



# ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЕ НАПЫЛЕНИЕ: ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ

А.Иванов, Б.Смирнов / [micro@ostec-group.ru](mailto:micro@ostec-group.ru)

**Э**лектронно-лучевые пучки широко используются в технологическом оборудовании для нагрева, сварки, плавки, размерной обработки, распыления, фундаментальных и прикладных исследований, в том числе в нанотехнологиях. Сущность электронно-лучевого воздействия состоит в том, что кинетическая энергия электронного пучка (импульсного или непрерывного) превращается в зоне обработки в тепловую. Так как диапазоны мощности и концентрации энергии в луче велики, возможно получение всех видов термического воздействия на материал: нагрев его до заданных температур, плавление и испарение с высокими скоростями. Благодаря возможности концентрации тепловой энергии во всем диапазоне термического воздействия, необходимого для распыления практически любого материала и ведения процесса в вакууме, обеспечиваются чистота обрабатываемого материала, а также полная автоматизация оборудования.

Электронный луч (рис.1) по удельной энергетической мощности, легкости управления, эффективности и локальности нагрева превосходит все известные источники, уступая лишь лазерному излучению. Однако, в отличие от лазерного, электронный луч может иметь произвольную форму. Его преимущества также в том, что он не вносит примесей в обрабатываемый материал, может работать в агрессивной или инертной среде.

В производстве широко используется электронно-лучевые испарители, дающие возможность получения тонких пленок металлов, сплавов и диэлектриков. Хорошая фокусировка электронного пучка

позволяет получать большую концентрацию мощности (до  $5 \cdot 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>) и высокую температуру, обеспечивая возможность испарения с большой скоростью даже самых тугоплавких материалов. Быстрое перемещение нагретой зоны в результате отклонения потока электронов, регулировка и контроль мощности нагрева и скорости осаждения создают предпосылки для автоматического управления процессом. В методе эффективно реализуется автотигельное испарение материала, поэтому он обеспечивает высокую чистоту и однородность осаждения.

**Электронный луч** – поток движущихся в одном и том же направлении по близким траекториям электронов. Он имеет размеры, значительно большие в направлении движения по сравнению с поперечной плоскостью.

**Автотигельное испарение** – тип испарения, при котором материал не контактирует в расплавленном виде со стенками тигля.



Рис.1. Электронный луч в технологии напыления тонких пленок



## ПРИНЦИП ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОГО ИСПАРИТЕЛЯ

Для формирования потока электронов предназначена электронная пушка (рис.2), состоящая из вольфрамового термокатода и фокусирующей системы. Эмитируемые электроны проходят эту систему, ускоряются за счет разности потенциалов до 10 кВ между катодом и анодом и формируются в электронный луч. Отклоняющую систему создает магнитное поле, перпендикулярное направлению движения выходящих из фокусирующей системы пушки электронов. Это поле направляет электронный луч в центральную часть водоохлаждаемого тигля, причем в месте падения луча создается локальная зона разогрева и испарения вещества из жидкой фазы. Поток испарившегося материала осаждается в виде тонкой пленки на подложке, которая обычно располагается на определенном расстоянии над испарителем. Изменяя ток в катушке управляющей отклоняющей системой электромагнита, можно сканировать лучом вдоль тигля, что предотвращает образование "кратера" в испаряемом материале.

В электронной пушке с поверхности катода происходит эмиссия свободных электронов и их формирование под действием ускоряющих и фокусирующих электростатических и магнитных полей в пучок, который выводится в рабочую камеру через выходное отверстие. Для подведения электронного пучка к тиглю с испаряемым материалом и обеспечения его требуемых параметров используются главным образом магнитные фокусирующие линзы и отклоняющие системы. Беспрепятственное прохождение такого пучка до объекта возможно только в высоком вакууме. Вследствие бомбардировки поверхности электронным пучком, материал нагревается

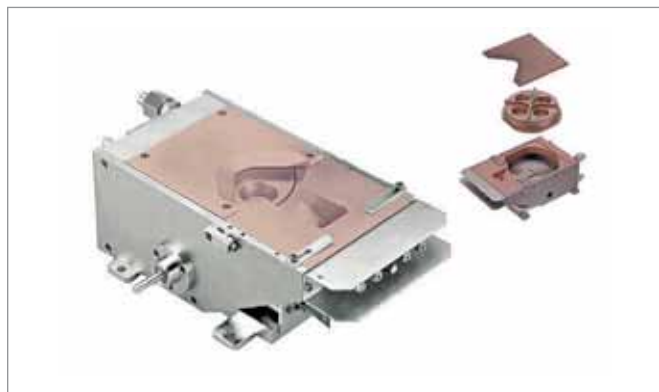


Рис.2. Электронная пушка

до температуры, при которой происходит его испарение с требуемой скоростью. В образующийся поток помещается подложка, на которую конденсируется испаряемое вещество. Испарительное устройство дополняется средствами измерения и контроля, которые особенно важны для управления электронным пучком в процессе напыления.

