

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

1. Свойства электронов, методы получения и транспортировки электронных пучков

- Электрон (e^-) – первая экспериментально обнаруженная элементарная частица. Материальный носитель наименьшей массы и наименьшего электрического заряда. Составная часть атома. Число e^- в атоме равно заряду ядра Z . Заряд электрона $Z_e = -1,6 \cdot 10^{-19}$ К. Масса $m_e = 0,91 \cdot 10^{-27}$ грамма $\sim 0,510$ МэВ.
- Спин равен $1/2$ (в ед. \hbar). Следовательно, подчиняется статистике Ферми-Дирака. Магнитный момент $\mu_e = 1,001\mu_0$ (μ_0 – магнетон Бора). Стабильная частица. Относится к классу лептонов. Открыт Дж. Дж. Томпсоном в 1891 г.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Существуют три группы электронных технологий:

Электронные приборы. При взаимодействии ускоренных электронов с твёрдым телом происходит множество взаимосвязанных процессов, в результате которых наблюдается эмиссия облучаемой поверхности электронов, фотонов и атомных частиц, а свойства самого твёрдого тела могут существенно измениться. Они широко используются в электровакуумных приборах разнообразного типа и назначения.

Электронная обработка. Использование электронных пучков в качестве универсального технологического инструмента, позволяющего не только изменять заданным образом свойства материалов, но и весьма тонко контролировать эти изменения.

Электронная диагностика. Определение структуры, состава и других параметров материалов и изделий. **Большое самостоятельное научное направление. Данный курс предполагает, что эта тема будет проработана студентами самостоятельно (должен быть подготовлен обзор с конспективным изложением физической сущности методов диагностики материалов и изделий, в котором основное внимание должно быть уделено роли первичного пучка электронов).**

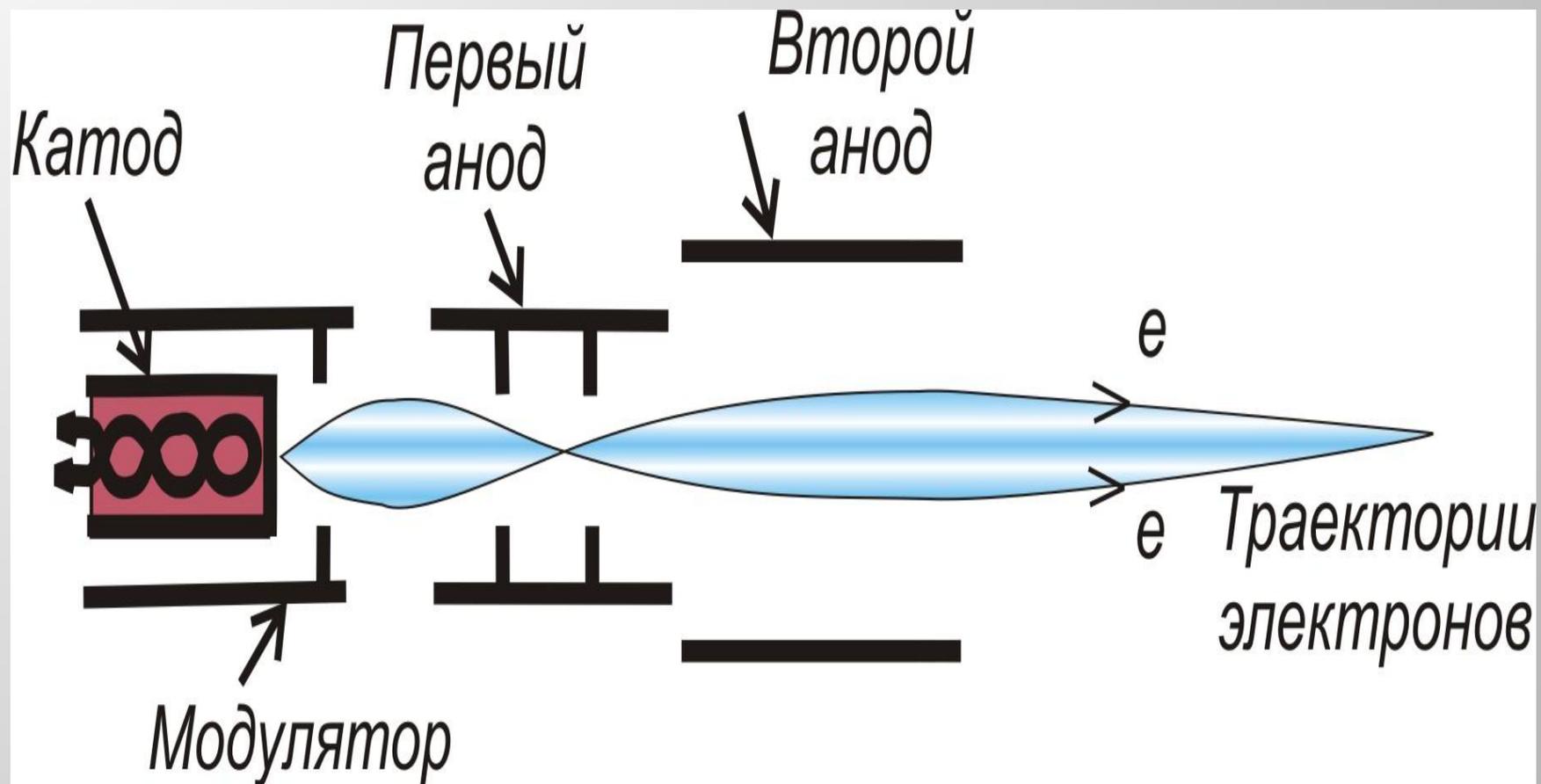
Электронным пучком называют остросфокусированный поток ускоренных электронов. Частицы эмитируются катодом, ускоряются в электрическом поле между катодом и анодом, а затем фокусируются в пятно относительно малых размеров (обычно диаметром от сотых долей до десятков миллиметров).

Электронная пушка — устройство, с помощью которого получают пучок электронов с заданными кинетической энергией и конфигурацией. Работа электронной пушки возможна только в условиях глубокого вакуума, чтобы электроны не рассеивались при столкновении с молекулами атмосферных газов.

Используется в кинескопах и других электронно-лучевых трубках, а также в электронных микроскопах, ускорителях заряженных частиц, технологических установках для обработки материалов.

Состоит из катода, управляющего электрода (модулятора), ускоряющего электрода, и одного и более анодов. При наличии двух и более анодов, за первым анодом закрепился термин *фокусирующий электрод*.

