

О роли токовых слоев в плазме дугового разряда при образовании фрактальных агрегатов

© Н.А. Смоланов

smolanovna@yandex.ru

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

В работе представлен обзор результатов исследования структур дугового вакуумного разряда. Они осажжены на стенках вакуумной камеры. Проведен анализ процессов в низкотемпературной плазме дугового разряда, отвечающих, вероятно, за появление и рост фрактальных структур. В основе анализа лежат фундаментальные теоретические и экспериментальные результаты магнитной гидродинамики (плазмодинамики). Показано, что теория фрактала приобретает основную роль при объяснении коллективного поведения сложных систем.

***The role of current layers in arc-discharge plasma by fractal units formation. N.A. Smolanov.** The paper presents a review of the investigation results of arc vacuum discharge structures. They are deposited on the walls of the vacuum chamber. The analysis of processes in a low-temperature plasma of an arc discharge, which are probably responsible for the appearance and growth of fractal structures, is carried out. The analysis is based on the fundamental theoretical and experimental results of magnetic hydrodynamics (plasmodynamics). It is shown that fractal theory acquires the main role in explaining the collective behavior of complex systems.*

Введение. К основным фундаментальным проблемам современной науки и технологии относится модификация поверхности и разработка многофазных нанокристаллических и аморфных слоев, придающих материалам новые свойства и функциональные возможности. Одними из методов их создания являются ионно-плазменные методы (вакуумно-дуговой метод, магнетронное распыление и т.д.) обработки поверхности твердого тела. Механизмы физических и химических процессов, протекающих как в источнике низкотемпературной плазмы (распыляемого катода), вблизи его, так и в поверхностном слое подложки и стенок вакуумной камеры при воздействии потока различных энергетических частиц (атомы, ионы, кластеры, макрочастицы и т.д.) до конца не выяснены. Исследование эволюции низкотемпературной плазмы дугового разряда при получении функциональных покрытий и модифицированных ионно-плазменным потоком поверхностей производится зондовыми, эмиссионными методами, а также изучением осажденных из плазмы структур.

Дуга как один из видов электрического разряда является предметом изучения в целом и катодного пятна в отдельности [1,2]. Она рассматривается как 1 - источник плазмы, 2 - объект магнитной электродинамики, 3 - источник заряженных и

нейтральных микрочастиц в твердом и жидком состояниях, 4 – в процессах расширения вещества в вакуум и т.д. Основы технологических процессов в плазменных системах нанесения тонких пленок, в частности, дуговым и магнетронным методами, были заложены в работах создателя стационарного плазменного двигателя (СПД), основателя плазмооптических систем и в целом магнитной гидродинамики (МГД) А.И.Морозова. Говоря о многообразии вакуумных плазменных технологий он подчеркивал о недостаточном внимании к 2-м принципиальным моментам: «...созданию плазмы и ее гибели на стенках рабочего объема» [3, стр.12].

Конденсируемые на подложке и стенках вакуумной камеры частицы генерируются катодным пятном при наличии внешних магнитного и электрического полей. Существующие представления и модели не могут полностью объяснить многие явления процессов формирования структур особого типа, в частности, столбчатых, пористых, нанокристаллических, фрактальных. Отсутствие развитой физической основы теории кристаллизующейся и затвердевшей частицами подложки во многом объясняется недостатком экспериментальных данных о быстроокаленных материалах при осаждении частиц из плазменного потока в этих условиях.

Сделаем особое замечание: зонды Ленгмюра не в состоянии разрешить пространственное распределение потенциалов магнитного и электрического полей в пределах наноразмеров формирующихся в плазме частиц. Вводя в качестве одного из основных параметров – ток плазмы, следует учитывать плотность тока в пределах наноплощади, где возможны различные направления токов. Плазменный объем – не объем вакуумной камеры и условия протекания процессов, в том числе и плазохимических, во многом зависит от координаты (расположения) в камере. Это было показано нами в ряде работ.