В простейшем случае электронный пучок направляется на испаряемый материал отвесно сверху или под косым углом к поверхности. Для фокусировки пучка и получения на поверхности материала требуемой удельной мощности используются длиннофокусные генераторы электронных пучков. Существенные недостатки такого расположения – возможность образования пленки на деталях электронно-оптической системы, приводящей к изменению параметров электронного луча, и ограничение полезной площади для размещения подложки из-за затенения части технологической камеры пушкой. Указанных недостатков можно избежать, размещая пушку горизонтально, а отклонение электронного пучка на испаряемый материал осуществлять с помощью систем, обеспечивающих поворот пучка на угол до 270°.

Как правило, электронно-лучевой испаритель (рис.3, 4) состоит из трех основных частей: электронной пушки, отклоняющей системы и водоохлаждаемого тигля различной емкости (7, 13, 15, 18, 25, 40 и 156 см<sup>3</sup>). Это обеспечивает непрерывную работу без добавления испаряемого материала, который, кроме того, в расплавленном состоянии не контактирует с медными стенками тигля. В общем случае возможно использование сформованного по размеру тигля материала (безтигельное испарение) или применение совместно со специальными тиглями порошкового материала.

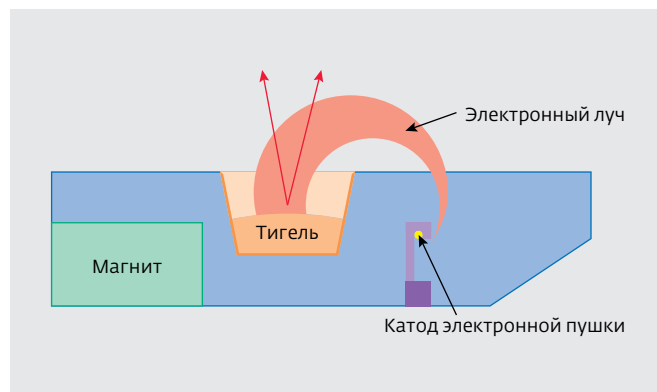


Рис.3. Схема электронно-лучевого испарителя

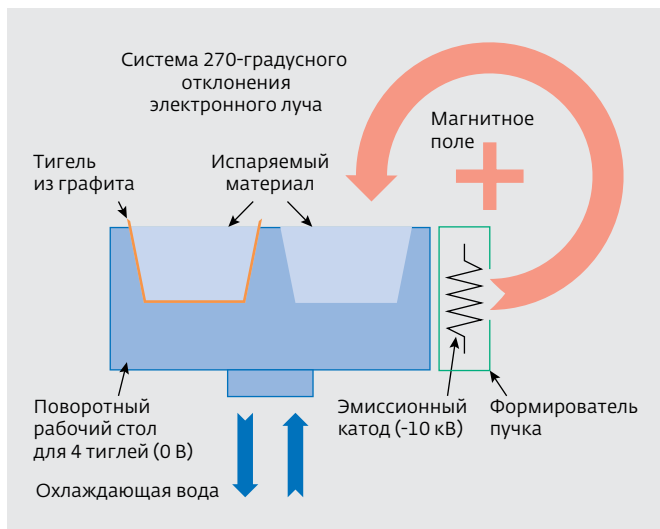


Рис. 4. Схема создания электронного луча и поворотный рабочий стол

Электронно-лучевой испаритель размещается в камере, где поддерживается уровень вакуума в  $10^{-4}$  Па, необходимый для минимизации влияния остаточного газа на эффективность прохождения электронного луча, и исключение загрязнений другими материалами структуры получаемой пленки.

Около 30–40% мощности электронного луча расходуется на плавление и испарение материала (2–10% и 30–35%, соответственно). Остальная мощность идет на теплообмен посредством теплопроводности, излучения и уносится вылетающими из зоны нагрева электронами. Эта мощность зависит от природы испаряемого материала и параметров электронного луча. Основная доля электронов уносится упруго- и неупругоотраженными электронами, количество которых определяется в первую очередь природой материала (для стали – около 25% мощности, для вольфрама – 38%).

