

**NANOPARTICLES FABRICATION IN HIGH-ENTHALPY PLASMA FLOW
AND COVERING THEM ON A SURFACE***Timur Ilyasovich Gareev^{1,2}, Georgii Alexeevich Pozdnyakov^{1,2a}*

¹ Khristianovich Institute of Applied and Theoretical Mechanics, Siberian branch of the Russian Academy of Sciences, Institutskaya str. 4/1, 930090, Novosibirsk, Russia

² Novosibirsk State University, Pyrogov str. 1, 930090, Novosibirsk, Russia

^a georg@itam.nsc.ru

ABSTRACT

The paper describes a new plasma method for applying nanostructured coatings from various chemical elements and compounds. A specially designed pulsed source of high-enthalpy plasma flow containing chemical elements from which the coating is formed is used as a tool – a disk magnetohydrodynamic accelerator (MHD accelerator). A mixture of an inert transport gas and gaseous precursors is supplied to the accelerator inlet through a supersonic nozzle. In the channel of the MHD accelerator, a volume discharge is initiated in a transverse magnetic field, and the plasma flow acquires a velocity of several km/s. The flow generated by the accelerator flows into a vacuum volume and, expanding, cools down, which leads to the chemical transformation of precursors and the condensation of target products in the form of nanosized particles. The particles move at a paccelerated flow velocity, collide with the treated surface and form a nanostructured coating on it. An amorphous smooth coating is formed on a substrate installed in the zone closest to the accelerator, where condensation has not yet occurred. The plasma flow pulse time is 48 ms, the coating growth rate is about 3 mkm/s. The main purpose of the work was to demonstrate the possibility of applying nanoparticles to the surface with high adhesion and productivity. A new solution to the problem of synthesizing nanoparticles in a supersonic expanding jet and applying a structured coating was proposed.

KEYWORDS

Magnetohydrodynamic plasma accelerator; nanostructures; deposition of nanoparticles; condensation in a stream.

**ОБРАЗОВАНИЕ НАНОЧАСТИЦ В ПОТОКЕ ВЫСОКОЭНТАЛЬПИЙНОЙ
ПЛАЗМЫ И НАНЕСЕНИЕ ИХ НА ПОВЕРХНОСТЬ***Тимур Ильясович Гареев^{1,2}, Георгий Алексеевич Поздняков^{1,2a}*

¹ Институт теоретической и прикладной механики СО РАН им. Христиановича С. А., Россия, 630090, Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

² Новосибирский государственный университет, Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

^a georg@itam.nsc.ru

АННОТАЦИЯ

В работе описан новый плазменный способ нанесения наноструктурированных покрытий из различных химических элементов и соединений. В качестве инструмента применен специально разработанный импульсный источник высокоэнтальпийного плазменного потока, содержащего химические элементы, из которых образуется покрытие – дисковый магнито-гидродинамический ускоритель (МГД-ускоритель). На вход ускорителя через сверхзвуковое сопло подается смесь инертного транспортного газа и газообразных прекурсоров. В канале МГД-ускорителя инициируется объемный разряд в поперечном магнитном поле и плазменный поток приобретает скорость в несколько км/с. Генерируемый ускорителем поток истекает в вакуумный объем и, расширяясь, остывает, что приводит к химическому преобразованию прекурсоров и конденсации целевых продуктов в виде наноразмерных частиц. Частицы, движущиеся со скоростью ускоренного потока, сталкиваются с обрабатываемой поверхностью и образуют на ней наноструктурированное покрытие. На подложке, установленной в ближней к ускорителю зоне, где конденсация еще не произошла, образуется аморфное гладкое покрытие. Время импульса плазменного потока 48 мс, скорость роста покрытия порядка 3 мкм/с. Основной целью работы была демонстрация возможности нанесения наночастиц на поверхность с высокими адгезией и производительностью. Предложено новое решение проблемы синтеза наночастиц в сверхзвуковой расширяющейся струе и нанесения структурированного покрытия.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Магнитогидродинамический ускоритель плазмы; наноструктуры; напыление наночастиц; конденсация в потоке.

