

Особенности структур, осажденных из плазмы дугового разряда

Н. А. Смоланов[†], В. А. Неверов

[†]smolanovna@yandex.ru

Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева, ул. Большевистская 68, Саранск, 430005, Россия

Исследованы морфология (растровый электронный микроскопе Quanta 200 i 3D FEI), гранулометрия (Shimadzu SALD — 3101), фазовый состав (дифрактометр PANalytical Empyrian) и структура частиц, осажденных на стенках вакуумной камеры из низкотемпературной плазмы дугового разряда при распылении титанового катода. Частицы с сильномагнитными включениями образуют несколько фаз на основе распыляемого катода и реакционных газов — остаточных или подаваемых в вакуумную камеру для плазмохимического синтеза пленок. Анализ результатов гранулометрии частиц показал, что наиболее характерны распределения размеров для них типа гауссова, либо описываются убывающей степенной функцией, как и распределение частиц из токамака. При осаждении частиц из низкотемпературной плазмы дугового разряда на стенки вакуумной камеры их основные размеры находятся в пределах 70—130 мкм. Методом малоуглового рентгеновского рассеяния (малоугловой рентгеновский дифрактометр Hecus S3-MICRO) установлен фрактальный характер частиц. Определены фрактальные размерности неоднородностей порошков различных фракций в диапазоне 20—180 мкм. Установлено, что частицы исследованных порошков имеют структурные неоднородности нанометровых масштабов, причем их средние значения лежат в достаточно узком интервале ~20—30 нм. Это обусловлено условиями формирования дисперсных частиц, составом потока плазмы, параметрами электрического и магнитного полей в межэлектродном пространстве. Образование фракталоподобных агрегатов происходит в условиях неустойчивости фронта роста, когда небольшие возмущения фронта (поверхности раздела) начинают расти гораздо быстрее соседних участков. На основании полученных результатов сделано предположение об аналогичности процессов в низкотемпературной плазме, начинающихся с появления в катодном пятне мелкодисперсной капельной фракции, и капельно — паровой эрозии на стенках токамаков. Структуру полученного конденсата можно рассматривать как результат взаимодействия плазменно-пылевых структур в электрическом и магнитном полях. Вероятно, что исследуемые нами структуры из плазмы дугового разряда являются следствием особых свойств турбулентности плазменного потока с перемежаемостью.

Ключевые слова: дисперсные порошки, низкотемпературная плазма, катодное распыление, фазовый состав, малоугловое рентгеновское рассеяние, фрактальные структуры

Features of the structure, deposition from arc discharge plasma

N. A. Smolnov, V. A. Neverov

Ogarev Mordovia State University, Bolshevistskaya st., 68, Saransk, 430005, Russia

An investigation has been carried out on the morphology (scanning electron microscope Quanta 200 i 3D FEI), particle size (Shimadzu SALD-3101), phase composition (diffractometer PANalytical Empyrian) and the structure of particles deposited from the low-temperature plasma arc discharge on the walls of the vacuum chamber during the spray of a titanium cathode. Particles with a strongly magnetic inclusions form several phases on the bases of sputtering cathode and reaction gases, which are residual ones or introducing into the vacuum chamber in wch plasma-chemical synthesis of films occur. The analysis of the particle size showed that the most typical size distribution of the particles is of the Gaussian type, or the distribution of the particles is described by a decreasing exponential function, similarly to the distribution of the particles from the TOKAMAK. During the deposition of particles from the low temperature plasma arc discharge onto the walls of the vacuum chamber their basic sizes are within the range of 70—130 microns. Using the method of small angle X-ray scattering (small-angle scattering X-ray diffractometer Hecus S3-MICRO), it is shown that the particles possess a fractal structure. The fractal dimensions of the particles in powders of various fractions are determined to be in the range of 20—180 μm . It is found that the particles of the powders under investigation have structural inhomogeneities of nanometer scale, the average values being in sufficiently narrow range of ~ 20—30 nm. Probably, this is due to the conditions under which the formation of dispersed particles take places, the chemical composition of the plasma flow, the strength of electric and magnetic fields in inter-electrode space.