К недостаткам электронно-лучевого испарения следует отнести:

- высокое ускоряющее напряжение (порядка 10 кВ);

**Источники с термокатодом** работают при давлениях  $10^{-2} \dots 10^{-4}$  Па. Они обеспечивают большую яркость электронного пучка. В качестве катода могут использоваться тугоплавкие металлы (вольфрам, молибден) или сложные соединения (оксиды, нитриды или карбиды металлов). В последнее время широкое распространение получили катоды из гексаборида лантала ( $\text{LaB}_6$ ).

- вследствие затрат энергии на образование вторичных электронов низкий КПД установок (до 25% энергии первичного пучка), нагрев тигля, рентгеновское и УФ-излучение;
  - при бомбардировке наносимых пленок вторичными электронами генерацию радиационных дефектов;
  - по сравнению с магнетронным напылением низкую стехиометрию пленок;
  - вследствие низкой энергии осаждаемых частиц плохую адгезию тонких пленок к основе;
  - зарядение напыляемой поверхности статическим зарядом, который может вызвать пробой по пленке и нарушить ее адгезию;
  - не высокую производительность.
- К преимуществам метода относятся:
- возможность нанесения пленок металлов (в том числе тугоплавких), сплавов, полупроводниковых соединений и диэлектриков с температурой плавления вплоть до  $3500^\circ\text{C}$ ;
  - высокая скорость испарения веществ (от 1 до 10 нм/м) и возможность регулирования ее в широких пределах за счет изменения подводимой к испарителю мощности;
  - возможность получения при высоком вакууме покрытий, практически свободных от загрязнений; их чистота определяется чистотой используемого для напыления материала;
  - равномерность получаемых покрытий;
  - свободная диффузия атомов вещества испарителя в рабочей камере, прямолинейное их движение без столкновения с остаточными молекулами компонентов воздуха и бесполезного рассеивания материала в объеме камеры, исключение химического взаимодействия напыляемого вещества с остатками воздуха.

## ВЫБОР МЕТОДА НАНЕСЕНИЯ ПЛЕНОК

В производстве тонкопленочных и полупроводниковых структур используются группы подложек, которые часто имеют прямоугольную форму размерами 60×48 мм или 120×96 мм, изготавливаются из изолирующего материала (ситалл, поликор, стекло) и рассчитаны на одновременное изготовление до нескольких десятков идентичных изделий, причем свойства напыляемой пленки должны быть одинаковы на всей площади групповой заготовки.

В первом приближении поток атомов к подложке представляет собой расходящийся пучок, поэтому его плотность в ее плоскости не равномерна: в центре такая плотность максимальна



и к периферии подложки убывает. Это означает, что при напылении на неподвижную подложку, в ее центральной области образуется более толстая пленка, нежели на краях. Например, резисторы, сформированные в центральной части, будут иметь заниженное сопротивление по сравнению с аналогичными изделиями на периферийных модулях.

По этой причине установки напыления часто снабжены вращающимися устройствами (дисками, барабанами), несущими несколько подложек, которые последовательно и многократно проходят над неподвижным испарителем, постепенно набирая пленку необходимой толщины. В результате центральный "холм", который мог бы образоваться на неподвижной подложке, размывается в "хребет", вытянутый в направлении движения подложки. Для выравнивания толщины пленки в поперечном направлении применяется корректирующая диафрагма, устанавливаемая между испарителем и подложкой, в непосредственной близости от нее. Профиль диафрагмы рассчитывается на основании исследования рельефа пленки, получаемой при напылении на неподвижную и движущуюся подложки. В результате использования такой диафрагмы различия времени облучения центральной и периферийной

зон подложки снижаются, равномерность толщины пленки на всей площади повышается и находится в пределах  $\pm 2\%$  (для подложек 60×48 мм). На структуру пленки и, следовательно, на стабильность ее электрофизических параметров, оказывает существенное влияние температура подложки, поэтому важно использовать нагреватели, поддерживая их температуру в заданных пределах.

В табл.1 приведена информация о трех основных методах нанесения пленок с указанием их преимуществ и недостатков.

Остальные параметры компонентов систем и особенности используемых процессов характерны для всех известных способов напыления пленок. Таким образом целесообразно выбрать любой из рассмотренных способов, наиболее подходящий для конкретного производства.