В серии предыдущих работ нами [4-11] проведено исследование структуры и свойств осажденного из низкотемпературной плазмы вещества в межэлектродном пространстве – от катодного пятна до подложки и стенок вакуумной камеры установки дугового распыления типа ННВ-6. Такой комплексный подход в изучении процессов в плазме и образующихся из нее структур сделан, вероятно, впервые [5,7,9]. Параметром, наиболее сильно влияющим на формирующуюся структуру, является, кроме остального, трудно определяемая вблизи катода скорость охлаждения на границе расплав-подложка. Поэтому проведенные в работах [4-11] эксперименты, позволили выявлять механизм кристаллизации и образования мелкодисперсной метастабильной структуры переменного состава. Кроме того, детальное исследование структуры, элементного и фазового состава, конденсирующегося вблизи катодного узла, дали информацию о процессах в прикатодной области при зарождении плазменного потока, в том числе и о природе катодных пятен. Было отмечено нелинейный характер процессов в плазме дуговых и магнетронных разрядов, в частности, гистерезис давлений реакционных газов в процессе нанесения покрытий, 2 диапазона давлений азота, ведущих к 2-м механизмам реакций в плазме. В более ранних исследованиях в плазме дугового разряда были установлены 2 механизма образования возбужденных частиц – отрывной и кинетический. Кроме того, обнаружены два состояния капель (с плазменным облаком и без), ведущие к 2-м

режимам (механизмам) генерации ионов из капель. Особое внимание (в связи с обнаружением фрактальной структуры микрочастиц) вызывает 2 диапазона скоростей (энергий), в том числе в магнитных полях и 2 вида микроструктур (сильно- и слабомагнитная), а также 2 типа нанокластеров. При исследовании электронной структуры пленок нитрида титана обнаружено 2 состояния атомов азота в нитриде с обычной ($E=397,2$ эВ) и неполной ($E=396,3$ эВ) связями, 2 валентности титана - 3 и 4. При изучении свечения плазмы дугового распыления титана в среде азота также установлены 2 вида оптических спектров – линейчатый и сплошной.

Таким образом, настоящая работа базируется на экспериментальных данных, полученных при тщательном, глубоком изучении, во-первых, материала, осажденного вблизи катода (в некоторых работах – депозит). Вероятно, нами впервые было обращено внимание на характер его распределения вдоль плазменного потока в условиях наложения внешних электрического и магнитного (стабилизирующего и фокусирующего) полей. Было установлено, что уже вблизи катода наблюдается заметное влияние магнитного поля на характер движения частиц из катодного пятна [7]. Обнаружено закономерное распределение элементов распыляемого катода вдоль плазменного потока. Особый интерес представляют результаты исследования микроструктуры осажденной вблизи катода пленки, подтверждающий «закручивание» плазменного потока. В целом сделан вывод: структура депозита подтверждает неустойчивость плазмы в магнитном поле - уход плазменного потока сквозь магнитные поля на стенки вакуумной камеры [3,12].

И во-вторых, что самое главное, пристального внимания заслуживают результаты, полученные при исследовании дисперсной системы микрочастиц, осажденных на стенках вакуумной камеры при электродуговом распылении титана в среде азота и ацетилена. Методом малоуглового рентгеновского рассеяния установлено, что основной вклад в рассеяние вносят частицы со значениями радиусов инерции $R_g \approx 8-16$ нм, которые можно отнести к массовым фракталам, то есть частицам (кластерам) с линейным размером $\sim 5-55$ нм и развитой пористой поверхностью. Фрактальная размерность частиц $D=2,62$ [9]. В работе [11] нами был сделан предварительный вывод: фрактальность частиц обусловлена условиями формирования дисперсных частиц, составом потока плазмы, параметрами электрического и магнитного полей в межэлектродном пространстве.

Цель работы. На основании собственных результатов и литературных данных описать состояния (условия) в плазме дугового разряда, при которых могут формироваться фрактальные структуры. В основе наших рассуждений лежат фундаментальные теоретические и экспериментальные результаты, полученные в разделе магнитной гидродинамики (плазмодинамике). В известных нам работах по магнитной гидродинамике главное внимание уделяется полевой компоненте плазмы. Поведение частиц в плазме мало изучено, а их изучение важно во многих аспектах. Поэтому наш подход к процессам в плазме с целью анализа фрактальной структуры частиц - основное внимание уделить корпускулярной компоненте плазмы.

Для обоснования наших гипотез и лучшего понимания нашей гипотезы напомним основные понятия и определения.

Фрактал (fractus — дроблёный, сломанный, разбитый) — геометрическая фигура, обладающая свойством самоподобия, то есть составленная из нескольких частей, каждая из которых подобна всей фигуре целиком [13].

Токовые слои - динамические структуры с интенсивными движениями плазмы, и генерация плазменных потоков является характерным свойством токовых слоев, как существующих в космическом пространстве, так и создаваемых в лабораторных экспериментах [14-15].

Нулевая линия токового слоя или нейтральный токовый слой - плазменное образование, разделяющее противоположно направленные магнитные поля с силовыми линиями, вытянутые вдоль поверхности слоя [3,14].

