

DOI 10.5862/JEST.238.8

УДК 621:621.791.722:621.762.04

А.И. Рудской, Ю.А. Соколов, Н.В. Павлушин

УСТАНОВКА ДЛЯ ГИБРИДНОЙ ТЕХНОЛОГИИ СИНТЕЗА КОМПОЗИЦИОННЫХ ПОРОШКОВЫХ ИЗДЕЛИЙ

A.I. Rudskoy, Yu.A. Sokolov, N.V. Pavlushin

INSTALLATION FOR IMPLEMENTING A HYBRID TECHNOLOGY FOR SYNTHESIZING COMPOSITE POWDER PRODUCTS

Предложена конструкция и описан принцип действия новой установки для получения композиционных изделий с программируемой структурой из порошка различного химического состава по гибридной технологии. Технология включает различные методы послойного формирования изделия: электронно-лучевой/ионный синтез, вакуумную пайку, электронно-лучевое напыление, ионно-имплантационную модификацию поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов. Рассмотрены оригинальные конструкторские решения механизмов установки (подача порошка, вибрации, нож, система электронно-лучевого напыления).

ПОСЛОЙНЫЙ СИНТЕЗ; ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ; НАПЫЛЕНИЕ; КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ; ИОННЫЙ ЛУЧ; ОПТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА.

The technical realization of an installation for producing composite materials with programmed structure from powders of various chemical composition by various methods of layerwise formation of a product is considered: electron beam/ionic synthesis, the vacuum soldering, an electron-beam evaporation, ionic-implanted modification of powder's surface with use of source of high-energy ions. The construction of a specialized plant for implementing the hybrid technology is considered. Original design solutions are proposed for the powder supply, vibrations, cutter, system of electron beam evaporation, which can be used in similar equipment for layerwise synthesis of products.

LAYERWISE SYNTHESIS; ELECTRON BEAM; EVAPORATION; COMPOSITE MATERIALS; IONIC BEAM; OPTIC BLOCK.

Введение

Гибридная технология предназначена для получения композиционных изделий и сочетает различные методы послойного формирования изделия: электронно-лучевой/ионный синтез, вакуумную пайку, электронно-лучевое напыление, ионно-имплантационную модификацию поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов [1–7]. Наиболее эффективно сочетание различных методов при создании изделий из порошков, значительно различающихся температурой плавления и теплофизическими свойствами, что формирует особые свойства готовых деталей

[8, 9]. Это позволяет получать в материале различные комбинации металлических и керамических слоев.

Гибридные технологии развивают с целью создания новых классов композиционных изделий и формирования структур, не реализуемых в рамках равновесных и квазиравновесных технологических процессов. Наиболее перспективны гибридные технологии, использующие синтез изделий ионным пучком (СИП) [10–18].

Цель нашей работы — обоснование возможности создания эффективной гибридной технологии с использованием дуоплазматрона.

Принцип действия установки СИЭЛ-5

На рис. 1 приведена схема однокамерной установки СИЭЛ-5 для реализации гибридной технологии послойного синтеза изделий, включающей следующие технологические операции:

выращивание матрицы изделия методом электронно-лучевого плавления, обеспечивающим высокую производительность;

получение демпфирующих упрочняющих слоев толщиной от единиц нанометров, осуществляемое методом электронно-лучевого напыления;

модификация поверхности порошка, выполняемая методом ионно-имплантационной обработки слоя с использованием источника высокоэнергетических ионов.

К особенностям конструкторского решения установки СИЭЛ-5 следует отнести наличие двух электронно-лучевых пушек и одного дуоплазматрона. К основным элементам установки относятся следующие узлы и механизмы (рис. 1): камера рабочая, первая электронная пушка для выпаривания слитка, вторая электронная пушка для плавления порошка, дуоплазматрон, подача порошка, вибрации, нож для выравнивания порошка, изделие, тигельный узел.

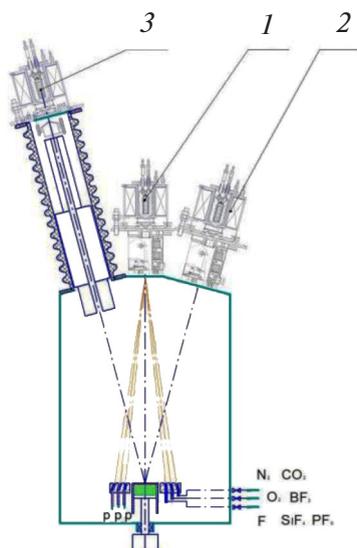


Рис. 1. Схема специализированной технологической установки синтеза композиционных изделий с алмазоподобными волокнами: 1 – первая электронная пушка для выпаривания слитка; 2 – вторая электронная пушка для плавления порошка; 3 – дуоплазматрон

Конструктивные особенности установки СИЭЛ-5

Электронно-лучевая пушка. Первая электронно-лучевая пушка (ЭЛП) предназначена для послойного синтеза изделия методом плавления. При синтезе матрицы электронный луч перемещается по подложке или формируемому изделию со скоростью сканирования $V_{ск}$. Это эквивалентно действию (приложению) периодической тепловой нагрузки с длительностью импульса $d_0/V_{ск}$ (d_0 – диаметр пучка в месте его встречи с поверхностью объекта). Параметры оперативного управления во время технологического процесса: ток пучка $I_{п}$, скорость сканирования луча $V_{ск}$, кроссовер (диаметр) пучка d_0 , шаг смещения луча при сканировании поверхности $s_{см}$, размеры сканируемой площади x_i и y_i (угол отклонения электронного луча). Нагрев каждой элементарной ячейки происходит за время, равное времени перемещения электронного пучка над этой ячейкой.