Введение

Нанесение покрытий широко используется для модификации поверхностей материалов, применяемых в машиностроении, приборостроении, химической промышленности и других отраслях. С помощью напыления, в частности, повышают термостойкость, твердость, улучшают защиту от коррозии, увеличивают износостойкость, управляют оптическими свойствами поверхностей. Получаемые покрытия различаются адгезией к поверхности, однородностью и шероховатостью в зависимости от применяемого метода. В зависимости от требуемых свойств наносимого покрытия выбирается метод его нанесения или разрабатывается новый. В настоящей работе предлагается способ нанесения наноструктурированного покрытия обработкой поверхности по-

током высокоэнтальпийной плазмы, содержащей химические элементы, из которых образуется материал покрытия. Под высокоэнтальпийным потоком понимается поток, обладающий удельной энтальпией, сравнимой и превышающей удельную энтальпию образования веществ, из которых состоит обрабатываемая поверхность и наносимое покрытие. В качестве генератора потока использовался модернизированный импульсный дисковый МГД-ускоритель плазменных потоков, описанный в [1]. Изначально ускоритель использовался для получения высокоэнтальпийного потока метановой плазмы и изучения пиролиза метана в этих условиях. При натекании метановой плазмы на преграду было обнаружено образование качественного углеродного покрытия на ней. На рис. 1 показана схема ускорителя.

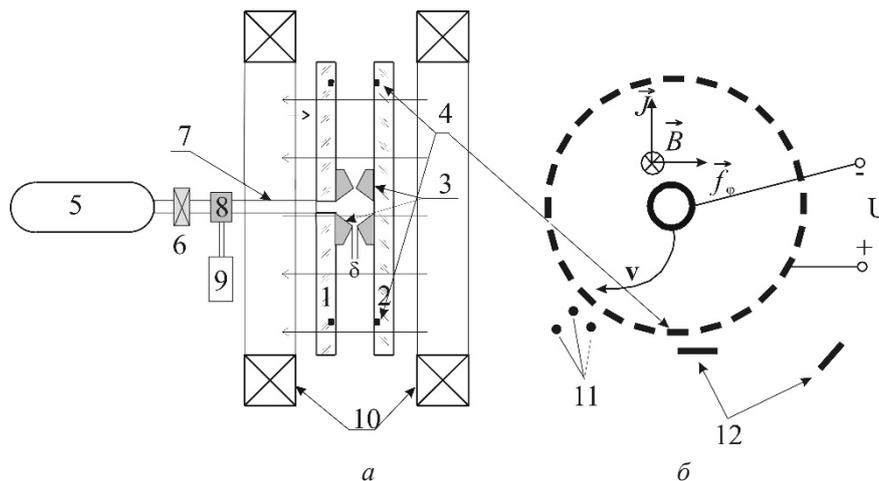


Рис. 1. Схема ускорителя:

a – осевой разрез; *б* – схема канала, вид справа: 1, 2 – стенки канала; 3 – сверхзвуковое сопло-катод; 4 – аноды; 5 и 9 – емкости для прекурсоров – газообразного и жидкого; 6 – клапаны; 7 – трубка; 8 – смеситель; 10 – катушки электромагнита; 11 – зонды Ленгмюра; 12 – обрабатываемые подложки.
Пунктир – аноды, сплошная линия – сопло-катод

Fig. 1. Accelerator scheme:

a – axial section; *б* – channel scheme, right side view: 1, 2 – channel walls; 3 – supersonic nozzle-cathode; 4 – anodes; 5 and 9 – containers for gaseous and liquid precursors; 6 – valves; 7 – tube; 8 – mixer; 10 – electromagnet coils; 11 – Langmuir probes; 12 – processed substrates. Dotted line – anodes, solid line – nozzle-cathode

Канал ускорителя образован двумя диэлектрическими дисками 1 и 2 диаметром 200 мм, расположенными на расстоянии 20 мм друг от друга. В центре канала находится сверхзвуковое сопло 3. Критическое сечение сопла с величиной зазора δ . Далее слева на схеме идет система внесения жидкого прекурсора, подробное описание которой приведено ниже. Плазмообразующие газы и жидкости подаются из емкостей 5 и 9 соответственно, снабженных клапанами 6. Цифрой 8 обозначен смеситель, являющийся частью системы внесения жидкого прекурсора, о которой речь пойдет ниже. После открывания затворов и установления течения на электроды подается импульсное напряжение U . На разрядный ток, нормальный к магнитному полю, действует сила Ампера, ускоряющая поток, как показано справа. Ускорение происходит в случае осуществления режима объемного разряда. Скорость потока полностью диссоциировавшего ионизованного в электрическом разряде газа на выходе из ускорителя измеряется с помощью зондов

Ленгмюра 11. Снаружи ускорителя могут располагаться подложки 12 на различных расстояниях от ускорителя. Ускоритель установлен внутри откачиваемого до давления менее 10 Па ресивера с объемом 5 м³, поэтому можно считать, что ускоренный поток истекает в вакуум. Дисковый МГД-ускоритель без радиального потока и существенно меньшей мощности изучался в [2] в качестве источника низкотемпературной плазмы.