Безразмерный параметр, отвечающий образованию токовых слоев вдоль нулевой линии, был определен С.И.Сыроватским [14,15].

Диссипативные структуры - структуры, связанные с рассеиванием (диссипацией) энергии. Такие структуры могут существовать лишь в том случае, если объект обменивается с окружающей средой достаточно мощными потоками вещества или энергии. (Не связаны с фазовым переходом и понижением температуры).

Обсуждение. Итак, для анализа условий возникновения фрактальных структур (частиц пылевой плазмы) - наш подход к процессам в плазме: главное внимание уделяется не полевой, а корпускулярной компоненте плазмы.

Условия образования фрактальных агрегатов для различных веществ в основном установлены. Кроме неравновесности параметров состояния плазмы (температура, давление, концентрация) в различных комбинациях, образование и рост фракталов сопровождается высокими скоростями диссипации энергии. Также известно, что образование фракталоподобных агрегатов происходит в условиях неустойчивости фронта роста, когда небольшие возмущения фронта (поверхности раздела) начинают расти гораздо быстрее соседних участков [13]. Где могут существовать такие условия в нашем случае? Следуя [16,17] предположим, что исследуемые нами фрактальные структуры из плазмы дугового разряда являются следствием особых свойств турбулентности плазменного потока с перемежаемостью. При этом исходим из того, что в конфигурации плазменного потока всегда существуют неоднородные магнитные поля и, соответственно, распределение плотности. Поэтому возникло предположение (гипотеза), что своей необычной структуре (фрактальной) часть осажденных частиц из плазмы дугового разряда обязана токовым слоям. Нами проведен анализ работ, в которых рассматриваются условия появления токовых слоев (ТС), их параметры и проявления в широких масштабах – от космической плазмы до лабораторной. При этом в плазменном потоке вакуумной дуги возможны, на наш взгляд, два случая.

1. Макрочастицы, вылетевшие с поверхности катода, пролетая в плазме (но не токовом слое) вакуумной дуги, приобретают электрический заряд, определяемого параметрами плазмы. Его величина определяется из условия равенства ионного и электронного токов на поверхности капли. Для неизотермической плазмы данный заряд отрицателен. Следовательно, ионы плазмы, ускоряясь в поле дебаевского слоя, бомбардируют поверхность капли с энергией, определяемой потенциалом капли, а электроны плазмы тормозятся в поле слоя и на поверхность капли попадает только

высокоэнергетические электроны. В результате ионной и электронной бомбардировки происходит нагрев капли, затем охлаждение за счет ИК - излучения и теплообмена с окружающей средой. Фрактальная структура не возникает.

2. Механизм дугового разряда, как установлено в целом ряде работ, определяется эмиссионным центром катодного пятна, возникающего и перемещающегося по микровыступам катода (см.рис.1) [18]. В микрочастице (капле), движущейся в неоднородном магнитном поле, индуцируется электрический ток, который взаимодействующий с внешним магнитным полем магнитный момент. В ряде работ показано, что топологическая структура магнитного поля в плазме может изменяться из-за ее движения. При этом силовые линии магнитного поля могут не только изменять свою форму (растягиваться, изгибаться), но и рваться и перезамыкаться за счет диссипативных процессов [3,стр.569]. Это, вероятно, и происходит в случае попадания капельной фракции в токовые слои. Поток ионов из перемещающегося катодного пятна в дуговом разряде можно рассматривать как токовый слой (см. рис.1-2). Известно, что магнитное поле, создаваемое токовыми слоями, является источником энергии, диссипация которой означает пересоединение магнитных силовых линий [3,14,17]. Теория токовых слоев предполагает наличие «особых» линий магнитного поля в плазме, когда электрическое и магнитное поле параллельны друг другу. Такая ситуация в случае дугового разряда может возникнуть вблизи катодного пятна [19]. Фрактальная структура пылевых (сажевых) частиц, осаждаемых на стенках вакуумных камер, как в низкотемпературной плазме, так и в плазме УТС обусловлена, на наш взгляд, (действием) именно таких токовых перемещающихся слоев. Причина роста фракталов, как было уже сказано - неустойчивость фронта их роста [13]. Это условие реализуется, вероятно, при диссипации магнитного поля в малой области плазмы, в частности, в области катодного пятна. Расчет параметров плазмы (давления, температуры) будет дан позднее в отдельной работе.