Formation of fractal-like aggregates occurs under the conditions of instability of the front of growth when small perturbations of the interface begin to grow much faster than neighboring areas. On the basis of the results obtained, the assumption is made on a similarity between the low-temperature plasma processes, beginning with the appearance finely dispersed drop fraction at the cathode spot, and drop-vapor erosion on the walls of TOKAMAK's. The resulting structure of the condensate obtained may be regarded as the result of the interaction of dust plasma structures in electric and magnetic fields. It is likely that the plasma arc discharge structures we have studied are a consequence of the specific properties of the turbulent plasma flow with intermittency.

Keywords: disperse powders, low-temperature plasma, cathode sputtering, phase composition, small-angle X-ray scattering, fractal structures

Введение

Вакуумный дуговой разряд является одним из распространенных методов синтеза соединений тугоплавких металлов и углеродных наноструктур и привлекает все большее внимание как метод создания новых материалов [1—5]. Электронно-микроскопические исследования микрочастиц, образующихся при этом процессе, обнаружили у них сильно развитую поверхность (рис.1) [3]. Исследования последних лет показали, что пылевые частицы в плазменных технологиях обладают интересными и полезными свойствами благодаря малым размерам и высокой химической активности. Поэтому их применяют либо при модификации поверхностей, либо при получении новых наноструктурных материалов, в частности — тонких пленок с включением частиц нанометрового размера. Выяснилось, что эти частицы с сильномагнитными включениями имеют несколько фаз на основе распыляемого катода и реакционных газов — остаточных или подаваемых в вакуумную камеру для плазмохимического синтеза пленок.

Анализ, проведенный нами, показал, что такие частицы по размерам, форме и некоторым свойствам подобны частицам, осажденным из плазмы управляемого термоядерного синтеза на стенках реактора [6]. Однако одинаковость морфологии частиц не является достаточным доказательством идентичности процессов их синтеза [6—8]. Изученная нами дисперсность частиц показала,

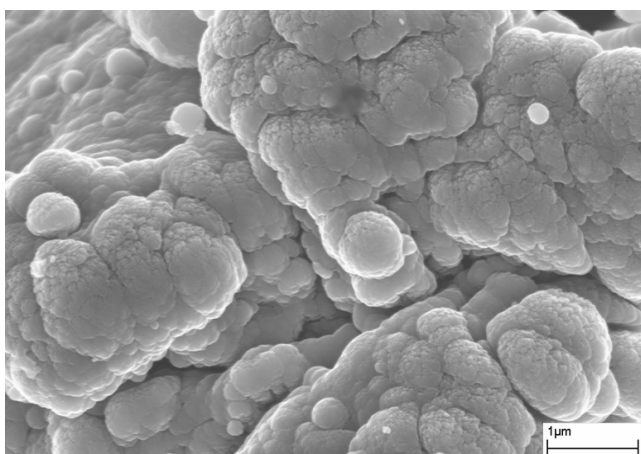


Рис. 1. Электронная микроскопия частиц, осажденных из плазмы дугового разряда.

Fig. 1. Electron Microscopy of particles deposited from plasma arc discharge.

что она зависит от условий и имеет одинаковый характер распределения с дисперсностью частиц из токамака. Гранулометрия частиц производилась на анализаторе размеров частиц Shimadzu SALD — 3101. Наиболее характерны распределения типа гауссового или описываемые убывающей степенной функцией (рис.2), как и распределения частиц из токамака, исследуемых в работе [6]. При осаждении частиц из низкотемпературной плазмы дугового разряда на стенки вакуумной камеры их основные размеры находятся в пределах 70—130 мкм.