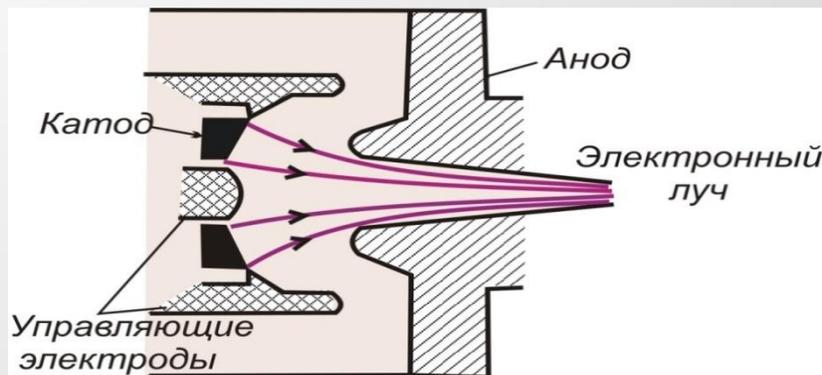
Электронная пушка



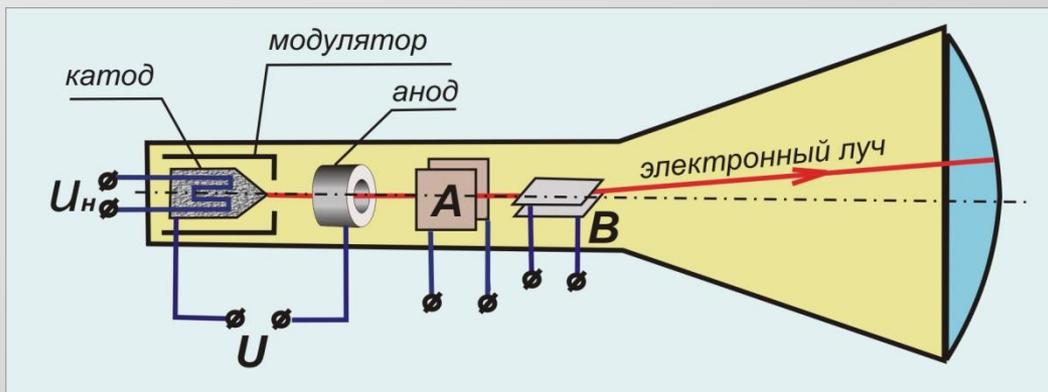
Катод

- Катод создаёт поток электронов, которые исходят с его нагретой поверхности вследствие термоэлектронной эмиссии.
- Оксидный катод (кристаллы твёрдого раствора окислов щёлочноземельных металлов — бария, кальция и стронция) обеспечивает достаточную эмиссию при относительно невысокой температуре 780—820 °С. Долговечен, для его подогрева требуется небольшая мощность. Косвенный накал.
- Катодный узел представляет собой полуу гильзу с плоским дном. На внешнюю поверхность дна гильзы нанесён оксидный слой, а внутри гильзы расположен подогреватель в виде спирали из проволоки с высоким удельным сопротивлением. Цепь подогревателя электрически изолирована от катода.
- Активация и тренировка катода. После этого его эмиссионные свойства долгое время остаются стабильными. Неправильный температурный режим, а также ухудшение вакуума ведут к деструктивным механическим и химическим процессам в оксидном слое катода, что ускоряет наступление отказа электронной пушки из-за потери эмиссии (невозможно получить необходимый ток).
- Плазмозэмиссионный катод.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков



Катодный узел

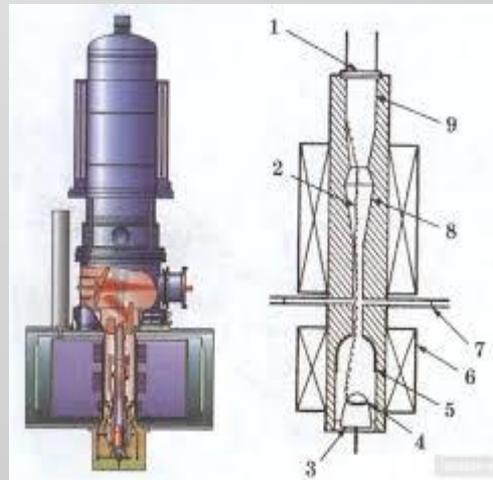
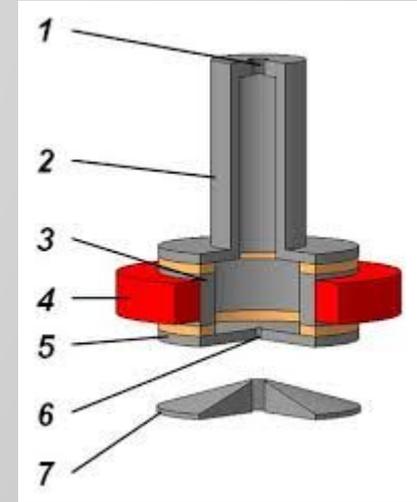


Электронная трубка



Электронная пушка

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков



2. Взаимодействие электронов с веществом

Процессы, которые происходят на поверхности и в глубине твёрдого тела при попадании электронов. Закономерности их протекания определяются свойствами твёрдого тела и параметрами электронного пучка: энергией электронов, направлением их движения и интенсивностью их потока.

- На рисунке представлены основные физические процессы, происходящие при взаимодействии ускоренных электронов с веществом.

Пояснение: рис. 2.2а относится к явлениям на поверхности и в вакууме; рис. 2.2б – явления внутри твёрдого тела.

Attention! Picture numbers!

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

2.3. Взаимодействие электронов с веществом.



Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

2.3. Взаимодействие электронов с веществом.



Столкновительные процессы

А. Типичные значения эффективных сечений соударения электронов в диапазоне энергий $10^2 - 10^4$ эВ с атомами и молекулами газов составляют $10^6 - 10^7$ бн ($10^{-18} - 10^{-17}$ см²). При давлении остаточных газов 1 Па на каждом метре пути электрон испытывает в среднем от одного до ста таких соударений. Таким образом, для того чтобы не менее 99% электронов доходили до поверхности, необходимо поддерживать давление остаточных газов в установке на уровне $10^{-2} - 10^{-4}$ Па ($10^{-4} - 10^{-6}$ тор) и ниже.

Б. Столкновения электронов с атомами газов в ряде случаев оказываются полезными. Ионизацию газа электронным ударом используют в некоторых типах ионных источников, при ионной фокусировке мощных электронных пучков, в газоразрядных приборах, в вакуумной технике для получения и измерения вакуума и т.п.