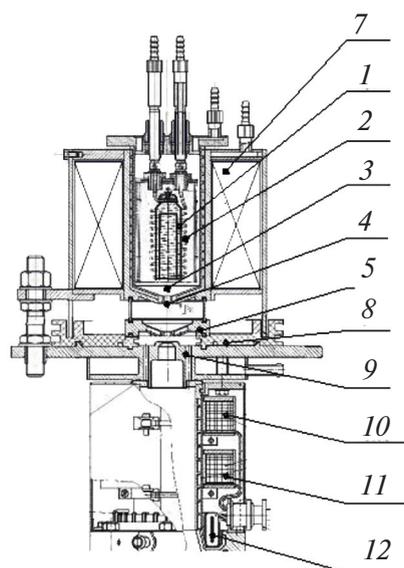


Рис. 2. Схема электронно-лучевой пушки: 1 – полный катод; 2 – косвенный нагреватель; 3 – область катодного узла; 4 – выходное отверстие катодного узла; 5 – промежуточный электрод; 7 – электромагнит; 8 – изолятор высокого напряжения; 9 – анод пушки; 10 – первая фокусирующая линза; 11 – вторая фокусирующая линза; 12 – система отклонения

Конструкция ЭЛП представлена на рис. 2. Полюс катод 1 с косвенным нагревателем 2 обеспечивает в области 3 катодного узла поток электронов, которые через отверстие 4 выходят из катодного узла. Промежуточный электрод 5 отличается от его аналога в дуоплазматроне только отсутствием отверстия для напуска газа и предназначен для фокусировки и регулировки тока электронного луча. Электроны удерживаются на оси при помощи как электростатических линз, образующихся поверхностями электродов, так и магнитным полем от электромагнита 7. Анод 9 пушки изолирован от высокого напряжения изолятором 8. Расходящийся электронный пучок проходит через отверстие в аноде и фокусируется в параллельный пучок первой фокусирующей линзой 10. Вторая линза 11 формирует кроссовер на объекте необходимого диаметра. Система отклонения 12 позволяет направлять пучок в необходимую точку и производить его сканирование с необходимой скоростью.

Узел подачи порошка. Узел подачи порошка на подложку, показанный на рис. 3, состоит из

шести аналогичных механизмов, каждый из которых содержит порошок заданного различного химического состава. Если номенклатура порошков, необходимая для синтеза изделий, меньше, то можно распределить порошок по механизмам пропорционально их объемному составу.

Механизм подачи гранул вводится в камеру через вакуумное уплотнение 17. Подача гранул производится при вращении шнека 4, который представляет собой винт с прямоугольной резьбой. Шнек выводится из вакуумного объема через уплотнение 14 и приводится во вращение электроприводом 13. Шнек вращается в медном корпусе с водяным охлаждением, конструктивно представляющим собой трубку Фильда. Средняя трубка 2 расположена между наружной 1 и внутренней 3 трубками и имеет проточку, образующую винтовой канал охлаждения. Поток воды, поступающий через входной патрубок 16, закручивается и отбрасывается к внутренней стенке наружной трубки. В результате исключается возможность образования паровых подушек.

