

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
Ордена Ленина Сибирское отделение
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И. Будкера

Е. И. Жмуриков, А.И. Романенко, О.Б. Анисеева,
К.В. Губин, П.В. Логачев, С.В. Цыбуля,
А.Т. Титов, Tescchio 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.

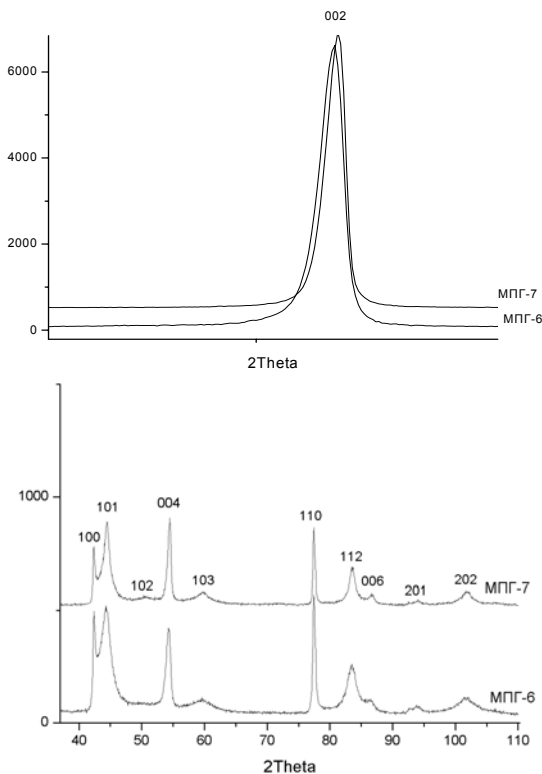


Рис. 1. Рентгенограмма образцов МПГ-6 и МПГ-7. Рефлекс 002 представлен отдельно.

На рентгенограмме образца МПГ-6 присутствуют практически все рефлексy, характерные для 2H политипа графита, однако степень их уширения очень различна. Узкие рефлексy 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.

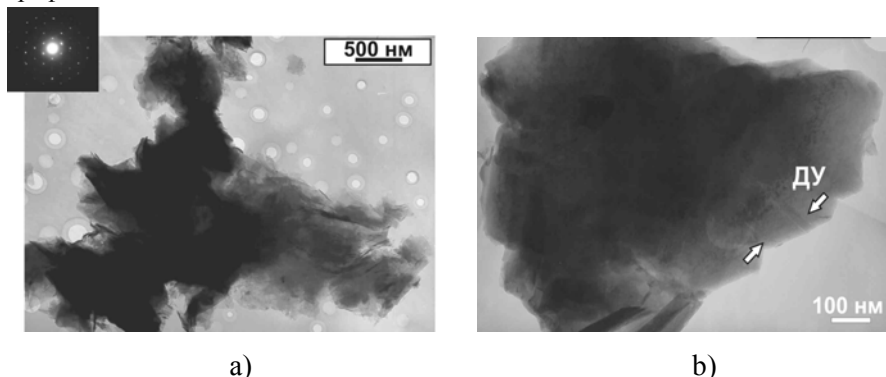
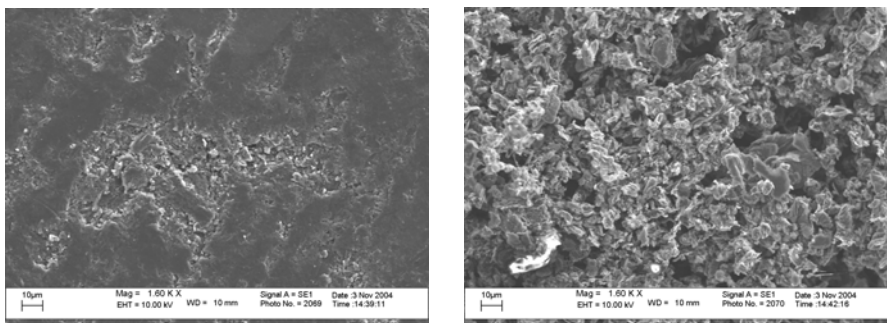


Рис. 2. Микрофотографии и микродифракционная картина образца МПГ-6. Электронно-микроскопические измерения выполнены на просвечивающем электронном микроскопе JEM-100С (Япония) при ускоряющем напряжении 100 кВ и разрешении 0.5 нм.

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.

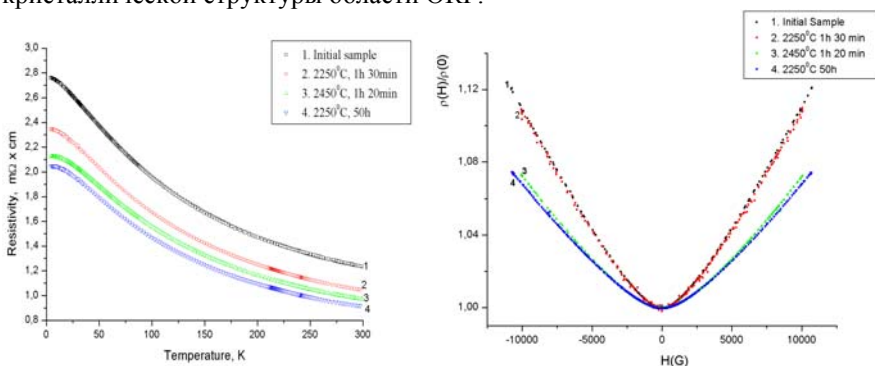


Рис. 4. а) температурная зависимость удельного электросопротивления прогретых и непрогретого образцов; б) относительное магнитосопротивление прогретых и непрогретого образцов.

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 .

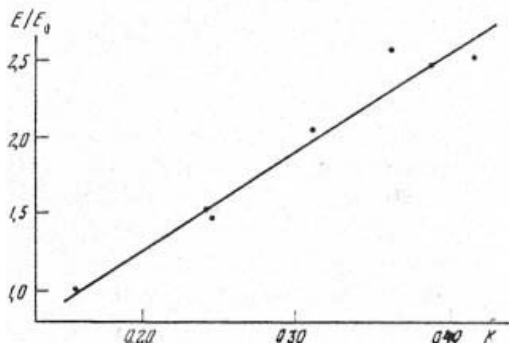


Рис. 5. Зависимость модуля E от связности K для серии образцов графита с одинаковой плотностью ($\gamma = 1.70 \pm 0.02 \text{ г/см}^3$) (данные из работы [3]).

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:

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

Здесь $\Pi_{кр}$ 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 ротапринтере ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН
Новосибирск, 630090, пр. Академика Лаврентьева, 11*