В. При прохождении границы раздела «вакуум – твёрдое тело» первичные электроны ускоряются в поле сил поверхностного потенциального барьера и продолжают движение в веществе с возросшей кинетической энергией. Для большинства материалов эта добавка к кинетической энергии (внутренний потенциал твёрдого тела) составляет 10–20 эВ, и её следует учитывать лишь для медленных электронов с энергией до 1 кэВ.

Упругие взаимодействия: участвующие в нем частицы обмениваются кинетической энергией, а их внутренняя энергия не изменяется.

В каждом акте упругого рассеяния первичный электрон теряет энергию дискретными порциями, соответствующими возбуждению одного или нескольких фононов. Строго говоря, этот процесс не является чисто упругим. Он сопровождается возрастанием внутренней энергии твёрдого тела – энергии тепловых колебаний. Однако так как энергия фононов значительно меньше, чем энергия первичных электронов, то такое рассеяние считают обычно квазиупругим

Отражение от поверхности. Часть первичных электронов испытывает отклонение на большие углы в результате одного или нескольких последовательных актов упругого рассеяния на поверхностных атомах и возвращается в вакуум. Такие электроны называются упруго отражёнными.

Торможение электронов при движении в веществе может быть обусловлено многими причинами.

1. **Тормозное излучение.** Спектр имеет непрерывный характер. Поэтому при эксплуатации любой высоковольтной электронно-лучевой установки необходимо применять особые меры для защиты обслуживающего персонала от рентгеновского излучения. Тормозное излучение находит применение в различных источниках рентгеновских лучей.
2. Когда электрон пересекает границу раздела двух сред с различными свойствами, возможно появление **переходного излучения**.
3. При очень больших значениях E_1 наблюдается **излучение Черенкова**, которое возникает в том случае, когда скорость электронов превышает фазовую скорость распространения электромагнитных волн в данном веществе.
4. При движении релятивистских электронов по каналам в монокристаллических телах, кроме того, наблюдается **излучение при каналировании** (когерентное испускание рентгеновских фотонов).

Все перечисленные виды излучения уносят определённую часть энергии первичного электрона, доля которой, однако, сравнительно невелика. Только при энергиях электронов в десятки мегаэлектрон-вольт потери на излучение становятся сравнимы с другими видами потерь энергии.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

2.3. Взаимодействие электронов с веществом.

Релаксация возбуждённого атома может происходить с испусканием излучения либо без него.

Относительная вероятность каждого из этих процессов зависит от атомного номера элемента и от того, на каком уровне была образована вакансия. Спектр характеристического излучения расположен, как правило, в области рентгеновских длин волн и так же, как и спектр оже-электронов, несёт информацию о природе излучающих атомов.

Это свойство широко используется при рентгеноспектральном локальном анализе элементного состава твёрдых тел. Толщина анализируемой приповерхностной области образца при таком методе гораздо больше, чем в оже-спектроскопии, так как не несущие заряда рентгеновские кванты значительно меньше, чем электроны, поглощаются и рассеиваются веществом на пути к поверхности.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Преимущества электронных технологий

- 1) *универсальность*: объектом электронно-лучевой технологии может быть большинство металлов, диэлектриков и полупроводников с различными физико-химическими свойствами;
- 2) *отсутствие источников загрязнений*: процесс протекает в высоком вакууме, сам электронный луч не вносит загрязнений и не подвержен износу, а контроль с его помощью, как правило, является неразрушающим;
- 3) *хорошая управляемость* по интенсивности, концентрации, месту и времени выделения мощности. Эти параметры можно регулировать, изменяя энергию, фокусировку, модуляцию и отклонение электронных потоков; малая инерционность;
- 4) *возможность полной автоматизации* технологического процесса, поскольку все управление любой электронно-лучевой установкой можно осуществлять путём изменения соответствующих электрических величин.

В настоящее время наибольшее распространение получили **термические** способы электронно-лучевой обработки.

Примеры **нетермической** обработки: электронная литография, получение тонких пленок при разложении химических соединений и т.д.

Тенденция: расширение применения электронных технологий по мере углубления наших знаний о физике взаимодействия электронов с веществом. Переход к процессам, в которых участвуют все более высокие энергии во все меньших

Диапазоны абсолютной и удельной мощности электронного пучка для различных технологических процессов