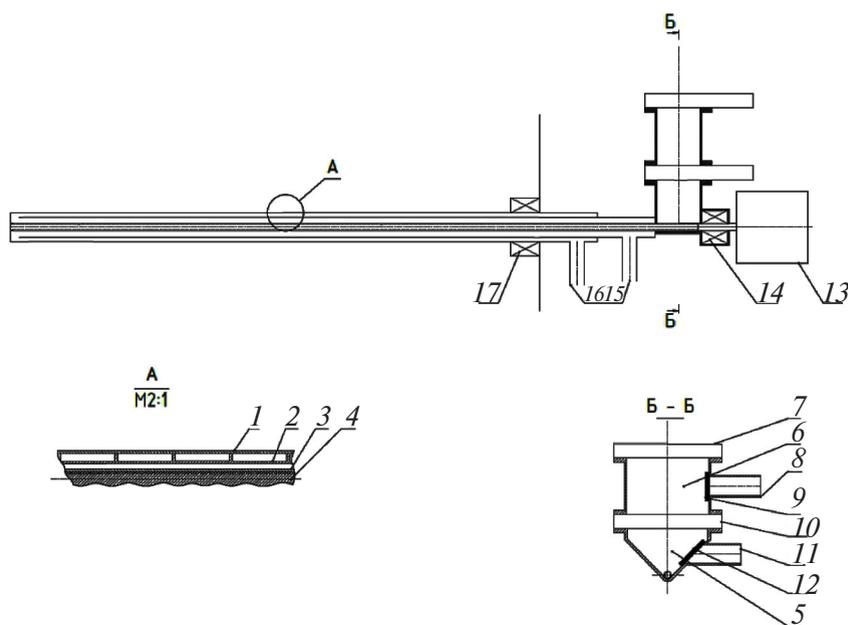


Рис. 3. Механизм подачи порошка: 1, 2, 3 – соответственно наружная, средняя и внутренняя трубки водяного охлаждения; 4 – шнек; 5, 6 – соответственно рабочий и шлюзовой бункеры загрузочного устройства; 7, 10 – соответственно входной и шлюзовой вакуумные затворы; 8, 11 – патрубки откачки; 9, 12 – входные фильтры из пористого железа; 13 – электропривод; 14 – уплотнение; 15, 16 – соответственно выходной и входной патрубки; 17 – вакуумное уплотнение

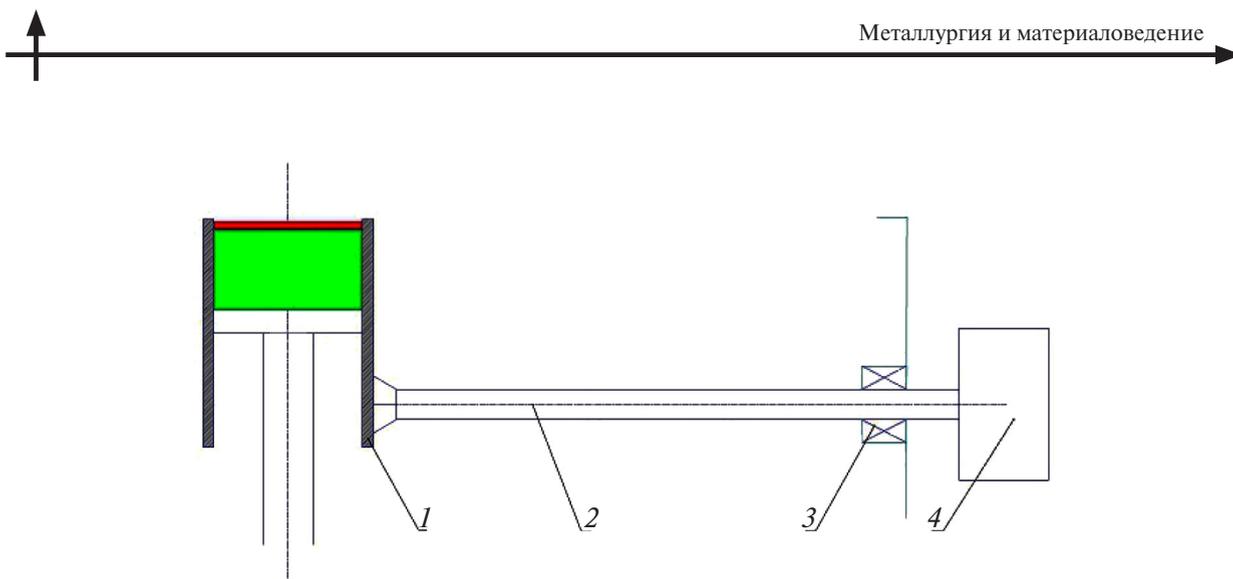


Рис. 4. Механизм вибраций: 1 – корпус; 2 – волновод; 3 – вакуумное уплотнение; 4 – генерирующий динамик

Поэтому конструкция выдерживает прямое попадание электронных и ионных пучков. Обратная вода возвращается по каналу, образованному трубками 2 и 3, и выводится через патрубок 15. Загрузочное устройство состоит из двух бункеров – рабочего 5 и шлюзового 6, разделенных вакуумными затворами – шлюзовым 10 и входным 7. Откачка бункеров производится через патрубки 11 и 8. На входе в патрубки установлены фильтры из пористого железа 9 и 12, которые исключают попадание гранул в систему откачки. Количество механизмов на установке – 6.

Механизм вибраций. Механизм вибраций, представленный на рис. 4, предназначен для равномерного распределения слоя порошка по поверхности синтезируемого изделия. Дополнительно механизм вибраций обеспечивает вращение гранул порошка относительно своей оси в хаотическом порядке, что позволяет осуществить равномерную обработку ионами всей их поверхности.

Вибрации с частотой 20–30 кГц генерируются динамиком 4 (магнестрикционным или пьезокерамическим) и передаются по волноводу 2 на корпус 1. Волновод проходит через вакуумное уплотнение 3. Количество механизмов в установке – 2.

Нож. Установка оснащена двумя ножами, которые предназначены для выравнивания и фиксации порошка в занятом ими положении (рис. 5). Нож 1 защищен от попадания на него электронного луча механизмом подачи 3 порошка и в нейтральном положении находится между ним и тиглем 2 для выпаривания слитка.