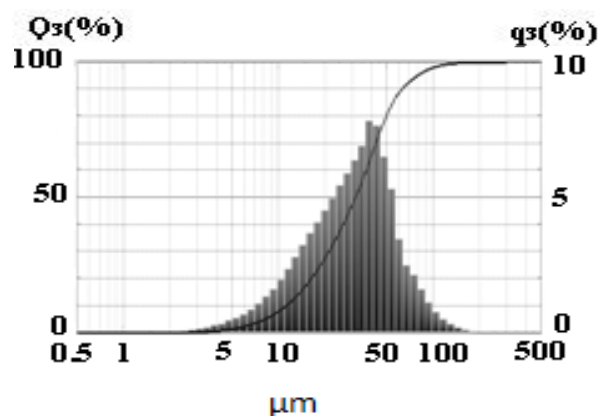


Рис. 2. Результаты гранулометрии исследуемых частиц.

Fig. 2. Results of the measured particle size distribution.

Для понимания механизмов образования таких частиц из низко — и высокотемпературных плазм и процессов, происходящих при этом, необходимо изучение строения частиц различного гранулометрического состава. Современные методы исследования строения и свойств вещества позволяют выявлять особенности топологии фрактальных объектов наноразмерного уровня, их распределение по размерам и т. д. К таким методам в первую очередь следует отнести метод малоуглового рентгеновского рассеяния.

Целью работы является изучение зависимости фазового состава и фрактальности микрочастиц, полученных из плазмы дугового разряда при распылении титана, от размеров гранул.

Материал и методика эксперимента

Исследуемые порошки получали из плазменного потока дугового разряда как попутный материал, осажден-

ный на стенках вакуумной камеры установки ННВ-6.6И4 в процессе нанесения тонких вакуумных Ti (N,C) - покрытий на подложке из стали 12X18H10T, расположенной в центре вакуумной камеры. Материал катода - титановый сплав ВТ1-0. Режим работы катодного узла: ток дуги — 75А, потенциал подложки во время осаждения - 220 В (при разогреве и ионной очистке - 500—600 В), давление смеси реакционных газов (азот+ацетилен) в камере - 10—2 Па, ток стабилизирующей магнитной катушки - 0,6 А. Порошок собирали со стенок вакуумной камеры пылесосом. После разделения на виброситах с диаметром ячеек 20, 60, 100, 140 и 180 мкм было получено и исследовано соответственно 5 групп порошков.

Исследования структуры и элементного состава проводились на растровом электронном микроскопе Quanta 200 i 3D FEI. Рентгенографические исследования атомно-кристаллической структуры и фазового состава проводили на дифрактометре PANalytical Empyrean в медном фильтрованном излучении.

Для исследования структурных неоднородностей дисперсных порошков применялся метод малоуглового рентгеновского рассеяния (МУРР) [9—11]. Наличие неоднородностей определялось путем индирования дифракционных спектров в области малых углов (0—8°). Результаты получены на малоугловом рентгеновском дифрактометре Несус S3-MICRO в интервале векторов рассеяния $s=0,007—0,600 \text{ \AA}^{-1}$ с использованием $\text{CuK}\alpha$ -излучения с Ni- фильтром ($\lambda=1,5418\text{\AA}$). Данный диапазон регистрации s позволяет исследовать частицы, кластеры, поры масштаба $L \approx 2\pi/s$ в пределах 1—90 нм.

Результаты и обсуждение

Рентгенографические исследования порошков выявили наличие у них четырех фаз (рис.3). Первая фаза представляет собой чистый титан с ГПУ кристаллической решеткой. Вторая фаза имеет аналогичную структуру (P63/m3m) с увеличенными параметрами решетки, ве-

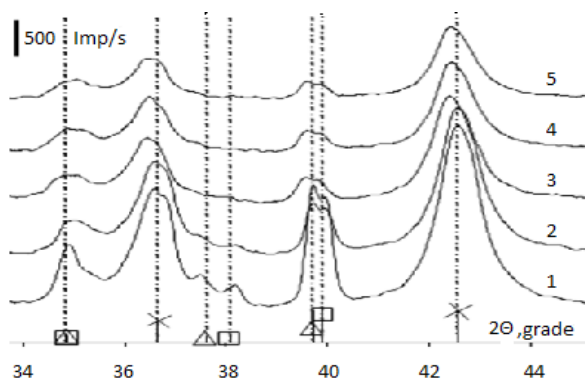


Рис. 3. Участки рентгеновской дифракционной картины от порошков различного размера (1—20 мкм; 2—63 мкм; 3—100 мкм; 4—140 мкм; 5—180 мкм). Внизу - штрих-рентгенограмма согласно данным картотеки PDF-2 (x— δ -TiN; □— α -Ti; Δ— α -Ti_{0.83}N_{0.17}).