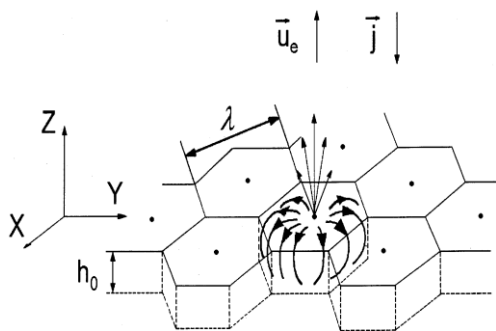


Рис. 1. Формирование и структура токовых ячеек катодного пятна вакуумной дуги [18].

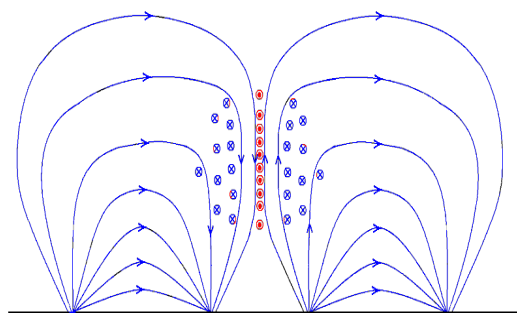


Рис. 2. Токи токового слоя, образующегося между магнитными потоками [19].

Выводы. 1. На основании исследования осажденных структур из капельной и пылевой фракций предложена гипотеза образования токовых слоев вблизи катодного пятна вакуумной дуги (плазменных струй). Диссипация энергии магнитного поля токовых слоев может быть одним из механизмов, объясняющих направление

движения катодного пятна по поверхности катода, вращение плазменного потока и причину смены направления (ретроградное движение) их движения.

2. Разрыв токового слоя ведет к значительному падению плотности плазмы, возникновение неустойчивого фронта роста и образование фрактальных структур пылевых частиц из плазмы дугового разряда.

Литература

1. Anders A. Cathodic Arcs: From Fractal Spots to Energetic Condensation. Berkeley: Springer Science, 2008. 540 p.
2. Любимов Г.А., Раховский В.И. УФН. 125,(1978), 665.
3. Морозов А.И. Введение в плазмодинамику. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 616с.
4. SmolanoV N.A., Pan'kin N.A. On the Structure and Properties of a Material Deposited from Arc Discharge Plasma near the Cathode and onto Vacuum Chamber Walls // Journal of Surface Investigation. X-ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2014, V.8, №.5, p. 1089–1092.
5. Смоланов Н.А., и др.// Прикладная физика, 2014, № 1.с.3.
6. N A SmolanoV and N A Pankin.// Journal of Physics: Conference Series. 479 (2013) 012012.
7. N A Pankin, N A SmolanoV. On the separation of arc discharge plasma near the sputtering cathode.// Journal of Physics: Conference Series 479 (2013) 012006
8. Смоланов Н.А., и др.// Поверхность. Рентген., синхротр. и нейтрон. Исслед., 2015, №4, с. 72-76.
9. Смоланов Н.А., Неверов В.А.//Письма о материалах,5(2), 2015,с.179-184.
10. SmolanoV, N.A. Complex analysis of microparticles deposited from arc-discharge plasma on vacuum-chamber walls// Journal of Surface Investigation 2017 11(2), с. 353-560.
11. SmolanoV, N.A. On the Fractality of Microparticles from the Plasma Flow of a Vacuum Arc Discharge //Journal of Surface Investigation 2018 12(3), с. 593-597.
12. Недоспасов А. В. //УФН 185 613–617 (2015).
13. Клеман М., Лаврентович О.Д. Основы физики частично упорядоченных сред: жидкие кристаллы, коллоиды, фрактальные структуры, полимеры и биологические объекты. М.: Физматлит, 2007, 680 с.
14. Франк А. Г.// УФН 180 982–988 (2010).
15. Леденцов Л. С.. Сомов Б. В. //УФН 185 113–142 (2015).
16. Budaev V.P., Khimchenko L.N. Fractal Growth of Deposited Films in Tokamak: Preprint IAE-6404/7. — М., 2006.
17. Будаев В.П., Савин С.П., Зеленый Л.М. // УФН.Т. 181, №9, 905-952(2011).
18. Арапов С.С., Волков. Н.Б. О формировании и структуре токовых ячеек катодного пятна вакуумной дуги. Письма в ЖТФ, 2003, Т.29, вып.1, с. 3-12.
19. Подгорный И.М., Подгорный А.И. Физика солнечных вспышек. Тезисы докладов XLV Звенигородской конференции по физике плазмы и УТС. г. Звенигород, 2-6 апреля 2018 г. – М.: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2018г. с.187.