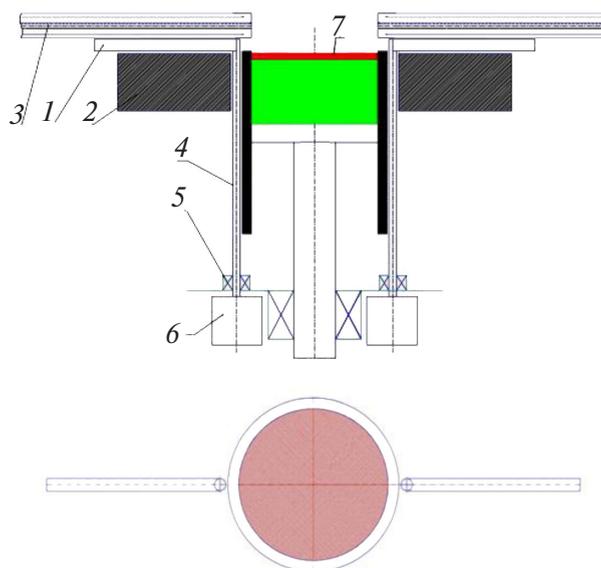


Рис. 5. Нож: 1 – нож; 2 – тигель; 3 – механизм подачи порошка; 4 – шток; 5 – уплотнение; 6 – электрический привод; 7 – порошок

Выравнивание порошка 7 происходит при вращении ножа вокруг оси штока 4, который приводится во вращение электрическим приводом 6. Шток вводится в камеру через уплотнение 5.

Система электронно-лучевого напыления. Система предназначена для формирования металлических и керамических слоев в процессе синтеза изделия. В состав системы напыления входят: вторая ЭЛП; тигельный узел со щелями под определенным углом. Испаряемый электронный пучок слиток подается вертикально.

Алгоритм процесса напыления следующий: подается ток смещения, в результате чего луч располагается в центре очередной concentрической щели;

производится сканирование луча вдоль concentрического отрезка размерами в щель;

луч переключается на следующую щель.

Время переключения с одной щели на другую, как правило, не превышает 10 микросекунд, а время сканирования щели – 10 миллисекунд. Учитывая большую инерционность теплового процесса испарения и низкую скорость диффузионного распространения паров для каждой отдельно взятой щели, отсутствие луча в течение десятков миллисекунд не будет заметным, процесс будет протекать так же, как при постоянном действии луча. Пары испаряемого вещества поднимаются по щели к выходу из нее. Часть паров конденсируется на стенках щели, но не могут ее перекрыть полностью, так как «лишнее» напыление очищается электронным лучом, т.е. расплавляется и стекает обратно в ванну расплава, а частично вновь испаряется. Таким образом, поверхность щели покрыта тонким слоем жидкого выпариваемого вещества. Поток паров, двигаясь навстречу электронному лучу, ионизируется. Размеры щели (глубина и ширина) и параметры электронного луча рассчитаны такими, что из щели выходят практически полностью ионизированные пары. Заряд ионов положительный. В результате они притягиваются отрицательным потенциалом, который подается на синтезируемое изделие, и входят в его состав.

Часть щелей остаются пустыми. Они служат для получения необходимых ионов из газов. Например, из кислорода O_2 , водорода H_2 , азота N_2 , аргона Ar , гелия He и из многокомпонентных газов, таких, как углекислый газ CO_2 , фтористый бор BF_3 , тетрафторид кремния SiF_4 , фторид фосфора PF_5 и др. В основании щелей располагаются отверстия для дозируемого напуска газов, которые, проходя через щель навстречу электронному лучу, будут ионизироваться и притягиваться отрицательно заряженной подложкой синтезируемого изделия.

Тигельный узел. Тигельный узел, представленный на рис. 6, состоит из набора тиглей двух типов:

паровых тиглей 1, предназначенных для получения ионов из паров испаряемого вещества;

газовых тиглей 2, предназначенных для получения ионов из подаваемых в них газов.

Каждый тигель монтируется на тигельную доску в concentрическом порядке. Общее количество тиглей соответствует поставленной технологической задаче и может изменяться от 1 до 30. Порядок установки тиглей может быть любым. Например, газовый тигель может быть установлен между паровыми, так как в плазме могут образовываться новые соединения, которые будут напыляться на подложку и входить в состав изделия.

Габаритные размеры и конфигурация обоих типов тиглей одинаковые. Тигли представляют собой сегменты, занимающие угол 60° и собранные в радиальном направлении в стопку. Установка оснащена 18 тиглями.

В каждом секторе, занимающем угол 60° , могут быть установлены тигли различных типов. Такая возможность предусмотрена для случая, когда возникнет необходимость получения молекул, образование которых возможно только в