Fig. 3. Plots the x-ray diffraction pattern from powders of different sizes (1—20 MKM; 2—63 μm; 3—100 μm; 4—140 μm; 5—180 μm). At the bottom-bar x-ray data files PDF-2 (x— δ -TiN; □— α -Ti; Δ— α -Ti_{0.83}N_{0.17}).

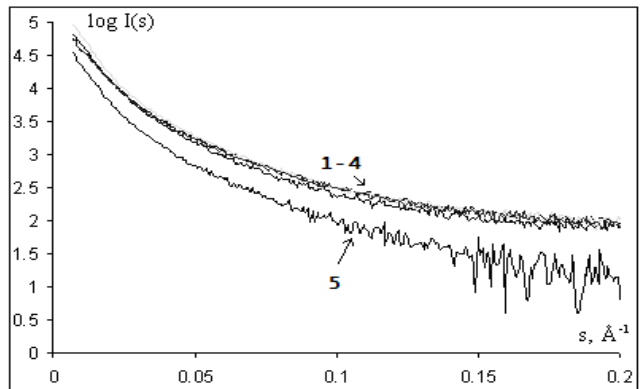


Рис. 4. Кривые малоуглового рассеяния исследуемых порошков размера (1—20 мкм; 2—63 мкм; 3—100 мкм; 4—140 мкм; 5—180 мкм).

Fig. 4. Curves of small angle scattering study of powder size (1—20 MKM; 2—63 μm; 3—100 μm; 4—140 μm; 5—180 μm).

роятно, вследствие присутствия в пустотах решетки атомов кислорода, азота и углерода. Содержание данных элементов для этой фазы равновероятно. Кроме того, образуется третья фаза с гексагональной решеткой другого структурного типа (Fm3m) с высоким содержанием кислорода. Четвертая фаза имеет ГЦК решетку типа хлорида натрия, которая характерна для нитридов переходных металлов.

Рассеяние рентгеновских лучей в области малых углов (МУРР) происходит на границах раздела различных структурных неоднородностей — гладких или шероховатых поверхностях первичных частиц, пор, кластеров, определяющих многие свойства дисперсного вещества [9—11]. На рис.4 представлены фрагменты экспериментальных кривых МУРР для образцов фракций 20, 63, 100, 140 и 180 мкм. Зависимости $\log I(s) - s$ симбатны. Следует отметить, что ход кривой МУРР порошка фракции 180 мкм отличается более низкими значениями интенсивности рассеяния во всем диапазоне значений векторов рассеяния s . Это может быть связано с большим поглощением рентгеновского излучения в материале частиц данной фракции. Кроме того, монотонный характер уменьшения интенсивности рассеяния во всем наблюдаемом интервале значений векторов рассеяния s , вероятно, связан с рассеянием на неоднородностях разных линейных масштабов.

Анализ хода зависимости $\log I(s) - s^2$ с помощью комплекса программ обработки данных малоуглового рассеяния ATSAS 2.1 [12] показал отсутствие области Гинье [9]. В этом случае средний радиус инерции R_g рассеивающих неоднородностей можно определить из максимума зависимости $I s^2 - s$ (график Кратки), и спользуя соотношение [9] $R_g = \sqrt{3}/s_m$, где s_m — значение вектора рассеяния, на которое приходится максимум зависимости $I s^2 - s$. Если считать рассеивающие образования однородными сферами радиуса R , то имеет место соотношение $3R_g^2 = 5R^2$ [11], следовательно, их линейные размеры можно оценить как $d=2R$. Результаты расчетов величин векторов рассеяния s_m , среднего радиуса инерции рассеивающих неоднородностей R_g и их линейные масштабы d для порошков исследуемых фракций представлены