Покрытие толщиной до 300 нм за один пуск ускорителя при использовании только газообразного прекурсора (метана) образовывалось при конденсации димеров углерода, образовавшихся в разрядном промежутке ускорителя, на холодной поверхности (кремний, стекло, сапфир, металлы). Основные результаты содержатся в публикациях [3–10]. Кратко перечислим некоторые из них. Характерное значение скорости метановой плазмы на выходе из ускорителя порядка 5 км/с, расход метана 3 моль/с, продолжительность работы ускорителя 48 мс. Статическая температура на выходе из уско-

рителя около 3500 К, статическое давление около 700 Па, плотность электронов около 10^{16} см⁻³, температура торможения 9000 К. Очевидно, плазма на выходе из ускорителя сильно неравновесная, поскольку при измеренной статической температуре равновесное значение плотности электронов должно быть исчезающе малым. Было также обнаружено, что поток плазмы благородных газов, генерируемый ускорителем, способен протравить кремниевую пластинку на глубину в несколько микрометров за один импульс [3]. В дальнейшем была проверена возможность нанесения покрытия из какого-либо химического соединения. В качестве прекурсоров была выбрана стехиометрическая смесь моносилана и метана. Поскольку моносилан имелся в виде 10% смеси с аргоном, то плазмообразующий ускоряемый газ состоял примерно на 80% из аргона. Почти все образцы покрылись гладкой пленкой, но некоторые образцы оказались покрыты наноразмерными кристаллитами карбида кремния.

Объяснить наблюдавшийся эффект можно следующим образом. Поверхность преграды, располагавшейся вблизи от ускорителя, обтекалась плазмой, содержавшей кремний и углерод в газообразной и диссоциированной фазе, поскольку статическая температура потока достаточно высока. При контакте с холодной поверхностью происходила быстрая конденсация с образованием аморфного карбида кремния, образывавшего гладкую поверхность покрытия. На удалении от ускорителя газ расширялся, остывая и создавая условия для образования карбида кремния и его конденсации. Эффективными центрами конденсации служат ионы, выделяющаяся теплота парообразования уносится аргоном. Поэтому преграда, установленная на достаточном удалении, покрывается нанокристаллами карбида кремния.

Известны работы, в которых изучалось образование наноразмерных частиц и покрытий при конденсации, в том числе, в расширяющейся сверхзвуковой струе испаренных

различными способами навесок алюминия. Центрами конденсации служили спонтанно образывавшиеся димеры. Теплота парообразования уносилась холодной сверхзвуковой струей водорода [11–17]. Описанные методики характеризуются относительно низкой производительностью – порядка 10 нм/мин и не могут обеспечить высокой адгезии наносимого покрытия с подложкой ввиду низкой скорости падающих на поверхность частиц. Для улучшения адгезии частиц может использоваться их ускорение в детонационной волне [18].

Описываемый нами способ использования высокоэнтальпийного плазменного потока лишен этих недостатков. Оценим скорость роста частиц, для определенности, кремния, в поле ионов. Нейтральные атомы, попадая в электрическое поле ионов, поляризуются, приобретая дипольный момент $p = \alpha E = e\alpha/r^2$, и притягиваются к иону с силой $F = -2e^2\alpha/r^5$. Здесь α – поляризуемость атома; r – текущее расстояние между атомом и ионом; e – заряд иона. Поляризуемость одиночных атомов α может быть оценена величиной их атомного объема [19]. Расстояние r меняется в пределах максимально от $r \approx n^{-1/3}/2$ до 0, для оценки примем заниженное значение для плотности ионов $n \approx 10^{15}$ см⁻³, поскольку плотность ионов в потоке падает с удалением от ускорителя. Время, которое требуется нейтральному атому для притяжения к иону, составляет величину

$$t \approx \sqrt{\frac{r^6 m}{2\alpha e^2}} \approx 1,2 \cdot 10^{-6} \text{ с, если не учитывать}$$