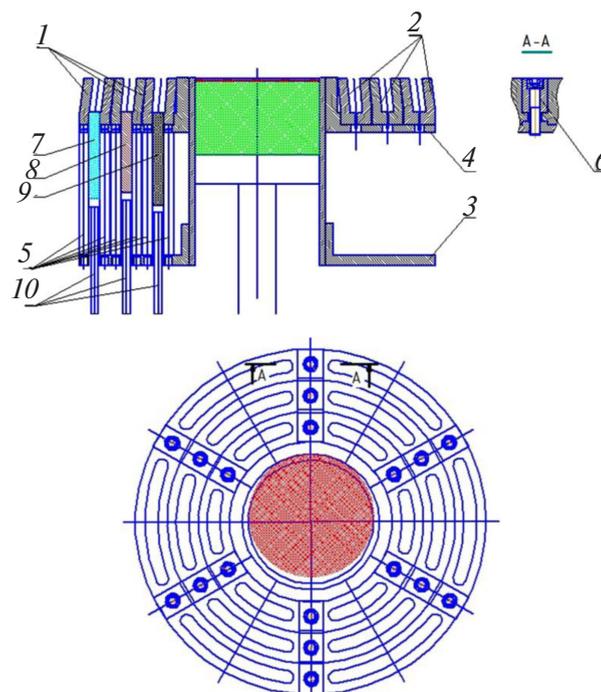


Рис. 6. Тигельный узел: 1 – паровые тигли; 2 – газовые тигли; 3, 4 – соответственно верхняя и нижняя плиты тигельной платформы; 5 – соединительные стержни; 6, 7 – центрирующие фланцы; 8, 9, 10 – сегменты испаряемых элементов; 11 – толкатели; 12 – прямоугольные вкладыши

плазме (например, нитрид титана). В результате более сложные молекулы будут высаживаться на подложку и входить в состав синтезируемого вещества.

Тигли собраны на тигельной платформе, состоящей из верхней 3 и нижней 4 плит. Плиты соединены между собой стержнями 5 и центрируются относительно корпуса синтезируемого вещества соответственно на фланцах 6 и 7. Стержни 5 одновременно являются и направляющими для подачи сегментов испаряемых элементов 8, 9, 10. Сегменты выпариваемых веществ подаются толкателями 11. Тигли крепятся к верхней тигельной плите прямоугольными вкладышами 12 (сечение А-А).

Конструкция водоохлаждаемых каналов тиглей исключает образование паровых подушек. В результате тигли не боятся прямого воздействия на их поверхность электронных и ионных пучков.

Модификация поверхности слоя. Модификация поверхности слоя по заданному программно сечению осуществляется с помощью дуоплазматрона. При достаточно высоких скоростях сканирования ионным пучком расплавления слоя не происходит. Ионы большой энергии чисто механически глубоко внедряются в поверхность синтезируемого изделия. Получаемый эффект обусловлен тем, что энергия ионов равна $1,5 \cdot 10^5$ эВ, а энергия связи атомов в веществе составляет порядка 5 эВ.

При этом ионы, имея массу того же порядка, что и атомы вещества, не просто смещают их, а вбивают в потенциальные ямы. Физическое состояние этих атомов описывается уравнением Шредингера. Высота стенок ямы такова, что ни одно из известных веществ не обладает достаточным химическим потенциалом, чтобы извлечь этот атом из такой ямы и вступить с ним в реакцию. Поэтому модифицированный слой является абсолютно химически стойким. Отсюда следуют и его остальные уникальные физико-механические свойства. Разрушить это состояние термическим воздействием невозможно, потому что теплового импульса атома не достаточно, чтобы преодолеть возникающий потенциальный барьер. Интересно исследовать температуру плавления модифицированного вещества — она может оказаться выше, чем температура плавления аналогичного вещества с таким же химическим составом.

Рассмотрим более подробно сам процесс локальной модификации материала изделия. При диаметре кроссовера 1 мкм и глубине модифицированного слоя 0,1 мкм за 10 проходов ионного луча мы получаем нить диаметром в 1 мкм модифицированного материала непосредственно в процессе формирования слоя. Из таких нитей можно формировать решетку, пространственные фигуры и т. д. Синтезируемое вещество будет армировано алмазоподобными волокнами. Скорость формирования такой нити можно определить исходя из следующих соображений: необходимый флюенс составляет 10^{19} ионов/см²; ток дуоплазматрона — порядка 0,1 А (то есть 10^{18} ионов/с).

Следовательно, при ширине линии в 1 мкм за одну секунду можно пройти отрезок длиной 10 метров или сформировать нить диаметром в 1 мкм и длиной 1 метр. Следует отметить, что получить такой материал известными способами невозможно.

При необходимости на установке можно расположить еще 4 дуоплазматрона. Дуоплазматрон с осцилляцией электронов содержит следующие элементы: полый катод 1 с косвенным нагревом (нагреватель 2) промежуточные электроды, ка-

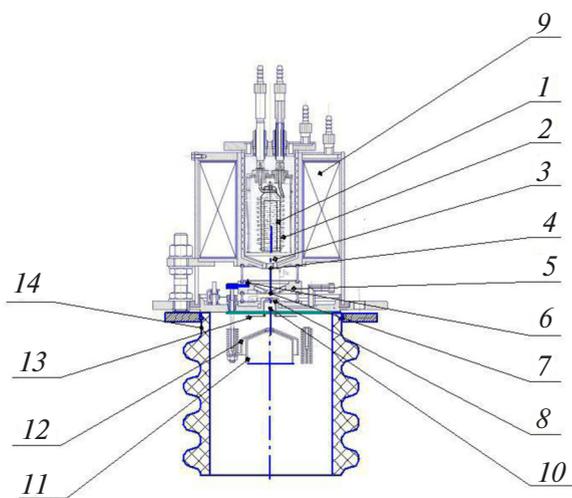


Рис. 7. Схема дуоплазматрона с осцилляцией электронов: 1 — катод; 2 — нагреватель; 3 — металлическая поверхность; 4 — катодная камера; 5 — промежуточный электрод; 6, 7 — отверстия в промежуточном электроде; 8 — электрод; 9 — электромагнит; 10 — раздаточная чаша электрода; 11 — анод; 12, 13 — регулирующие электроды; 14 — изолятор

тушка электромагнита, регулирующий электрод, анод, патрубков подачи рабочего газа (рис. 7).