Таблица 1. Значения векторов рассеяния s_m , средний радиус инерции неоднородностей R_g , линейные масштабы d

Table 1. The scattering vector value s_m , average radius of gyration R_g , linear scale of inhomogeneities d

| Фракция, мкм Fraction, mkm | $s_m, \text{\AA}^{-1}$ $s_m, \text{\AA}^{-1}$ | $R_g, \text{нм}$ R_g, nm | $d, \text{нм}$ d, nm |
|-------------------------------|--|--------------------------------------|----------------------------------|
| 20 | 0,0150 | 11,6 | 30,0 |
| 63 | 0,0190 | 9,2 | 23,5 |
| 100 | 0,0140 | 12,4 | 31,9 |
| 140 | 0,0180 | 9,6 | 22,0 |
| 180 | 0,0155 | 11,2 | 28,9 |

в табл.1.

Данные таблицы показывают, что частицы исследованных порошков имеют структурные неоднородности нанометровых масштабов, причем их средние значения лежат в достаточно узком интервале 20—30 нм, что, по-видимому, обусловлено условиями формирования дисперсных частиц, составом потока плазмы, параметрами электрического и магнитного полей в межэлектродном пространстве.

Анализ индикатрис рассеяния $I(s)$ — s в двойных логарифмических координатах позволяет выделить три участка с практически линейной зависимостью $\log I(s)$ — $\log s$: 0,010—0,012 \AA^{-1} ; 0,013—0,016 \AA^{-1} и 0,019—0,120 \AA^{-1} . Первый из них соответствует рассеивающим объектам масштаба 90—52 нм, второй - 50—40 нм, третий - 33—5 нм (см. табл.2). В таблице также представлены фракталь-

Таблица 2. Фрактальные размерности неоднородностей

Table 2. Fractal dimension of inhomogeneities

| Фракция, мкм Fraction, mkm | Линейные масштабы неоднородностей, нм Linear scale of inhomogeneities, nm | | |
|-------------------------------|--|-------|------|
| | 90-52 | 50-40 | 33-5 |
| 20 | 1,04 | 1,92 | 2,51 |
| 63 | 1,08 | 1,51 | 2,38 |
| 100 | 1,14 | 1,99 | 2,48 |
| 140 | 1,00 | 1,62 | 2,36 |
| 180 | 1,32 | 1,77 | 2,34 |

ные размерности неоднородностей порошков различных фракций.

Анализ фрактальных характеристик рассеивающих образований дисперсных порошков дает основание считать, что частицы, кластеры масштаба 90—40 нм, вероятно, могут представлять собой линейные фрактальные агрегаты, построенные из неоднородностей, представляющих собой слегка (90—52 нм) и сильно изогнутые (50—40 нм) цепочки сфер. Такого типа неоднородности вполне могут быть составляющими границ раздела кристаллов нано-, суб- и микрометровых размеров (см. рис.1).

Структурные неоднородности масштаба 33—5 нм представляют собой массовые (объемные) фракталы — частицы, плотность которых по мере удаления от их геометрического центра уменьшается. Возможно, они пред-

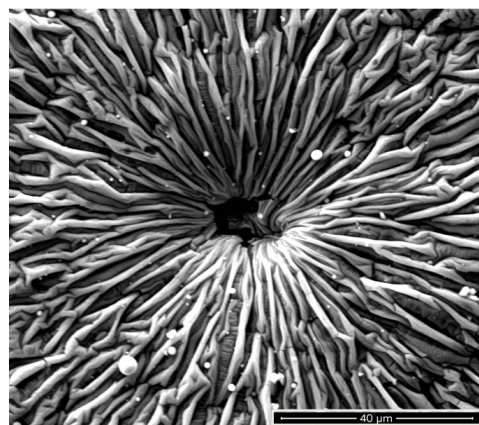


Рис. 5. Морфология пленки из частиц, осажденных на скотч в месте удара капли.

Fig. 5. Morphology of particles deposited on the tape at the impact location drops.