Например, резистивный способ идеально подходит для нанесения на подложки 60×48 мм покрытий толщиной от 1 до 10 мкм. Высокая неоднородность получаемого покрытия (по сравнению с двумя другими методами) не очень заметна при таких толщинах. На самом деле по технологическим нормам толщина пленки от 3 до 6 мкм. Это значит, что допустимая ее неравномерность составляет более 50% от минимального значения. В результате

Таблица 1. Основные методы нанесения пленок

Метод	Достоинства	Недостатки
Резистивное напыление	Простота Получение покрытий различного химического состава Высокая скорость осаждения Возможность изготовления толстых покрытий	Напыление пленок тугоплавких материалов, например, W, Mo, SiO <sub>2</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , требует высоких температур, при которых неизбежно загрязнение потока материалом испарителя При напылении сплавов различие в скорости испарения отдельных компонентов приводит к изменению состава пленки по сравнению с исходным материалом
Электронно-лучевое напыление	Получение тонких пленок металлов, сплавов и диэлектриков Испарение с большой скоростью даже самых тугоплавких материалов Полностью автоматизированное управление Высокая чистота и однородность осаждаемой пленки Высокая скорость осаждения Возможность получения толстых покрытий	Низкая равномерность толщины и стехиометрии пленок на изделиях сложной конфигурации Низкая степень загрузки изделиями рабочей камеры Возникновение рентгеновского излучения и, как следствие, возможность появления радиационных дефектов
Магнетронное напыление	Высокие скорости распыления при низких напряжениях ( $\approx 500$ В) и небольших давлениях рабочего газа Низкий уровень радиационных дефектов, отсутствие перегрева подложек Малая степень загрязнения пленок включениями Возможность получения равномерных по толщине пленок на большой площади	Относительная сложность реализации метода при получении реактивных (керамических) покрытий Относительно высокая стоимость оборудования



Рис.5. Установка электронно-лучевого напыления E-BeamEvaporator

резистивное напыление идеально для решения таких задач.

Если необходимо получать с высокой производительностью равномерные, низкодефектные пленки металлов толщиной от 200 нм до 1 мкм на подложках 60×48 мм или полупроводниковых пластинах диаметром 100 мм, целесообразно использовать магнетронное напыление.

Электронно-лучевое напыление подходит во всех случаях, когда не требуется высокая производительность, но необходима система для напыления широкого спектра материалов различной толщины на разнообразные подложки. Метод наиболее универсален для производства изделий большой номенклатуры. Его существенный минус – низкая производительность. Однако установку электронно-лучевого напыления

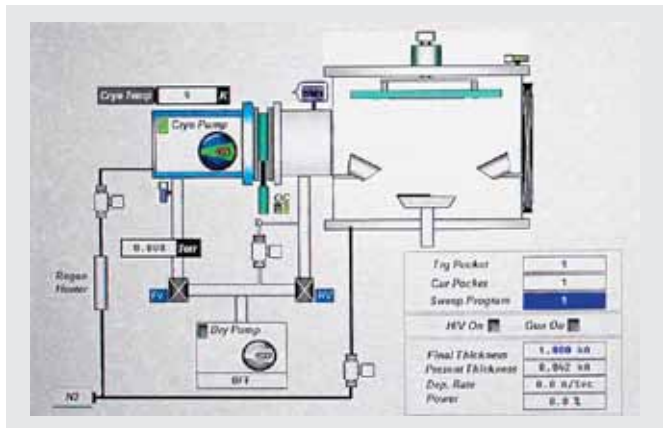


Рис.6. Пример интерфейса установки E-BeamEvaporator

можно оснастить системой перемещения подложек, увеличив этот параметр, но снизив уровень номенклатуры изготавливаемых изделий. Рекомендуемые толщины покрытий для электронно-лучевого напыления от 10 нм до 1 мкм, когда исключительно важна точность напыления в десятки ангстремов.

### УСТАНОВКА E-BeamEvaporator

Стратегический партнер компании Остек, с которым осуществляется сотрудничество в области оборудования для напыления – компания из Южной Кореи AP Systems. Наряду с оборудованием для резистивного и магнетронного напыления она предлагает решения для создания пленок электронно-лучевым методом, в частности, установку E-BeamEvaporator (рис.5).