При нагреве катода *1* до высокой температуры нагревателем *2* происходит термоэлектронная эмиссия, в результате которой образуются электронное облако и плазма, возникает двойной электрический слой между плазмой и окружающей её металлической поверхностью *3*, находящейся под потенциалом катода. Через отверстие катодной камеры *4* промежуточным электродом *5*, который находится под небольшим положительным потенциалом 10–15 В относительно катода, электроны вытягиваются и ускоряются.

Ускоренные электроны ионизируют рабочий газ, который подается через отверстие *6* в промежуточном электроде *5*, теряют свою энергию и попадают на поверхность этого электрода. Электроны, которые не столкнулись с атомами, пролетают через отверстие *7* в электроде *5*, отражаются электродом *8*, находящимся под отрицательным потенциалом относительно электрода *5*, и летят в обратную сторону. Электроны и образовавшаяся плазма удерживаются на оси при помощи как электростатических линз, образующихся поверхностями электродов, так и магнитным полем от электромагнита *9*.

Полученный электронно-плазменный шнур фокусируется на малом отверстии промежуточного электрода *5*. Давление в катодной части дуоплазматрона составляет 10^{-1} мм рт.ст., в рабочей камере установки – 10^{-5} мм рт.ст. Из-за разности давлений в дуоплазматроне и рабочем объеме плазма из шнура выталкивается в раздаточную чашу *10* электрода *8*. Ионы вытягиваются и ускоряются из плазмы анодом *11*. Электрод *12* регулирует ионный ток и осуществляет предварительную фокусировку ионов в пучок. Электрод *13* играет роль электрода Венельта. С помощью него можно оперативно включать и отключать ток ионов. Дуоплазматрон установлен на изоляторе *14*.

Система фокусировки дуоплазматрона. Пучки заряженных частиц запоминают все aberrации, которые вносятся в них при прохождении различных оптических систем. Данная система (рис. 8) включает в себя квадруплет из совмещенных секступоль-октупольных линз *1*, которые вносят в пучок геометрические и хроматические aberrации с отрицательным знаком. При прохождении через квадруплет Дымникова *2* из квадрупольных линз aberrации, внесенные этим

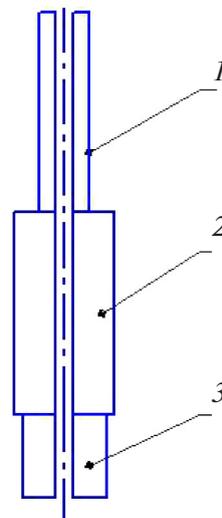


Рис. 8. Система фокусировки дуоплазматрона:
1 – квадруплет из совмещенных секступоль – октупольных линз;
2 – квадруплет Дымникова из квадрупольных линз;
3 – отклоняющая система

квадруплетом, будут скомпенсированы предварительно внесенными aberrациями.

Квадруплет Дымникова (или «русский квадруплет») является полным аналогом аксиально симметричных линз, но вносимые им aberrации, во-первых, гораздо меньше, а во-вторых, могут быть полностью скомпенсированы квадруплетом из секступоль-октупольных линз. В результате диаметр кроссовера ионного пучка можно довести до значения в 1 микрон. Отклонение пучка с целью наведения в нужную точку и его сканирование с необходимой скоростью производится отклоняющей системой *3*. Эта система конструктивно отличается от аналогичной системы, применяемой в ЭЛП, и состоит из двух неявнополюсных дипольных линз, практически не вносящих aberrаций в пучок, т. е. она безaberrационная и не приводит к увеличению диаметра кроссовера.

Выводы

Предложен новый подход к получению порошковых и композиционных изделий различного химического состава с программируемой структурой по гибридной технологии, включающей методы послойного электронно-лучевого

плавления/спекания, вакуумной пайки, электронно-лучевого напыления, ионно-имплантационной модификации поверхности порошка с использованием источника высокоэнергетических ионов.

Разработана конструкция специализированной установки для реализации гибридной технологии. Предложены оригинальные конструкторские решения механизмов подачи порошка, вибраций, ножа, которые могут быть использованы в различном оборудовании послойного синтеза изделий.

Разработана новая конструкция тигельного узла системы электронно-лучевого напыления, включающая не только концентрические щели для подачи слитков, но и щели для получения необходимых ионов из газов (кислород, водород, азот, углекислый газ, фтористый бор, тетрафторид кремния и др.).

Предложена схема электронно-лучевого напыления «сверху вниз», которая по сравнению с существующей схемой «снизу вверх» обеспечивает следующие преимущества:

коэффициент использования напыляемого материала – 30–90 % (вместо 3–7 %);

приведенная длина загрузки 5–10 м;

толщина напыляемого слоя – от 0 до 100 %, управляемая как вдоль оси изделия, так и в его азимутальном направлении;

адгезия напыленного слоя к подложке на несколько порядков выше.