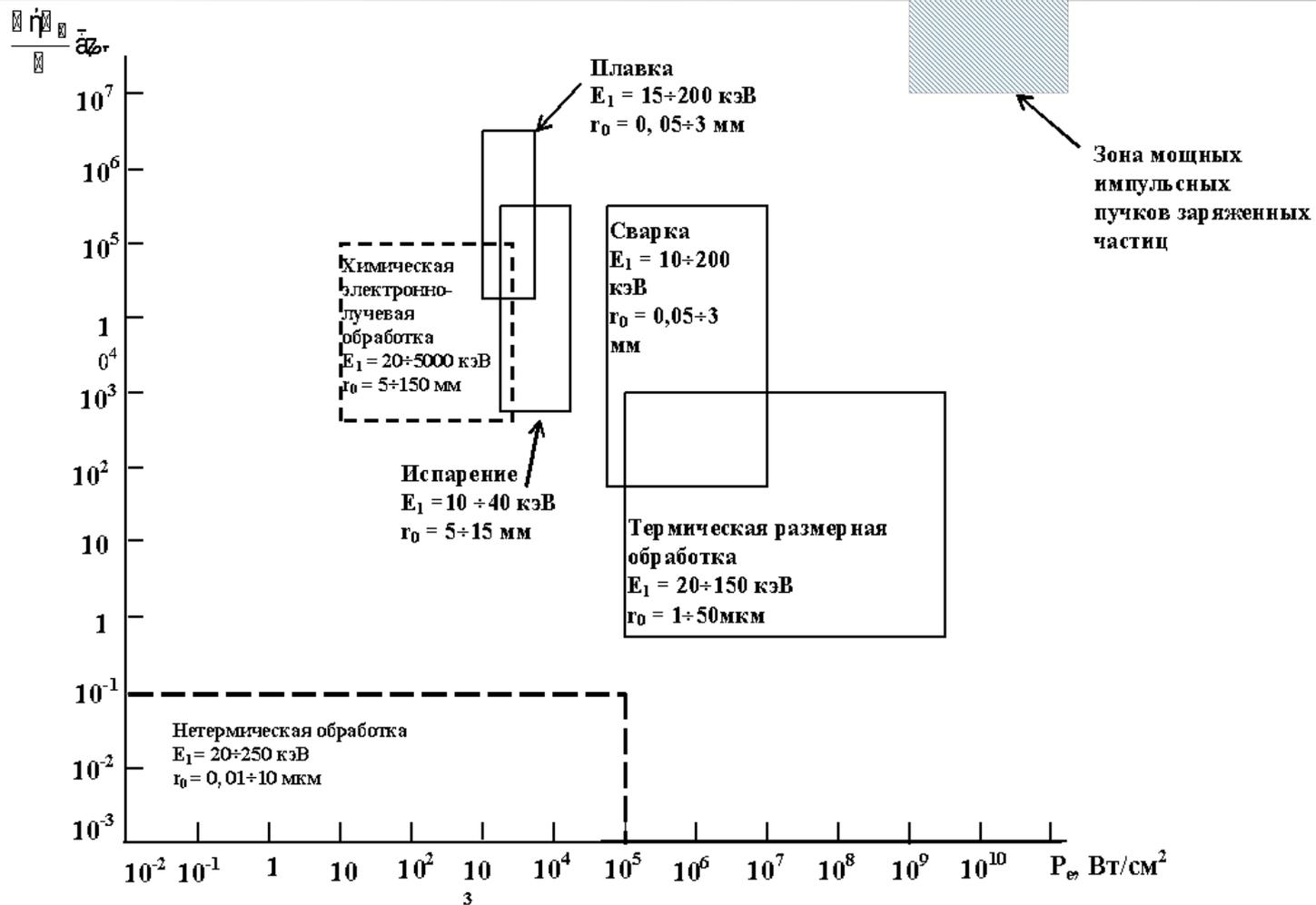


Рис. Технологические возможности электронных пучков.

E_1 – начальная энергия электронов; r_0 – радиус электронного пучка; I – ток пучка; P_e – плотность мощности пучка

Тепловые эффекты пучка. Электронно-лучевой нагрев

1. Скорость теплоотвода возрастает при увеличении разности температур между нагреваемой областью и окружающей средой. Поэтому с ростом мощности электронного пучка тепловой баланс между выделяемой и отводимой энергией устанавливается при все более высокой температуре. Повышение её стимулирует ряд термических процессов: **структурные фазовые переходы, отжиг дефектов, диффузию, рекристаллизацию, плавление, десорбцию и испарение атомов с поверхности, термоэлектронную эмиссию и др.**
2. **Особенность электронно-лучевого нагрева:** можно достичь очень высокой концентрации тепловой энергии при сравнительно малой общей мощности пучка. Кроме того, при удельных энергиях первичного пучка более 10^6 Вт/см² возрастают механические силы, действующие на облучаемый участки, обусловленные давлением самого электронного пучка, а также реактивным давлением («давлением отдачи») испаряющихся с поверхности частиц. В результате может наблюдаться аномально глубокое («кинжальное») проплавление вещества и даже образование сквозных отверстий в месте попадания пучка.
3. Явление выделения теплоты при электронной бомбардировке лежит в основе таких широко распространённых электронно-лучевых термических технологических процессов, как отжиг, очистка, испарение, плавка, литье, сварка и размерная обработка.
4. Если нагрев электронным лучом нежелателен, то необходимо снижать мощность пучка, либо принимать специальные меры для улучшения теплоотвода от облучаемых узлов и приборов.

- Пространственно-временное распределение вблизи поверхности, облучаемой пучком заряженных частиц описывается уравнением в частных производных второго порядка:

$$C_p(x) \rho(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \lambda(x) \frac{\partial T(x,t)}{\partial x} + W(x,t), \text{ здесь } 0 < x < x_{\text{кон}}$$

Начальные и граничные условия:

$$T(x,0) = T_0; \quad \frac{\partial T(0,t)}{\partial x} = \frac{\partial T(x_{\text{кон}},t)}{\partial x} = 0.$$

Дополнительное условие на границе раздела фаз:

$$\lambda \frac{\partial T(z_m - 0, t)}{\partial x} - \lambda \frac{\partial T(z_m + 0, t)}{\partial x} = q_m \rho \frac{\partial z_m}{\partial t}.$$

Здесь Z_m – положение границы раздела фаз;

q_m – удельная теплота плавления

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

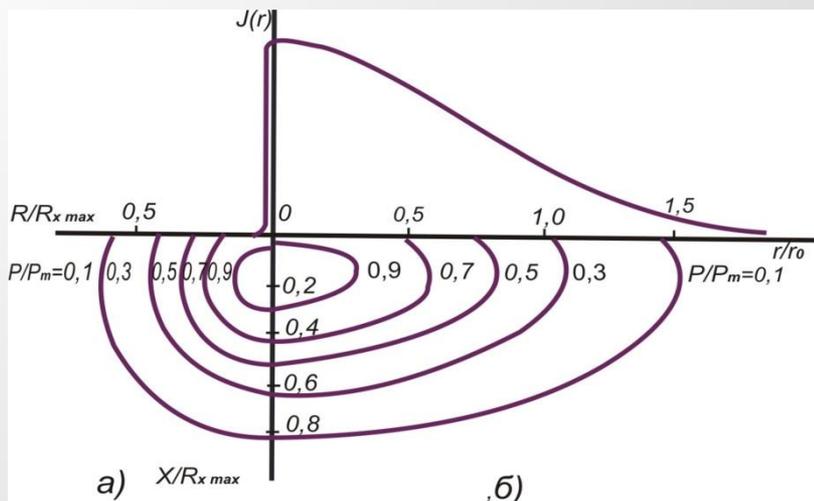
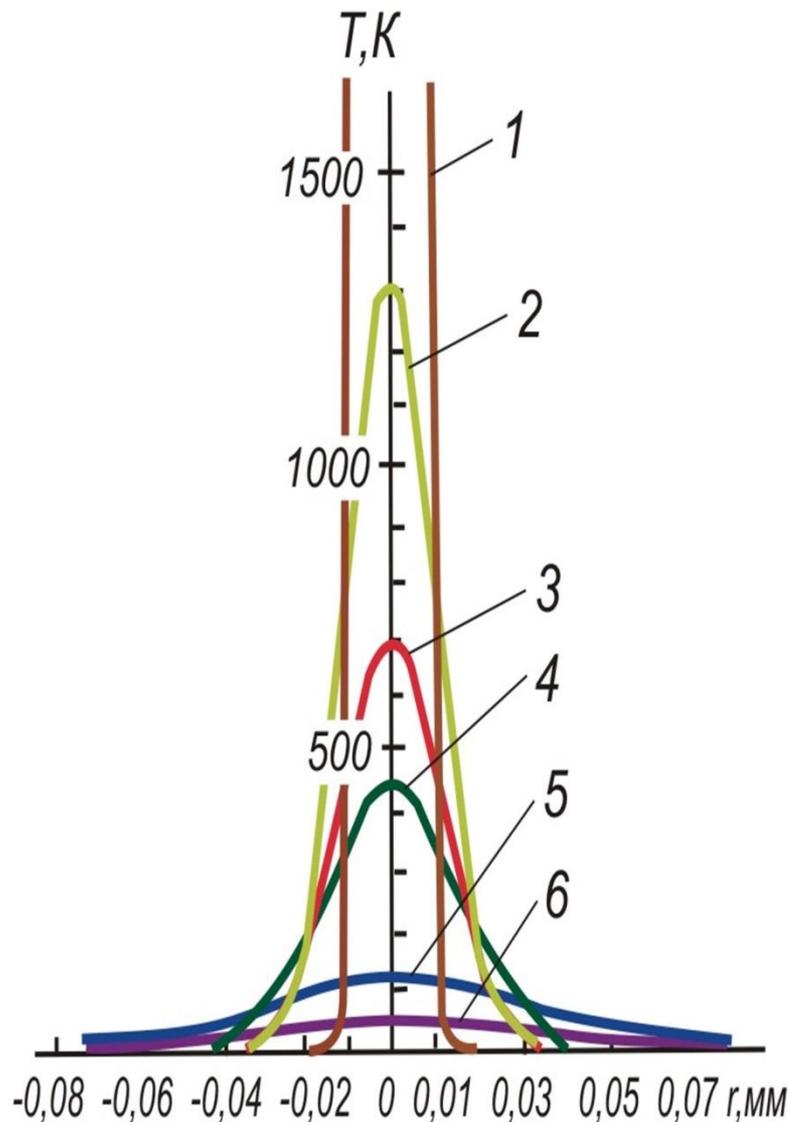