потерь импульса при столкновениях атомов. Здесь m – масса атома. Таким образом, время конденсации всего кремния, находящегося в потоке, в поле иона составляет несколько десятков микросекунд. Размер образывавшейся частицы составит порядок 10 нм, если концентрация моносилана в начальной смеси с аргоном была 10% при 10% ионизации аргона. При уменьшении коэффициента ионизации размер образующихся частиц

увеличивается. Приведенные грубые оценки позволяют определить, что область конденсации будет иметь протяженность порядка 100 мм при характерной скорости потока, получаемого в МГД-ускорителе, составляющей порядок нескольких км/с. Приведенная оценка не учитывает теплопередачу от конденсирующихся частиц атомам аргона, уносящим теплоту парообразования. Предполагается, что поскольку плотность аргона много больше плотности газообразного кремния, то столкновения атомов аргона с образующейся частицей происходят достаточно часто, чтобы эффективно охлаждать ее.

Поскольку частицы конденсируются в потоке, имеющем скорость порядка нескольких км/с, то и частицы также движутся с этой скоростью. Поэтому при высокоскоростном столкновении частиц с твердой поверхностью могут происходить их внедрение в мишень, частичное или полное их плавление и химические реакции между веществами подложки и частиц. Эти процессы способствуют высокой адгезии наносимого слоя с подложкой.

Оценим величину скорости частицы, при столкновении проникающей в материал подложки.

В случае, когда адгезия обеспечивается внедрением твердой частицы в менее твердый материал подложки (например, частицы карбида вольфрама в стальную поверхность), оценка может быть сделана следующим образом: $G \approx p/\tau S$, где p – импульс частицы; S – площадь ее сечения; τ – время торможения частицы при соударении; G – модуль сдвига стали. Считая частицу сферической и принимая ее плотность $\rho = 15,7 \cdot 10^3$ кг/м³ и оценив $\tau = 2d/c_{wc}$, где c_{wc} – скорость продольного звука в монокарбиде вольфрама, получим оценку скорости, при которой происходит внедрение частицы в стальную подложку: $v \approx 2300$ м/с. Частицы с меньшей плотностью должны быть ускорены до ско-

рости пропорционально большей. Соответственно, скорость течения газа, содержащего прекурсоры, должна быть такой же и иметь статическую температуру, превышающую температуру испарения целевого продукта, например для монокарбида вольфрама это 6000 К. Чтобы обеспечить такую величину статической температуры в потоке аргона, ускоренного в сопле Лавала, требуется нагревать ускоряемый газ (аргон) в форкамере до 11000 К. Кроме технической сложности нагрева газа в форкамере до указанной величины, возникает проблема загрязненности потока испарившимся материалом стенок форкамеры. По этой причине необходимо использование МГД-ускорителя.

1. Экспериментальная установка

Целью работы была демонстрация возможности нанесения наноструктурированного покрытия с использованием прекурсора, находящегося не в газообразном, а в жидком состоянии при нормальных условиях. Поскольку на вход МГД-ускорителя должен подаваться газообразный прекурсор, то необходимо было разработать систему испарения жидкого прекурсора, его смешения с транспортным газом и инъекции смеси в форкамеру ускорителя. Для обеспечения возможности инъекции в поток паров изначально жидкого прекурсора была проведена модернизация [20] установки, описанной в [1]. В качестве прекурсора был выбран четыреххлористый титан, имеющий достаточно низкую температуру кипения $T_{кип} = 136,3$ °С [21]. Вообще многие галогениды имеют низкую температуру кипения и могут быть использованы для нанесения покрытий как источники индивидуальных веществ, так и соединений. Поскольку галогениды химически активны, то это выдвигает требование к химической инертности материалов, из которых сконструирована система их инъекции. На рис. 2 показана схема использовавшегося смесителя-инжектора.