Система фокусировки дуоплазматрона обеспечивает диаметр кроссовера ионного пучка 1 микрон, что предоставляет принципиально новые технологические возможности для получения изделий с высокой размерной точностью волокон композиционных изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Герман Рендалл М.** Порошковая металлургия от А до Я: Учебно-справочное руководство / Пер. с англ. О.В. Падалко и Г.А. Либенсон. Москва: ИД Интеллект, 2009. 336 с.
2. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Технология послойного электронно-лучевого синтеза порошковых изделий в вакууме // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 8. С. 40–45.
3. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий электронным лучом // Журнал технической физики. 2015. Т. 85. № 11. С. 91–96.
4. **Соколов Ю.А., Кондратьев С.Ю., Лукьянов А.А.** Получение изделий из композиционных материалов методом электронно-лучевого синтеза и исследование их свойств // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 2. С. 35–41.
5. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А.** Алгоритм и технологические процессы синтеза порошковых деталей электронным лучом в вакууме // Технология машиностроения. 2015. № 1. С. 11–16.
6. **Либенсон Г.А., Лопатин В.Ю., Комарницкий Г.В.** Процессы порошковой металлургии: В 2-х томах. Т.2. Формование и спекание. Москва: Изд-во МИСИС, 2002. 320 с.
7. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н.** Прессование гетерофазных увлажненных порошковых металлических смесей для повышения качества высокоплотных заготовок с использованием метода интенсивного уплотнения // Справочник. Инженерный журнал. 2011. № 6. С. 12–16.
8. **Рудской А.И., Кокорин В.Н., Кондратьев С.Ю., Филимонов В.И., Кокорин А.В.** Прессование гетерофазных увлажненных железных порошков при использовании метода интенсивного уплотнения // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 5 (23). С. 13–20.
9. **Рудской А.И., Кондратьев С.Ю., Кокорин В.Н., Сизов Н.А.** Исследование процесса уплотнения при ультразвуковом воздействии на увлажненную порошковую среду // Научно-технические ведомости СПбГПУ. 2013. № 178. С. 148–155.
10. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components // Welding International. 2012. Т. 26. № 8. Р. 629–632.
11. **Кондратьев С.Ю., Горынин В.И., Попов В.О.** Оптимизация параметров поверхностно-упрочненного слоя при лазерной закалке деталей // Сварочное производство. 2011. № 3. С. 11–15.
12. **Кондратьев С.Ю., Соколов Ю.А., Копаев В.Н.** Исследование движения расплавленной гранулы по поверхности формируемого изделия в процессе электронно-лучевого синтеза изделий // Металлообработка. 2014. № 1 (79). С. 27–31.
13. **Колбасников Н.Г., Кондратьев С.Ю.** Структура. Энтропия. Фазовые превращения и свойства металлов / Федеральное агентство по образованию. Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб., 2006. 363 с.

14. **Кондратьев С.Ю.** Механические свойства металлов: Учебное пособие / М-во образования и науки Российской Федерации. Санкт-Петербургский гос. политехнический ун-т. СПб., 2011. 128 с.

15. **Мусиенко В.Т.** Закономерности образования гранул при центробежном распылении вращающейся

ся заготовки. В кн.: *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 41–48.

16. **Орлов В.К.** К расчёту скоростей охлаждения капель расплывлённого металла в газовой среде. В кн.: *Металлургия гранул*. М.: ВИЛС, 1983. Вып. 1. С. 67–77.

REFERENCES

1. **German Rendall M.** Poroshkovaya metallurgiya ot A do Ya. Uchebno-spravocnoye rukovodstvo [Powder metallurgy from A to Y. Educational reference guide] / Per. s angl. O.V. Padalko i G.A. Libenson. Moskva: ID Intellect, 2009. 336 s. (rus.)

2. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Tekhnologiya posloynogo elektronno-luchevoogo sinteza poroshkovykh izdeliy v vakuume [Technology of layer-by-layer electron beam synthesis of powder products in vacuum]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2014. № 8. S. 40–45. (rus.)

3. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Osobennosti modelirovaniya protsessa posloynogo sinteza izdeliy elektronnyim luchom [Features of modeling of process of layer-by-layer synthesis of products electronic beam]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki*. 2015. T. 85. № 11. S. 91–96. (rus.)

4. **Sokolov Yu.A., Kondratyev S.Yu., Lukyanov A.A.** Polucheniye izdeliy iz kompozitsionnykh materialov metodom elektronno-luchevoogo sinteza i issledovaniye ikh svoystv [Receiving products from composite materials by method of electron beam synthesis and research of their properties]. *Zagotovitelnyye proizvodstva v mashinostroyenii*. 2015. № 2. S. 35–41. (rus.)

5. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A.** Algoritm i tekhnologicheskiye protsessy sinteza poroshkovykh detaley elektronnyim luchom v vakuume [Algorithm and technological processes of synthesis of powder details an electronic beam in vacuum]. *Tekhnologiya mashinostroyeniya*. 2015. № 1. S. 11–16. (rus.)