ставляют собой кластеры, сформированные из более мелких частиц в процессе охлаждения плазмы на стенках вакуумной камеры. В целом, частицы разных фракций имеют сходные характеристики наноструктурных неоднородностей.

Индикатрисы МУРР дисперсных частиц, осажденных на клейкую ленту — скотч (фото поверхности (пленки), образованных этими частицами, приведено на рис.5), имеют ряд особенностей. Во-первых, в области малых значений вектора рассеяния s наблюдается режим рассеяния Гинье [9] (рис.6). Это позволяет предположить, что, по крайней мере, часть рассеивающего рентгеновское излучение дисперсного материала сформировано сферическими частицами примерно одного размера. Расчет показал, что радиус инерции этих неоднородностей $R_g=30,5$ нм, что отвечает линейным размерам $d \approx 79$ нм.

Во-вторых, по кривой зависимости $I(s)$ — s наблюдается слабо выраженный максимум с $s_m=0,029 \text{\AA}^{-1}$, что соответствует среднему значению радиуса инерции рассеивающих частиц дисперсной системы около 6 нм и $d \approx 15$ нм. Кроме того, данный дисперсный материал, осажденный в виде пленки, в интервале значений $0,01 < s < 0,15 \text{\AA}^{-1}$ имеет режим рассеяния, не позволяющий однозначно установить фрактальные характеристики неоднород-

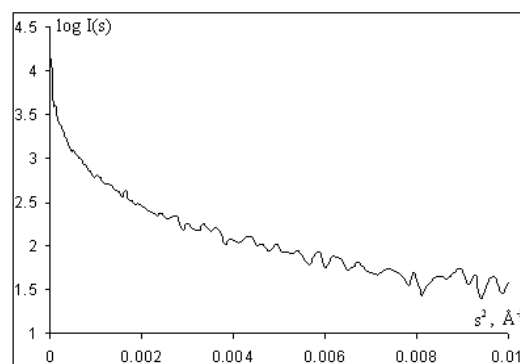


Рис. 6. Кривая зависимости $\log I(s)$ — s^2 частиц, осажденных на скотч.

Fig. 6. Log curve $I(s)$ — s^2 particles deposited on the tape.

ностей масштаба 63—4 нм. Вероятно, при осаждении частиц на скотч происходит их коагуляция и сфероидизация, сопровождаемая структурными искажениями [4,13]. При этом возможно образование кластеров новых соединений как в самой плазме, так и при ее конденсации на стенках охлаждаемых вакуумных камер.

Заключение

Сравнение структуры и свойств частиц, образующихся при вакуумно-дуговом разряде и управляемом термоядерном синтезе, дает основание сделать заключение об аналогичности процессов в низкотемпературной плазме, начинающихся с появления в катодном пятне мелкодисперсной капельной фракции, и капельно - паровой эрозии на стенках токамаков [6—8].

Исследуемый мелкодисперсный порошок можно рассматривать как металлосодержащую структуру переменного элементного и фазового состава. В нем сорбируются реакционные газы, образующие сложные соединения, в том числе и с титаном. Зародышами структуры, вероятно, являются микрокапли Ti различных размеров, возникающие в катодном пятне и кристаллизующиеся затем на стенках вакуумной камеры в неравновесных условиях.

При движении от поверхности катода до стенок вакуумной камеры частицы испытывают переход жидкое - твердое агрегатное состояние. На начальном этапе (жидкая фаза) микрочастица интенсивно взаимодействует с остаточной атмосферой и средой реакционных газов. В результате в ее приповерхностном слое вследствие диффузионных механизмов происходит растворение кислорода, азота и углерода. По мере пролета капля остывает, диффузионные процессы замедляются. Углерод, азот и кислород растворяются лишь в приповерхностном слое (возможен механизм карбидного цикла [15]). В центре капли остается чистый титан. По мере остывания в поверхностном слое формируется ГПУ решетка с дефектами внедрения. Далее образуется карбонитридная оболочка с включениями кислорода (ГЦК - решетка).