Цифрой 1 обозначен сосуд со сжатым газом, проталкивающим поршень 2 по цилиндрическому каналу после срабатывания кнопки 3 и открытия клапана 4. Под давлением поршня пластиковая оболочка с жидким прекурсором 5 устремляется к стенке и повреждается, высвобождая жидкость в секцию 6. По достижении поршнем крайнего положения замыкается геркон, установленный на цилиндре, и открывается клапан 7, после чего смесь транспортного (плазмообразующего) газа и газообразного прекурсора из емкости 8 поступает в секцию 6,

увлекая за собой жидкий реагент в смеситель 9 с теплообменником 10. Смеситель нагревается до заданной температуры омическим нагревателем 11. В качестве теплообменника использована никелевая фольга, инертная к галогенидам. Для поддержания температуры используется терморегулятор 2ТРМ1 с термопарой 12, помещенной в смеситель. Далее, полученная смесь поступает в форкамеру 13. Повышение давления приводит к замыканию контактов 14, что запускает электронную систему управления разрядом через ускоритель.

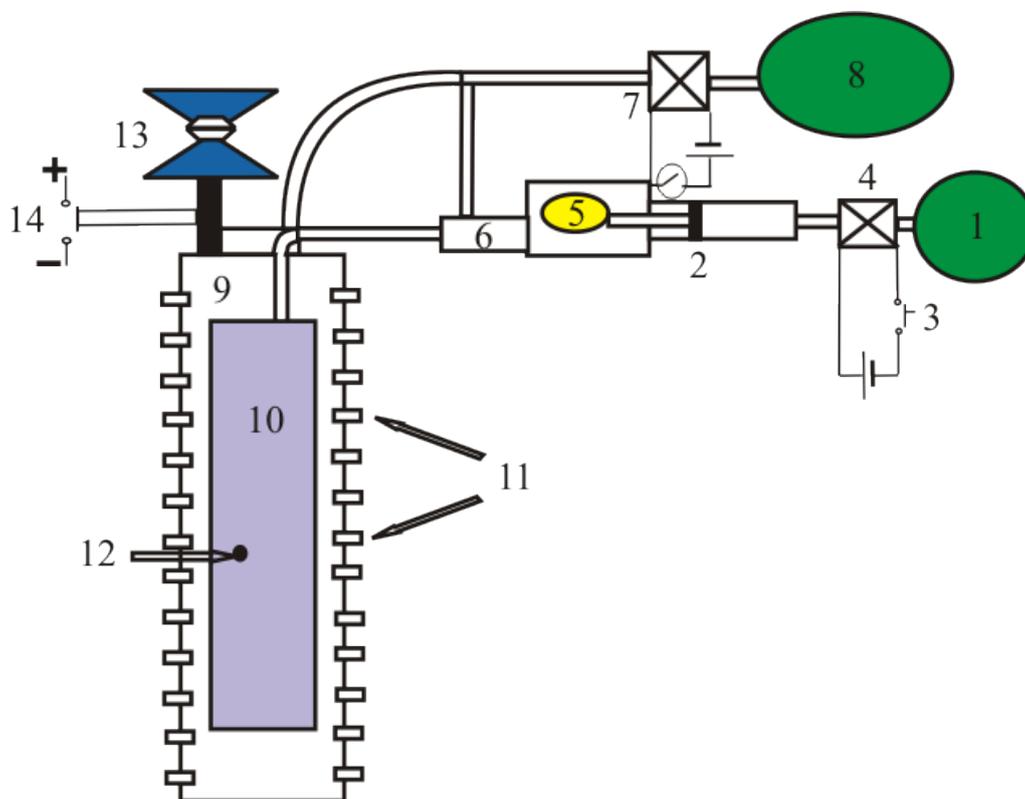


Рис. 2. Схема инжектора:

1, 8 – емкости для плазмообразующих газов; 2 – поршень; 3 – кнопка; 4 и 7 – клапаны; 5 – капсула с жидким прекурсором; 6 – секция для жидкого прекурсора; 9 – смеситель; 10 – теплообменник; 11 – омический нагреватель; 12 – термопара; 13 – форкамера; 14 – контакты

Fig. 2. Scheme of the injector:

1, 8 – tanks for plasma-forming gases; 2 – piston; 3 – button; 4 and 7 – valves; 5 – capsule with liquid precursor; 6 – section for liquid precursor; 9 – mixer; 10 – heat exchanger; 11 – ohmic heater; 12 – thermocouple; 13 – prechamber; 14 – contacts

2. Нанесение покрытий

На рис. 3 представлена схема получения покрытий. Стрелками изображено направление плазменного потока рядом с краем выхода ускорителя 1, находящимся на расстоянии 100 мм от центра ускорителя 2, т.е. места расположения сверхзвукового сопла. При достижении плазмой подложки 3, на последней образуется покрытие из химических элементов и их соединений, содержащихся в потоке. Омический нагреватель 4, и термопара 5 позволяют нагреть образцы до 1000 °С, что может повысить адгезию покрытия с поверхностью. Цифрой 6 отмечена подложка без возможности подогрева. Ключевым в исследовании является возможность устанавливать различное расстояние до подложки d от 100 до 1500 мм.