Рис.7. Рабочая камера установки E-BeamEvaporator

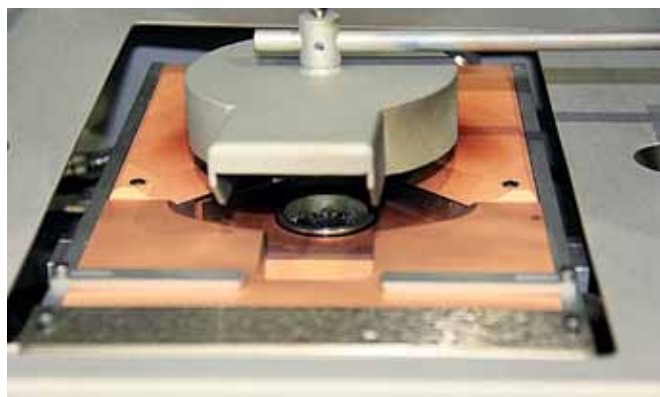


Рис.8. Электронно-лучевой испаритель. Тигель с титаном емкостью 15 см<sup>3</sup> установлен в рассчитанный на четыре тигля вращающийся рабочий стол

Установка состоит из рабочей камеры, панели управления электронным лучом (ПК, датчик контроля толщины наносимого покрытия), крионасоса. Отдельно размещаются:

- форвакуумный насос (первая стадия двухстадийной откачки рабочей камеры);

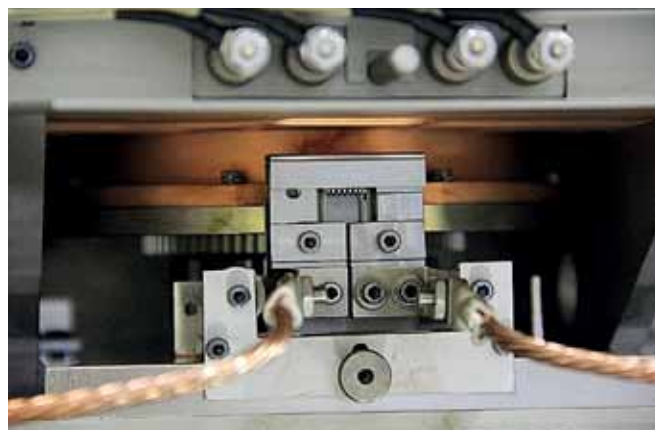


Рис.9. Электронная пушка и отклоняющая система источника

- криокомпрессор для поддержания температуры крио насоса;
- трансформатор переменного напряжения 380/220 В (трехфазная сеть), от которого запитаны установка и ее внешние блоки.

В табл.2 приведены краткие характеристики установки, а на рис.6 – пример ее интерфейса.

Таблица 2. Технические характеристики установки E-BeamEvaporator

Электронно-лучевой источник	Ток луча	0–1,2 А ±0,5%
	Ускоряющее напряжение	0–10 кВ ±0,5%
	Мощность луча	До 12 кВт, напряжение 10 кВ
	Отклонение луча	270°
	Форма луча	Синусоидальная, пилообразная, треугольная, произвольная
Тигель		15 см <sup>3</sup> , 4 штуки (в зависимости от емкости)
Система автоматического измерения толщины	Тип датчика	Кварцевый осциллятор, частота 6 МГц
	Разрешение	±0,028 Гц
	Интервал измерения	0,25 с
	Разрешение измерения толщины пленки	0,034 Å
Предельный вакуум		5×10 <sup>-7</sup> торр
Блок нагрева подложек		Две пары ламповых ИК-нагревателей с максимальной температурой 450°С
Вращающийся подложкодержатель (опционно)		По одному образцу разного размера (при наличии необходимой оснастки)
		3-дюймовый (75 мм) на 39 пластин
		4-дюймовый (100 мм) на 24 пластины
		6-дюймовый (150 мм) на 9 пластин