Фрактал - это форма, части которой каким-либо образом подобны целому. Фрактальная размерность D служит показателем в степенном законе вида $M(\lambda, r) = \lambda^D M(r)$, где M - некоторое «свойство» данного фрактала, а D - дробное число. Если фрактальный агрегат формируется из кластеров, то его фрактальная размерность имеет значение $D=1,94$. Это соответствует рыхлому агрегату с межкластерными порами. Такое строение фрактального кластера будет определять его специфические «свойства», например, его массу [16].

В настоящее время нет общей схемы описания неравновесных процессов, в том числе и агрегации наночастиц. Существует набор правил, устанавливающих типы и способы сближения объектов (частиц), их траектории и виды взаимодействия (диффузионно — контролируемые, реакционно-контролируемые и т.д.). Общий подход к природе образования фракталоподобных агрегатов заключается в предположении, что они возникают в условиях неустойчивости фронта роста, когда небольшие возмущения фронта (поверхности раздела)

начинают расти гораздо быстрее соседних участков. Физическое описание неустойчивости поверхности роста основано на уравнении Лапласа с определенными граничными условиями [16].

Вероятно, что исследуемые нами структуры из плазмы дугового разряда являются следствием особых свойств турбулентности плазменного потока с перемежаемостью [7,17,18]. Перемежаемость - это локальное нарушение однородности турбулентности, когда активные области течения (потока) сосуществуют с пассивными (квазиламинарными). Явление наблюдается в гидродинамических турбулентных течениях нейтральных сред и турбулентной замагниченной плазме, в том числе пристеночной плазме токамака и в турбулентных пограничных магнитосферы Земли [17]. Перемежаемость проявляется на сигналах в виде всплесков большой амплитуды и может привести к образованию объектов разной мерности - диссипативных структур. Поэтому структуру полученного конденсата можно рассматривать как результат взаимодействия плазменно-пылевых структур в электрическом и магнитном полях. Более глубокий анализ результатов исследования структуры может быть дан с учетом распределения плотности тока в токовых слоях плазмы и их магнитного поля [18].

Благодарности. Результаты были получены на оборудовании центра коллективного пользования Института физики и химии Мордовского государственного университета им. Н.П.Огарева.

Авторы благодарны доценту Панькину Н.А., ведущему инженеру Мишкину В.П. за проявленный интерес к работе.

Acknowledgements. The results were obtained on equipment center for collective use of the Institute of Physics and Chemistry of Mordovia State University N.P.Ogareva.

We are grateful to associate professor Pankin N.A., senior engineer V.P. Mishkin for your interest in the work.

Литература / References

1. A. V. Ushakov, I.V. Karpov, A. A. Lepeshev. Materialovedeniye. **3**, 48—51 (2012). (in Russian) [А.В. Ушаков, И.В. Карпов, А. А. Лепешев. Материаловедение. **3**, 48—51 (2012).]
2. A.S. Saygash, A. A. Sivkov. Nanotekhnika. **2**, 62—66 (2008). (in Russian) [А.С. Сайгаш, А.А. Сивков. Нанотехника. **2**, 62—66 (2008).]
3. N. A. Smolanov, N. A. Pankin, V.V. Batin, E. P. Pavkin. Prikladnaya fizika. **1**, 30—34 (2014). (in Russian) [Н.А. Смоланов, Н.А. Панькин, В.В. Батин, Е.П. Павкин. Прикладная физика. **1**, 30—34 (2014).]
4. N. A. Klinskaya, E. B. Koroloyva, V. A. Petrunichev and other. **5**, 74—77 (1986). (in Russian) [Н.А. Клинская, Е.Б. Королева, В.А. Петруничев. Физика и химия обработки материалов. **5**, 74—77 (1986).]
5. N. A. Smolanov, V. A. Neverov, A. A. Panov.