6. **Libenson G.A., Lopatin V.Yu., Komarnitskiy G.V.** Protsessy poroshkovoy metallurgii. [Processes of powder metallurgy]: V 2-kh tomakh. T.2. Formovaniye i spekaniye. Moskva: Izd-vo MISIS, 2002. 320 s. (rus.)

7. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N.** Pressovaniye geterofaznykh uvlazhnennykh poroshkovykh metallicheskiykh smesey dlya povysheniya kachestva vysokoplotnykh zagotovok s ispolzovaniyem metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened powder metal mixes for improvement of quality of high density preparations with use of a method of intensive consolidation]. *Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal*. 2011. № 6. S. 12–16. (rus.)

8. **Rudskoy A.I., Kokorin V.N., Kondratyev S.Yu., Filimonov V.I., Kokorin A.V.** Pressovaniye geterofaznykh

uvlazhnennykh zheleznykh poroshkov pri ispolzovanii metoda intensivnogo uplotneniya [Pressing of the heterophase moistened iron powders when using a method of intensive consolidation]. *Naukoyemkiye tekhnologii v mashinostroyenii*. 2013. № 5 (23). S. 13–20. (rus.)

9. **Rudskoy A.I., Kondratyev S.Yu., Kokorin V.N., Sizov N.A.** Issledovaniye protsessa uplotneniya pri ultrazvukovom vozdeystvii na uvlazhnennuyu poroshkovuyu sredu [Research of process of consolidation at ultrasonic impact on the humidified powder environment]. *Nauchno-tekhnicheskkiye vedomosti SPbGPU*. 2013. № 178. S. 148–155. (rus.)

10. **Kondrat'ev S.Y., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimization of the parameters of the surface-hardened layer in laser quenching of components. *Welding International*. 2012. T. 26. № 8. P. 629–632.

11. **Kondratyev S.Yu., Gorynin V.I., Popov V.O.** Optimizatsiya parametrov poverkhnostno-uprochnennogo sloya pri lazernoy zakalke detaley [Optimization of parameters of the superficial strengthened layer at laser training of details]. *Svarocnoye proizvodstvo*. 2011. № 3. S. 11–15. (rus.)

12. **Kondratyev S.Yu., Sokolov Yu.A., Kopayev V.N.** Issledovaniye dvizheniya rasplavlennoy granuly po poverkhnosti formiruyemogo izdeliya v protsesse elektronno-luchevoogo sinteza izdeliy [Research of the movement of the melted granule on a surface of the formed product in the course of electron beam synthesis of products]. *Metalloobrabotka*. 2014. № 1 (79). S. 27–31. (rus.)

13. **Kolbasnikov N.G., Kondratyev S.Yu.** Struktura. Entropiya. Fazovyye prevrashcheniya i svoystva metallov [Structure. Entropy. Phase transformations and properties of metals] / Federalnoye agentstvo po obrazovaniyu. Sankt-Peterburgskiy gos. politekhnicheskii un-t. SPb, 2006. 363 s. (rus.)

14. **Kondratyev S.Yu.** Mekhanicheskiye svoystva metallov: uchebnoye posobiye. [Mechanical properties of metals] / M-vo obrazovaniya i nauki Rossiyskoy Federatsii. Sankt-Peterburgskiy gos. politekhnicheskii un-t. SPb, 2011. 128 s. (rus.)

15. **Musiyenko V.T.** Zakonomernosti obrazovaniya granul pri sentroboznom raspylenii v vrashchayushcheyseya zagotovki [Regularities of formation of granules at centrifugal dispersion of the rotating preparation]. V kn.: *Metallurgiya granul*. М.: VILS, 1983. Vyp. 1. S. 41–48.

16. **Orlov V.K.** К расчету скоростей охлаждения metal in the gas environment]. В кн.: *Metallurgiya granul.* kapel распленного металла в газовой среде [To calculation of speeds of cooling of drops of the sprayed M.: VILS, 1983. Вып. 1. S. 67–77. (rus.)

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ/AUTHORS

РУДСКОЙ Андрей Иванович – доктор технических наук член-корреспондент РАН, ректор Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого.
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29.
E-mail: rector@spbstu.ru

RUDSKOY Andrey I. – Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University.
29 Politechnicheskaya St., St. Petersburg, 195251, Russia.
E-mail: rector@spbstu.ru

СОКОЛОВ Юрий Алексеевич – кандидат технических наук главный конструктор ООО «НТК Электромеханика».
172386, ул. Заводское шоссе, 2, г. Ржев, Россия.
E-mail: s5577@inbox.ru

SOKOLOV Yurii A. – “Electromechanica”.
2, Zavodskoe shosse, Rzhev city Tver region, Russia, 172386.
E-mail: s5577@inbox.ru

ПАВЛУШИН Николай Викторович – начальник Центра научных исследований и технического обслуживания вакуумной техники ГП НПКГ «Зоря» – «Машпроект».
Украина, 54018, г. Николаев, пр. Октябрьский 42-а.
E-mail: nvpavlushin@itenterprise.net

PAVLUSHIN Nikolay V. – SE Research and Production Complex “Zorya”-”Mashproekt”.
Ukraine, 54018, Nikolaev, etc.. The October 42-a.
E-mail: nvpavlushin@itenterprise.net