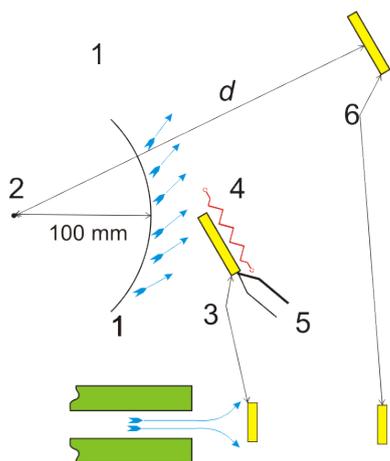


Рис. 3. Схема нанесения покрытия:

1 – край канала ускорителя; 2 – центр ускорителя;
3 – нагреваемый образец (до 6 штук); 4 – омический нагреватель; 5 – термопара; 6 – холодный образец;
 d – расстояние до центра ускорителя (100–1500 мм)

Fig. 3. Coating scheme:

1 – accelerator channel edge; 2 – accelerator center;
3 – heated sample (up to 6 pieces); 4 – ohmic heater;
5 – thermocouple; 6 – cold sample; d – distance to the
accelerator center (100–1500 mm)

В ходе экспериментов с целью определять свойства полученных покрытий исполь-

зовались кремниевые планары с шероховатостью менее 50 нм.

Добавление системы инъекции, например летучих соединений, к существующей установке позволяет получать разнообразные покрытия. Например, частицы нитрида титана могут получиться в ходе реакции $2\text{TiCl}_4 + 2\text{NH}_3 \rightarrow 2\text{TiN} + 6\text{HCl} + \text{Cl}_2$.

В работе использован четыреххлористый титан в качестве прекурсора, имеющий относительно низкую температуру кипения [20], а также смесь водорода и азота в качестве транспортного плазмообразующего газа. Водород используется для связывания хлора. Предполагалось, что титан прореагирует с азотом и образуется покрытие из нитрида титана.

Были получены снимки поверхности нескольких напылений с помощью электронного микроскопа (рис. 4). Так, на изображении рис. 4, *а* наблюдается относительно гладкая поверхность полученная, по-видимому, из газовой фазы потока при расположении образца на расстоянии 140 мм от центра ускорителя. При увеличении же времени пролета газа наблюдается осаждение уже частиц из двухфазного потока, как на изображении рис. 4, *б*, что подтверждает возможность получения и нанесения наночастиц, размер которых около 50 нм, в едином процессе, в данном случае на расстоянии 340 мм. На рис. 4, *в* показана трещина в покрытии, по которой можно оценить скорость роста пленок в этом процессе. При толщине в 186 нм и длительности процесса 0,48 мс, скорость роста составляет 3,6 мкм/с.

Также с помощью сканирующего электронного микроскопа проведен анализ элементного состава полученных покрытий, приведенный в табл. 1. Наблюдается наличие титана, однако азот не обнаружен, что говорит об отсутствии реакции образования нитрида титана.

