекта c_k вводится поправочный коэффициент $(1 - \nu)$, где ν есть коэффициент Пуассона [10].

Для мелкозернистых графитов (с размером зерна $100 - 200 \text{ мкм}$) в качестве критического дефекта выступают дефекты (поры, другие дефекты матрицы) с размерами, соизмеримыми не со средними, а самыми крупными зернами наполнителя, превышающими средний размер зерна в $3 - 10$ раз.[14]

И размер этих дефектов c_k существенно возрастает при прогреве образца (рис. 3,б), снижая прочность материала до состояния, вызывающего разрушение образца.

Авторы благодарят Крюкову Г.Н. за проведение высокоразрешающей микроскопии на просвет, Старостенко А.А. и Кот Н.Х. за подготовку образцов.

6. Выводы

Рентгенофазные измерения свидетельствуют в пользу того, что вплоть до разрушения под воздействием высоким температур не происходит сколь либо заметных изменений микроструктуры образца в пределах ОКР. В то же время измерения с помощью сканирующего микроскопа в области разрушения говорят о существенном изменении макроструктуры (текстуры) образца.

Измерения проводимости показывают, что прогрев образца переменным током либо облучением пучком электронов с высокой энергией (1.4 МэВ) сопровождается значительным снижением сопротивления образца.

Это снижение тем более существенно, чем выше температура и длительность прогрева. Предположительно, рост проводимости образцов МПГ-7 связан с увеличением концентрации планарных дефектов и связанной с ним концентрации дырочных носителей тока. При этом рост числа дефектов происходит преимущественно на границах 2D-кристаллитов, рост числа точечных дефектов (вакансий, дефектов внедрения и замещения) незначителен и не влияет на данные рентгенофазных измерений. Можно предположить, что именно границы кристаллитов и зерен, а не сами кристаллиты определяют порог прочности графитового композита на основе МПГ-6 и МПГ-7.

Литература

- [1]. *М.С. Авилов, А.В. Антошин, К.В. Губин, Н.Х. Кот, Н.Н. Лебедев, П.В. Логачев, П.В. Мартышкин, С.Н. Морозов, И.Л. Пивоваров, А.А. Старостенко, С.В. Шиянков* // Project of rotating carbon high-power neutron target. Conceptual design, Proc. of PAC-2001, Chicago, IL, 17-22 June 2001.
- [2]. *М.С. Авилов, К.В. Губин, Н.Х. Кот, П.В. Логачев, П.В. Мартышкин, С.Н. Морозов, А.А. Старостенко* // Project of rotating carbon high-power neutron target. Calculation of the target thermal and mechanical operation conditions, Proc. of PAC-2001, Chicago, IL, 17-22 June 2001.
- [3] Свойства конструкционных материалов на основе графита // Справочник под ред. В.П. Соседова, М., Мир, 1975, 336с.
- [4] Графит как высокотемпературный материал// М., Мир, 1964г., перевод под ред. К.П.Власова, 423 с.
- [5] *Котосонов А.С.* Характеристика макроструктуры искусственных поликристаллических графитов по электропроводности и магнетосопротивлению // ДАН СССР, Физическая химия, 1982, т. 262, №1, стр.133.
- [6] *Котосонов А.С.* Электропроводность углеродных материалов со структурой квазидвумерного графита // ФТТ, 1989, т.31, в.8, стр.146.
- [7] *Cherepanova S.V., Tsybulya S.V.* Simulation of x-ray powder diffraction patterns for low-ordered materials // J. Molec.Catalysis A: Chemical., 2000, v.158, p.263-266.
- [8] *M.S. Avilov, S.N. Fadeev, K.V.Gubin, A.I. Korchagin, A.V. Lavrukhin, P.V. Logatchev, P.V. Martyshkin, S.N. Morozov, S.V. Shiyankov, J. Esposito, L. Tecchio* // Test of materials for the high temperature intense neutron target converter, Proc. of third Asian Particle Accelerator Conference to be held in March 22-26, 2004 at Gyeongju, Korea.

- [9] *Кульбачинский В.А.* Двумерные, одномерные, нульмерные структуры и сверхрешетки // М., из-во МГУ, физфак, 1998г., 160с.
- [10] Романенко А.И., Аникеева О.Б., Окотруб А.В. и др. // ФТТ, 2002, т.44, вып.4, 634-637.
- [11] *A.I. Romanenko, A.V. Okotrub et al* // Solid State Communication, 2002, v.121, 149-153.
- [12] *Гантмахер В.Ф.* Электроны в неупорядоченных средах – Приложение А.4, М., Физматлит, 2003, 176с.
- [13] *Брок Д.* Основы механики разрушения, 1980, М., Высшая школа.
- [14] *Самойлов В.М.* Модуль Юнга и прочность различных классов искусственных графитов /Стендовый доклад Третьей Международной конференции: Углерод: фундаментальные проблемы науки, материаловедение, технология, 13-15 октября 2004, М., МГУ им. М.В.Ломоносова.

*Е. И. Жмуриков, А.И. Романенко, О.Б. Аникеева,
К.В. Губин, П.В. Логачев, С.В. Цыбуля,
А.Т. Титов, Tecchio Luigi*

**Надежность и стабильность
конвертора высокотемпературной
нейтронной мишени
на основе графитовых композитов**

*E.I. Zhmurikov, A.I. Romanenko, O.B. Anikeeva,
K.V. Gubin, P.V. Logachev, S.V. Tsybulya,
A.T. Titov, Tecchio Luigi*

**The reliability and stability convertor
of high temperature neutron target
on basis of graphite composites**

ИЯФ 2005-2

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев
Работа поступила 25.01.2005

Сдано в набор 27.01.2007

Подписано в печать 28.01.2005

Формат 60x90 1/16 Объем 0.9 печ.л., 0.7 уч.-изд.л.

Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 2

*Обработано на ИВМ РС и отпечатано
на ротанпринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*