Рис. 1. Пространственное распределение относительной плотности поглощаемой энергии (мощности) для железа при $E= 20$ и 100 кэВ.

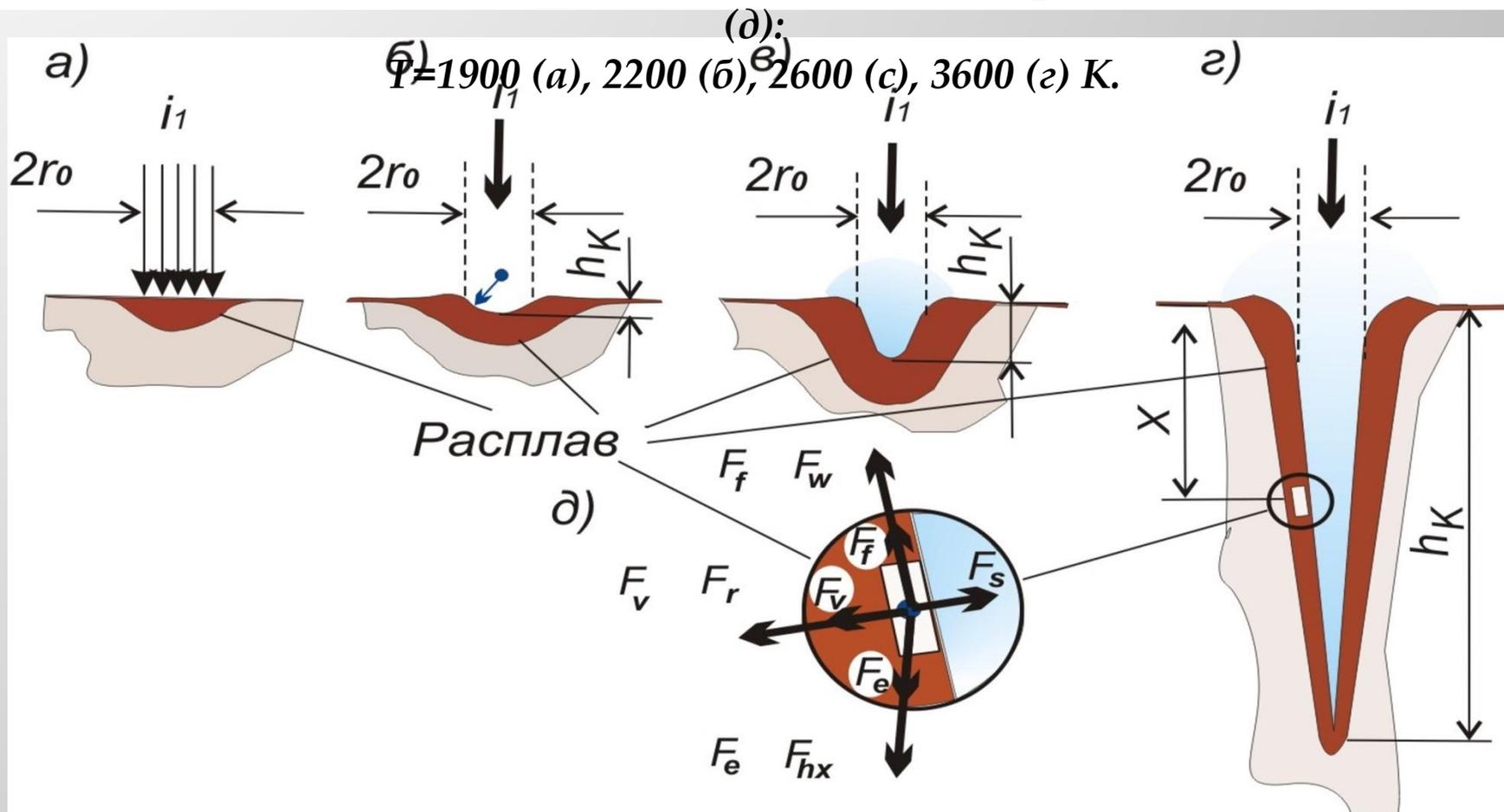
Рис. 2. Распределение температуры в бесконечно протяжённом железном образце после мгновенного воздействия пучка диаметром $0,02$ мм с энергией $0,001$ Дж через 1 (1), 10 (2), 15 (3), 20 (4), 50 (5), 100 мкс (6).