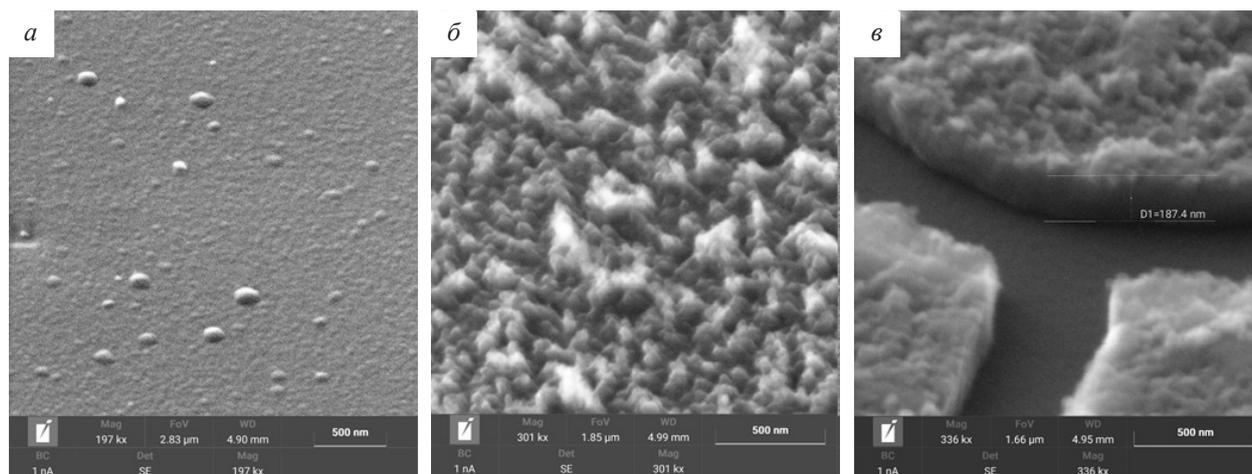


Рис. 4. Изображение покрытий, полученных на расстояниях d (рис. 3):
 a – 140 мм; b – 340 мм; v – 440 мм от центра ускорителя

Fig. 4. Image of coatings obtained at distances d (fig. 3):
 a – 140 mm; b – 340 mm; v – 440 mm from the center of the accelerator

Таблица 1. Элементный состав

Table 1. Elemental composition

Элемент / Element	Символ / Symbol	Массовая доля / Mass %	Атомная доля / Atom %
Углерод / Carbon	C	6,08	12,4
Азот / Nitrogen	N	0,0	0,0
Кислород / Oxygen	O	11,96	18,31
Кремний / Silicon	Si	75,12	65,53
Хлор / Chlorine	Cl	1,44	0,99
Титан / Titanium	Ti	5,41	2,77

Большая доля кремния объясняется тем, что анализ производится для приповерхностного слоя подложки на глубину порядка 2 мкм. Из этого слоя только 0,18 мкм приходится на покрытие. Большое количество углерода и кислорода регистрируется из-за химических реакций между кислородом и углекислым газом воздуха с материалом образца после извлечения его из вакуумного объема.

Приведенные в работе результаты использованы для составления заявки на патент [22].

Выводы

Экспериментально показано, что импульсный дисковый МГД-ускоритель может использоваться для генерации высокоэнтальпийного плазменного потока, содержащего химические элементы, входящие в соедине-

ния, имеющие низкую температуру кипения. При расширении плазменного потока в нем образуются наночастицы, которые могут быть нанесены на поверхность в виде нанокристаллов. Таким образом, импульсный дисковый МГД-ускоритель может использоваться для производства наночастиц и нанесения их на поверхность.

Благодарности / Acknowledgments

Работа выполнена в рамках выполнения государственного задания ИТПМ СО РАН.