- Bystrozakalennyye materialy i pokrytiya. Sb. trudov. M. MATI. **2**, 231—237 (2013). (in Russian) [Н. А. Смоланов, В. А. Неверов, А. А. Панов. Быстрозакаленные материалы и покрытия. Труды 12-ой Всероссийской с международным участием научно-технической конференции в 2-х томах. Сб. трудов. М. МАТИ. **2**, 231—237 (2013).]
6. <http://ufn.ru/ru/articles/2010/10/c/> [В. И. Крауз, Ю. В. Мартыненко, Н. Ю. Свечников, В. П. Смирнов, В. Г. Станкевич, Л. Н. Химченко. УФН. **180** (10), 1055—1079 (2010).]
7. V.P. Budaev, L.N. Khimchenko. Fractal Grown of Deposited Films in Tokamak: Preprint IAE-6404/7. — M. (2006).
8. A.D. Zalavutdinov, A.E. Gorodetsky, A.P. Zaharov. Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser. Termoyadernyy sintez. **1**, 39—45 (2011).] (in Russian) [Р. Х. Залавутдинов, А. Е. Городецкий, А. П. Захаров. Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. **1**, 39—45 (2011).]
9. D. I. Svergun, L. A. Feigin. X-ray and neutron small-angle scattering. M. Nauka. Ed. by Sci. Lighted. (1986) 280 p. (in Russian) [Д. И. Свергун, Л. А. Фейгин. Рентгеновское и нейтронное малоугловое рассеяние. М. Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. (1986) 280 с.]
10. V.P. Selyaev, V.A. Neverov. Apparatura i metody issledovaniya dispersnykh sistem, Innovatsionnoye obrazovaniye. **4** (7), 71—120 (2013). (in Russian) [В. П. Селяев, В. А. Неверов. Инновационное образование. **4** (7), 71—120 (2013).]
11. T. N. Vasilevskaay, T. V. Antropova. Solid State Physics. **51** (12), 2386—2393 (2009). (in Russian) [Т. Н. Василевская, Т. В. Антропова. // Физика твердого тела. **51** (12), 2386—2393 (2009).]
12. P. V. Konarev, M. V. Petoukhov, V. V. Volkov, D. I. Svergun. ATSAS 2.1, a program package for small-angle scattering data analysis. J. Appl. Cryst. **39**, 277—286 (2006).
13. E. L. Dzidziguri, V. V. Levina, E. N. Sidorova. Fizika metallov i metallovedeniye. **91** (6), 51—57 (2001). (in Russian) [Е. Л. Дзидзигури, В. В. Левина, Е. Н. Сидорова. Физика металлов и металловедение. **91** (6), 51—57 (2001).]
14. L. G. Diachkov. Mekhanizmy vrashcheniya plazmennopylevykh struktur v razryadakh postoyannogo toka v prodolnom magnitnom pole. Fizika nizkoterperaturnoy plazmy — 2011: materialy Vserossyskoy (s mezhdunarodnym uchastiyem) konferentsii. Petrozavodsk, PetrGU. **2**, 152—158 (2011). (in Russian) [Л. Г. Дьячков. Физика низкотемпературной плазмы — 2011: материалы Всероссийской (с международным участием) конференции Петрозаводск, Изд-во ПетрГУ, **2**, 152—158 (2011).]
15. R. A. Buyanov, V. V. Chesnokov. Khimiya v interesakh ustoychivogo razvitiya. **13**, 37—40 (2005). (in Russian) [Р. А. Буянов, В. В. Чесноков. Химия в интересах устойчивого развития. **13**, 37—40 (2005).]
16. M. Cleman, O. D. Lavrentovich. Soft matter physics: An introduction. NY-Berlin-Heidelberg: Springer (2002) 637 p. [М. Клеман., О. Д. Лаврентович. Основы физики частично упорядоченных сред: жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимеры и биологические объекты. М. ФИЗМАТЛИТ (2007) 680 с.]
17. <http://ufn.ru/en/articles/2011/9/a/> [В. П. Будаев., С. П. Савин., Л. М. Зеленый. УФН. **181** (9), 905—952 (2011).]
18. G. V. Ostrovsky. Journal of Technical Physics. **83** (4), 59—68 (2013). (in Russian) [Г. В. Островская. ЖТФ. **83** (4), 59—68 (2013).]