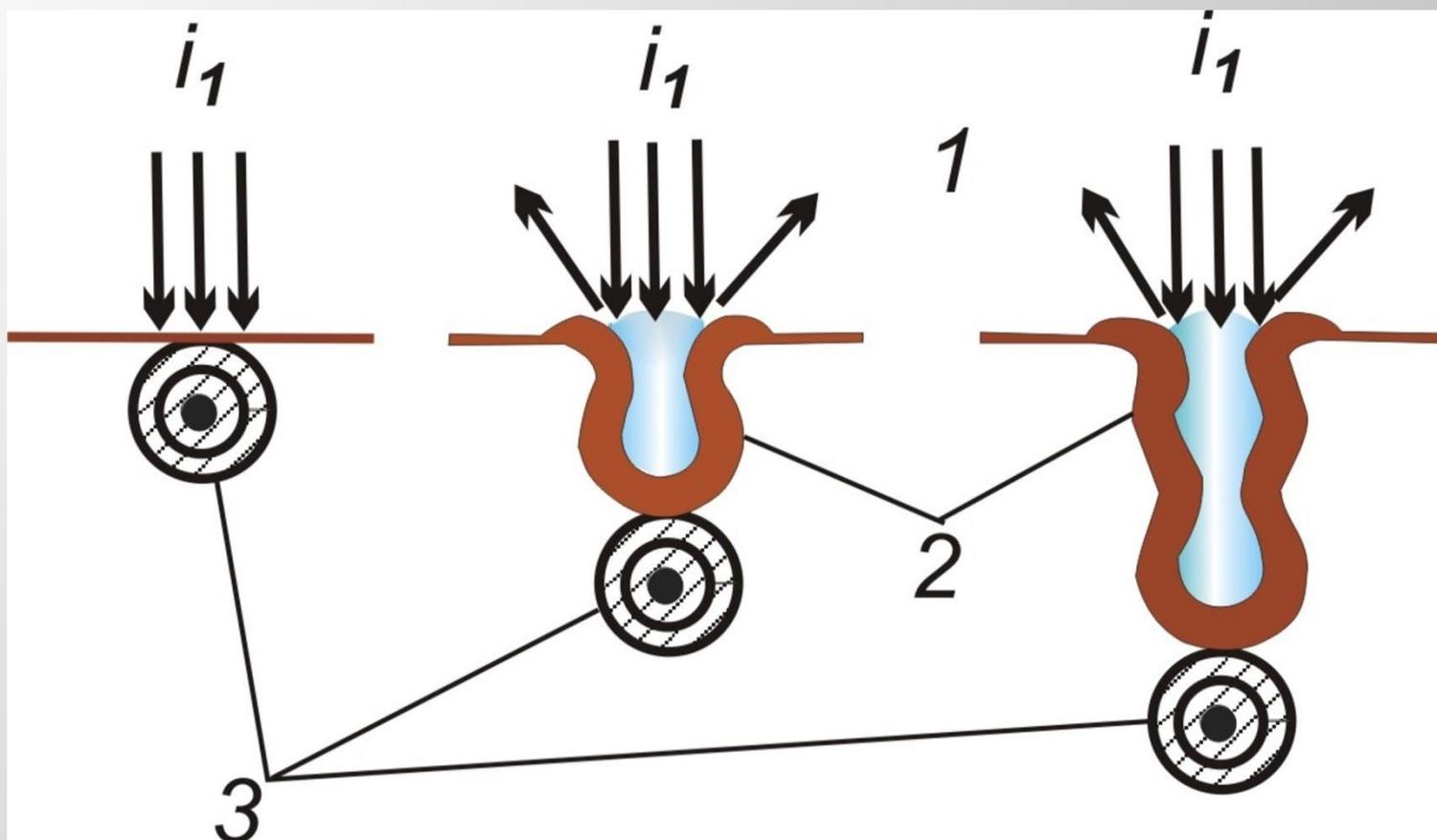
Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Образование парового капилляра при повышении мощности первичного пучка

в стали (а-г) и силы, действующие на элемент поверхности жидкой стенки



Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков



Механизм образования парового капилляра для вещества с малой плотностью и при относительно большой энергии электронов: 1 – пар, 2 – расплав, 3 – область максимума энерговыведения.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Кинжальное проплавление

При высокой плотности тока ($P \sim 10^6$ Вт/см² или более) надо учитывать передачу импульса пучка облучаемой мишени, которая в это время может быть в жидкофазном состоянии.

1. Максимальная глубина проникновения электронов зависит от продолжительности облучения и мощности пучка.
2. Плотность вещества в зоне обработки меньше, чем вне её. Она имеет не сферическую, а вытянутую («кинжальную») форму.
3. Баланс сил. Давление тормозящегося электронного пучка ($P_{\text{эп}}$). Давление, обусловленное импульсом отдачи разлетающихся паров ($P_{\text{п}}$). Давление сил поверхностного натяжения ($P_{\text{н}}$). Гидростатическое давление столба расплава, вытесненного пучком ($P_{\text{г}}$).

Полное давление равно сумме $P = P_{\text{эп}} + P_{\text{эп}}$.