The research was carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Pozdnyakov G. A. Gas-Phase Magnetohydrodynamic Disk Accelerator // *Technical Physics Letters*. 2007. V. 33, Iss. 6. P. 474–476. DOI: 10.1134/S1063785007060090.
2. Makrinich G., Fruchtman A. Experimental study of a radial plasma source // *Phys. Plasmas*. 2009. V. 16, Iss. 4. Article number 043507. DOI: 10.1063/1.3119688.
3. Golubov A. I., Katsnelson S. S., Pozdnyakov G. A. Interaction of a high-enthalpy jet with surfaces and chemically active media Plasma science // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2010. V. 38, Iss. 8. P. 1840–1849. DOI: 10.1109/TPS.2010.2047275.
4. Svitashva S. N., Pozdnyakov G. A. Monitoring Technological Conditions for Preparing DLC Films in Supersonic Flow of Hydrocarbon Plasma // *Key Engineering Materials*. 2013. V. 538. P. 281–284. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.538.281.
5. Fedoseeva Yu. V., Pozdnyakov G. A., Okotrub A. V., Kanygin M. A., Nastaushev Yu. V., Vilkov O. Y., Bulusheva L. G. Effect of substrate temperature on the structure of amorphous oxygenated hydrocarbon films grown with a pulsed supersonic methane plasma flow // *Applied Surface Science*. 2016. V. 385. P. 464–471. DOI: 10.1016/j.apsusc.2016.05.120.
6. Dultsev F. N., Kolosovsky E. A., Nastaushev Y. V., Pozdnyakov G. A. Investigation of the properties of amorphous carbon films obtained in a supersonic gas jet // *Surface and Coatings Technology*. 2014. V. 246. P. 46–51. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2014.02.066.
7. Nastaushev Yu. V., Gavrilova T. A., Fedosenko E. V., Dultsev F. N., Pozdnyakov G. A. Diamond-Like Carbon Films Formed by Means of Pulsed Supersonic Plasma Flow Deposition // *Solid State Phenomena*. 2014. V. 213. P. 137–142. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.213.137.
8. Nastaushev Yu. V., Gavrilova T. A., Fedosenko E. V., Dultsev F. N., Pozdnyakov G. A. DLC films formed by means of pulsed supersonic plasma flow deposition (SPFD) // *ASCO-NANOMAT, Second Asian School-Conference on Physics and Technology of Nanostructured Materials, (Vladivostok, August 20–27), 2013*. P. 199–200. DOI: 10.4028/www.scientific.net/ssp.213.137.
9. Svitashva S. N., Pozdnyakov G. A. Monitoring Technological Conditions for Preparing DLC Films in Supersonic Flow of Hydrocarbon Plasma // *2nd International Conference on Optical Electronic and Electrical Materials (OEEM 2012), (Shanghai, China), 2012*. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.538.281.
10. Svitashva S. N., Sheglov D. V., Nastaushev Yu. V., Pozdnyakov G. A. Optical properties and morphology of diamondlike films, fabricated in supersonic flow of hydrocarbon plasma // *Autometry*. 2011. V. 47, Iss. 5. P. 59–66. DOI: 10.3103/S875669901105027X.
11. Ген М. Я., Зискин М. С., Петров Ю. И. Исследование дисперсности аэрозолей алюминия в зависимости от условий их образования // *Докл. АН СССР*. 1959. № 127 (2). С. 366–368.
12. Gen M. Ya., Petrov Yu. I. Disperse Condensates of Metal Vapour // *Russ. Chem Rev.* 1969. V. 38. P. 1007–1024. DOI: 10.1070/RC1969v038n12ABEH001889.
13. Yacamán M. J., Ocaña Z. T. High-resolution dark-field electron microscopy of small metal particles // *Physica status solidi (a)*. 1977. V. 42, Iss. 2. P. 571–577. DOI: 10.1002/pssa.2210420220.
14. Hagen O. F., Obert W. Cluster formation in expanding supersonic jets: Effect of pressure, temperature, nozzle size, and test gas // *The Journal of Chemical Physics*. 1972. V. 56, Iss. 5. P. 1793–1802. DOI: 10.1063/1.1677455.
15. Golomb D. et al. Dimers, clusters, and condensation in free jets. II // *The Journal of Chemical Physics*. V. 57, Iss. 9. P. 3844–3852(1972). DOI: 10.1063/1.1678854.
16. Петров Ю. И. Кластеры и малые частицы. М: Наука, 1986. С. 386.
17. Bowles R. S., Kolstad J. J., Calo J. M., Andres R. P. Generation of molecular clusters of controlled size // *Surface Science*. 1981. V. 106, Iss. 1–3. P. 117–124. DOI: 10.1016/0039-6028(81)90188-6.
18. Ульяницкий В. Ю., Ненашев М. В., Калашников В. В., Ибатуллин И. Д., Ганигин С. Ю., Якунин К. П., Рогожин П. В., Штерцер А. А. Опыт исследования и применения технологии нанесения детонационных покрытий // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2010. № 12 (1–2). С. 569–575.

19. Прохоров А. М. (ред.). Физическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1994. Т. 4. С. 704.

20. Gareev T. I., Pozdnyakov G. A. Formation of Submicron Coatings on a Substrate Flown by a High-Enthalpy Supersonic Plasma Flow / A. N. Shipliyuk (ed.) // International Conference on the Methods of Aerophysical Research (Novosibirsk, Russia,

August 8–14). Novosibirsk: Siberian branch of RAS, 2022. P. 193. DOI: 10.53954/9785604788974_53.

21. Зефирова Н. С. (гл. ред.) Химическая энциклопедия. М.: Большая Российская энциклопедия, 1995. Т. 4. С. 639.

22. Заявка на патент РФ № 2023108933. Дата 10.04.2023.