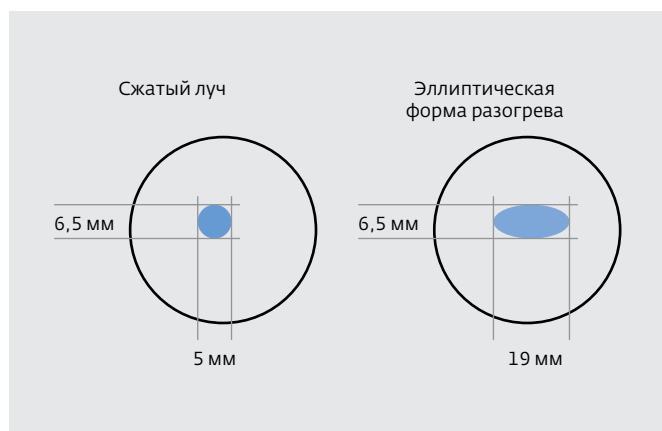


Рис.10. Форма разогрева материала электронным лучом

На рис.7. представлена рабочая камера рассматриваемой установки. Она включает испаритель (рис.8), состоящий из электронно-лучевой пушки (рис.9) с системой отклонения луча на  $270^\circ$ , и поворотный стол, на который установлены четыре тигля емкостью  $15 \text{ см}^3$ . Испаритель отделен заслонкой от рабочего пространства камеры, к "потолку" которой крепится оснастка для подложек различных типоразмеров. В камере также установлены два ИК-нагревателя, которые перед началом напыления нагревают подложки для улучшения адгезионных свойств поверхности. Помимо этого в камере размещается кварцевый осциллятор, в режиме реального времени контролирующей скорость напыления и с ангстремной точностью финальную толщину покрытия. Показания датчика передаются в управляющий ПК, поддерживающий заданные параметры процесса. Таким образом, все напыление протекает при минимальном участии оператора, который не должен визуально контролировать "факел" в зоне разогрева или думать о том, какую мощность электронного луча надо подавать летом, а какую зимой (проблема отечественных производств, когда обратная вода зимой холоднее, чем летом). Следует отметить: если оператор захочет, он может проводить процессы в ручном режиме, но это нетехнологично.

Конечно, электронно-лучевое напыление далеко не так просто, как может показаться. В нем, как и в любом другом методе, существует ряд нюансов, которые не ограничивают применение метода, но обязывают технологов знать немного больше о рассматриваемом процессе.

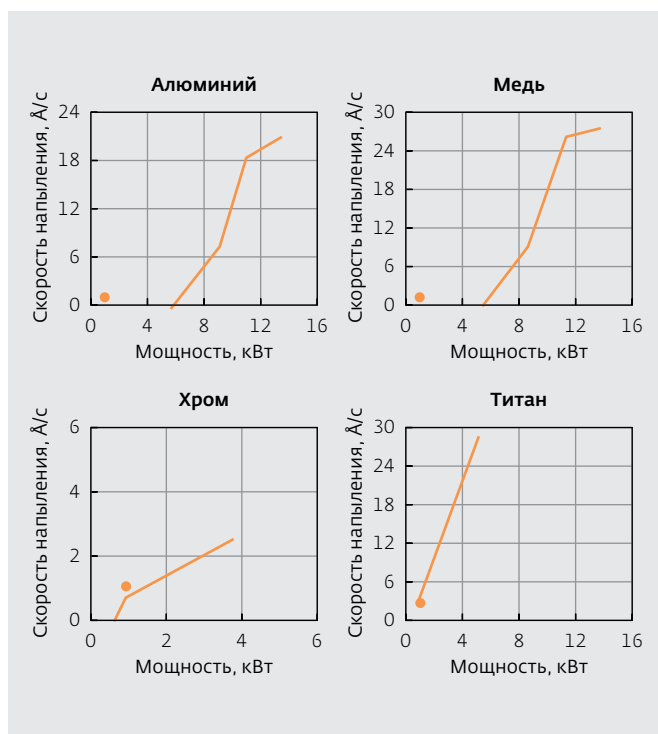


Рис.11. Зависимости скоростей напыления от мощности электронного луча

Так, например, электронным лучом довольно сложно разогревать и испарять алюминий. Это связано с его высокой электро- и теплопроводностью. Для достижения требуемого эффекта необходим длительный и медленный прогрев места испарения. Или, например, для "кинжального" разогрева и импульсного испарения ряда материалов подойдет максимально сжатый электронный луч (рис.10).

Для других материалов необходимо прогревать большую зону. На рис.11 показаны типовые значения зависимости скоростей напыления от мощности электронного луча для различных материалов. Как видно, 12 кВт вполне достаточно, чтобы получить скорости напыления, необходимые для любого процесса, или понять, какой тигель выбрать для напыляемого материала.

\*\*\*

В представленной статье авторы постарались раскрыть ряд тонкостей электронно-лучевого напыления и познакомить читателей с нюансами данного процесса. Были также рассмотрены ключевые параметры технологического оборудования для его реализации. ■