$P_{\text{эп}} =$

Электронные технологии обработки материалов

Электронно- лучевая плавка

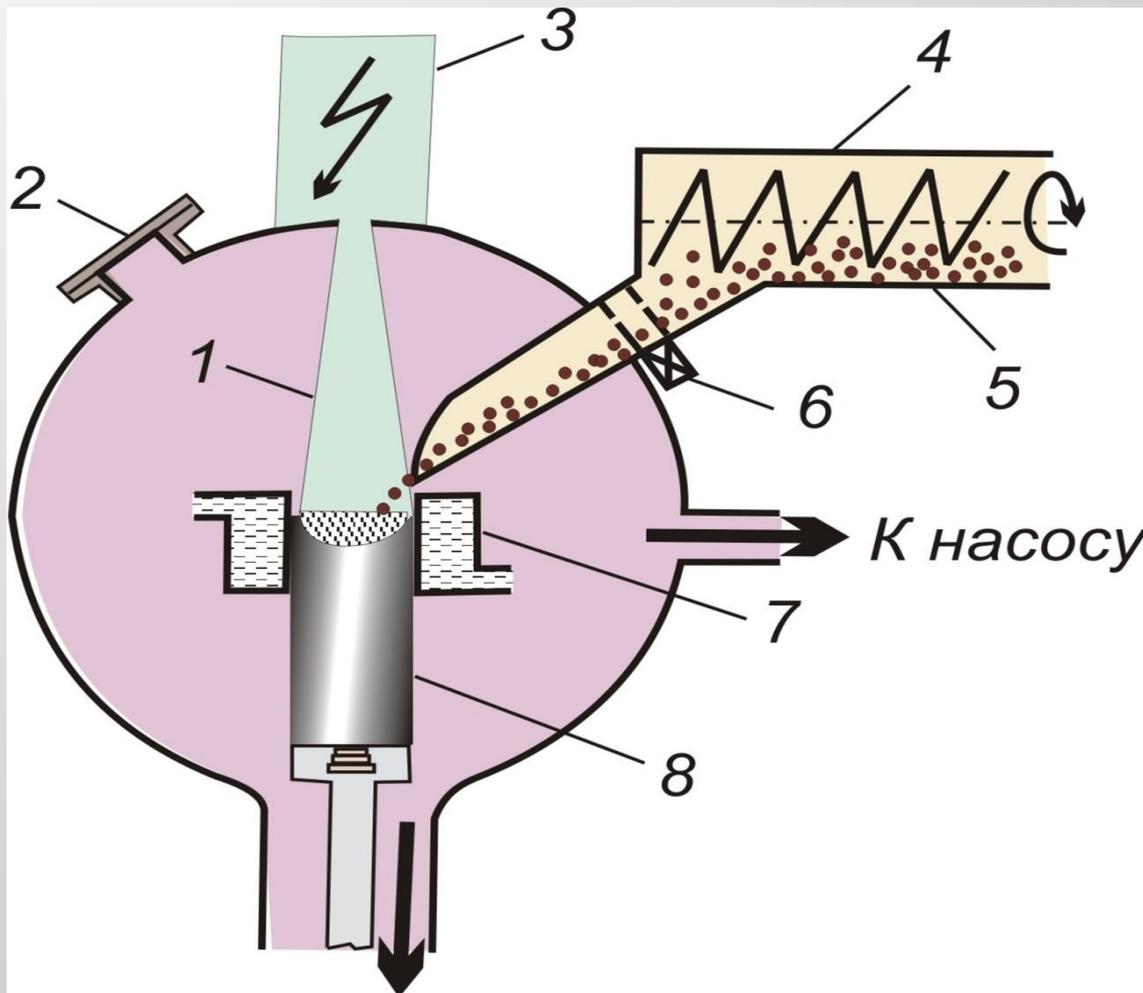
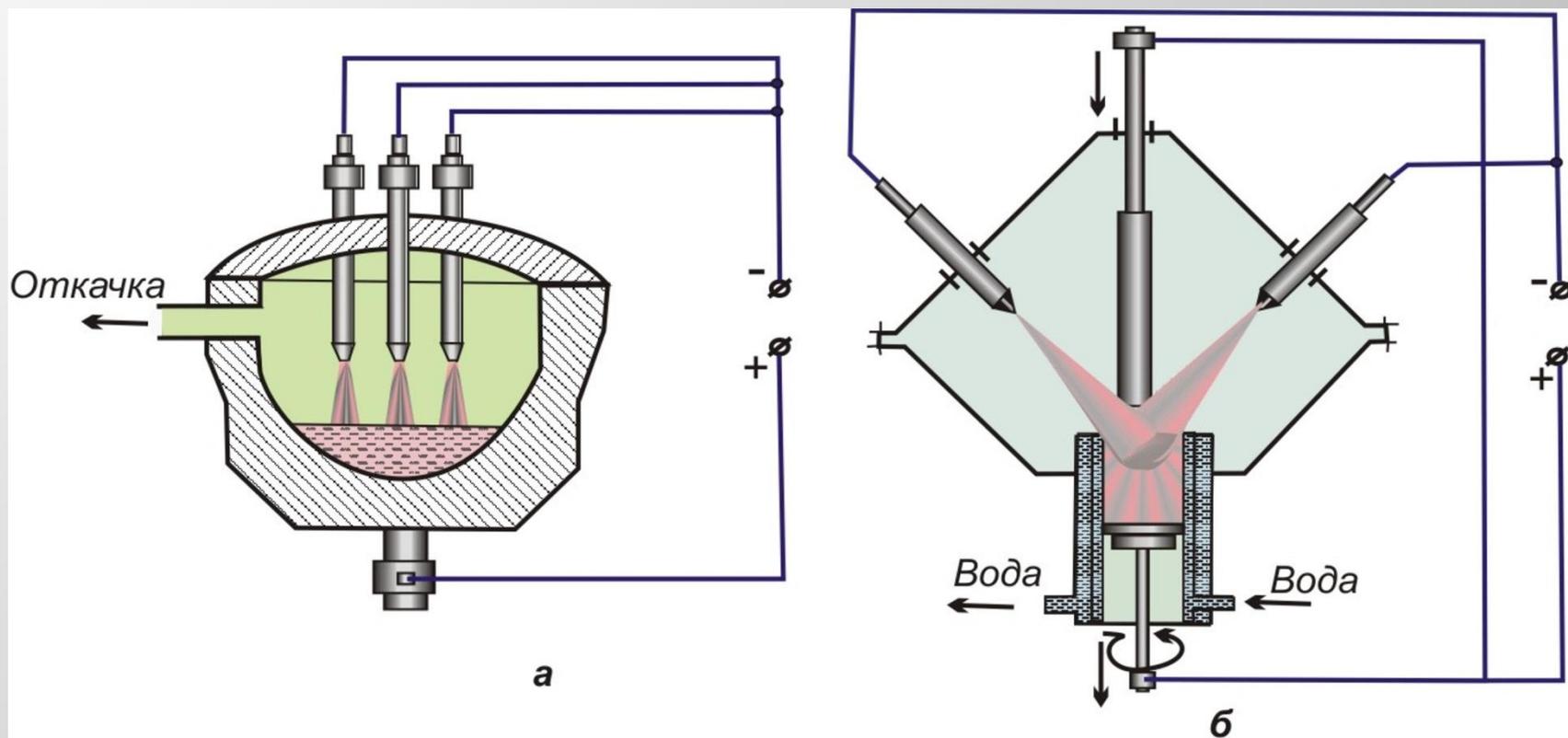


Схема электронно-лучевой плавки:

- 1 - пучок электронов;
- 2 - окно;
- 3 - электронная пушка;
- 4 - шнек;
- 5 - шихта;
- 6 - затвор;
- 7 - кристаллизатор;
- 8 - слиток.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

