

ВОЗДЕЙСТВИЕ ИОННОГО ОБЛУЧЕНИЕ НА ПИРОЛИТИЧЕСКИЙ ГРАФИТ И УГЛЕРОДНЫЕ ВОЛОКНА

В данной работе были исследованы закономерности и механизмы процессов, вызванных в высокоориентированном пиролиитическом графите ПГВ и в углеродных волокнах на основе ПАН-волокна, входящих в состав композитного материала CFC type N 11 [1] облучением ионами дейтерия высокой плотности потока (1.4×10^{24} ион/м²с). Полученные во время экспериментов результаты были сравнены с результатами, опубликованными авторами других работ [2].

В экспериментах по облучению ионами дейтерия пиролиитического графита с направлением ионного потока по нормали к поверхности было показано, что ионное облучение приводило к возникновению и развитию сжимающих напряжений в приповерхностных слоях графита. В результате происходила фрагментация графеновых слоёв пиролиитического графита, их изгиб над поверхностью и, в итоге, формирование системы холмов.

При дальнейшем облучении образовавшейся системы холмов происходил обратный процесс: на их склонах формировались графеновые слои, параллельные поверхности пиролиитического графита. Этот же процесс приводил к образованию на вершинах холмов кристаллов с графеновыми слоями, которые также были направлены параллельно поверхности пиролиитического графита.

На боковой поверхности углеродных волокон типа onion-skin облучение ионами дейтерия приводило к формированию ряда гофр, направленных перпендикулярно оси волокна. Трансформация структуры поверхности происходила, если внедряющиеся в волокно ионы стимулировали развитие сжимающих латеральных напряжений в приповерхностных слоях волокна, а концентрации радиационных вакансий в этих слоях было достаточно для обратного выхода внедренных ионов. Как следствие, под действием фрагментации поверхностного слоя под действием напряжений и последующего изгибания над поверхностью частей фрагментов образовывались гофры.

В случае, если длина пробега ионов была сравнительно большой, максимум латеральных напряжений создавался в волокне на определённой глубине, а степень образования дефектов в структуре решётки слоёв графена

была недостаточной для выхода внедрённых ионов, на поверхности волокна образовывались складки, параллельные оси. Предполагается, что в данном случае механизм образования деформаций поверхности схож с механизмом образования блистеров [3]. Из-за особенностей структуры волокна, блистеры, образованные на его поверхности, принимали форму холмов, вытянутых вдоль их оси по линиям одинаковых уровней напряжений.

При облучении углеродных волокон типа *opion-skin* в торец, они обнажались, возвышаясь над окружающей их матрицей. Возвышение достигало в некоторых случаях до 10 мкм. Распыление заострило их, но не препятствовало их росту. Облучённые волокна претерпели трансформацию структуры, как минимум, оголённых участков. Они превратились в кристаллы с графеновыми слоями, перпендикулярными направлению облучения и оси волокна.

Как показано в работе [4], релаксация сжимающих напряжений, создаваемых в приповерхностных слоях облучаемого материала атомами поверхности, внедрённым ионным потоком, приводит к появлению кристаллов (вискеров). Скольжение дислокаций, развивающихся за счёт диффузии атомов, к поверхности, приводит к росту вискеров.

Образование графеновых слоёв, перпендикулярных оси волокон, во время рекристаллизации разрушенной облучением структуры их торцов может объясняться большой энергией связи между поверхностными атомами и, соответственно, меньшей величиной поверхностной энергии. При этом, подобное расположение слоёв затрудняет диффузию межузельных атомов на поверхность вследствие большого расстояния между двумя слоями, но облегчает образование и скольжение дислокаций, формирующих кристалл, растущий над поверхностью. Этими же процессами можно объяснить развитие графеновых слоёв, параллельных поверхности, на склонах холмов, образовавшихся на поверхности пиролитического графита, а также на кристаллах на их вершинах, имеющих схожую структуру.

По результатам данной работы можно заключить, что независимо от начальной ориентации графитовой и углеродной структур относительно поверхности и облучающего её ионного потока, они будут претерпевать последовательные взаимно перпендикулярные превращения.

Литература

[1] Л.Б. Беграмбеков, Н.А. Пунтаков, А.А. Айрапетов, А.В. Грунин, С.С. Довганюк, А.М. Захаров, Н.О. Саввин, С.А. Грашин, И.И. Архипов: Измерение характеристик мелкозернистого графита – материала первой

стенки токамака Т-15МД (Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования 2023, №12, с. 101-112)

[2] N.N. Andrianova, A.M. Borisov, E.S. Mashkova, M.A. Ovchinnikov, M.A. Timofyev, E.A. Vysotina: Surface patterns formation by ion irradiation of PAN based carbon fibers (Vacuum 188 (2021) 110177)

[3] Мартыненко Ю.В. Теория блистеринга. Препринт ИАЭ-3145, ИАЭ им. И.В.Курчатова, М., 1979

[4] Л.Б. Беграмбеков: процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения. Учебное пособие – М.: МИФИ, 2008. – 196 с.