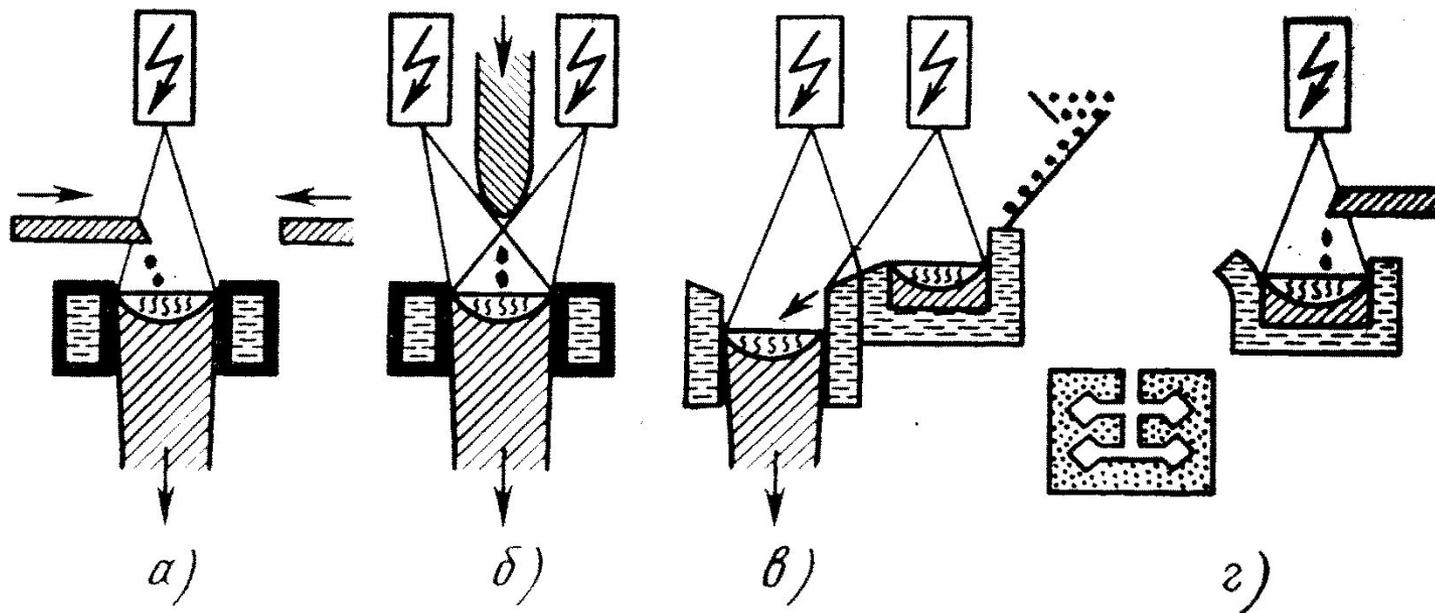


Электронно-лучевой переплав:

а - в вакуумной печи

б - при выращивании слитка путем наплавки

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков



- Схема электронно-лучевого переплава и литья: *а* - горизонтальная подача, *б* - вертикальная подача, *в* - промежуточный литейный тигель, периодическая разливка в формы.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Электронно-лучевое испарение

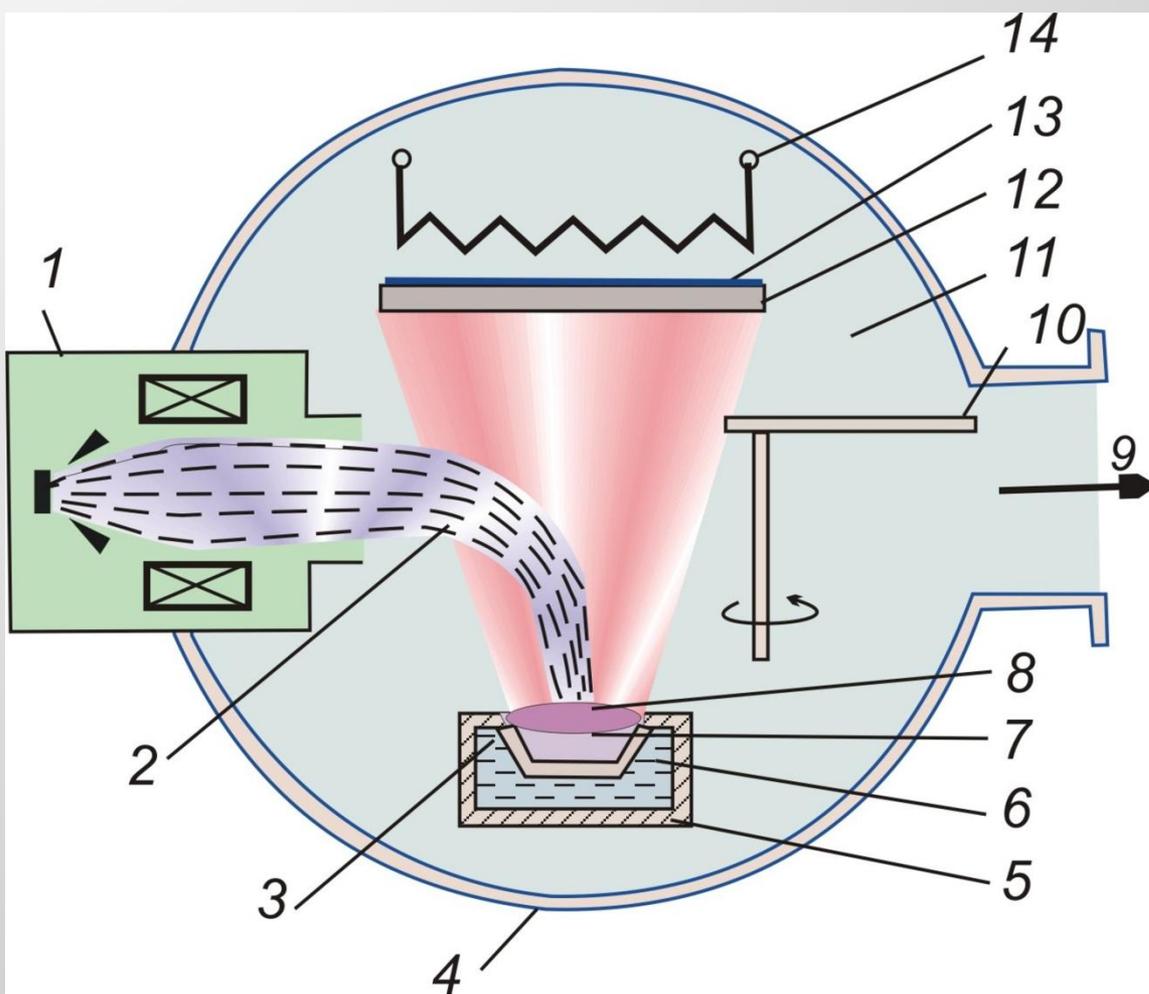
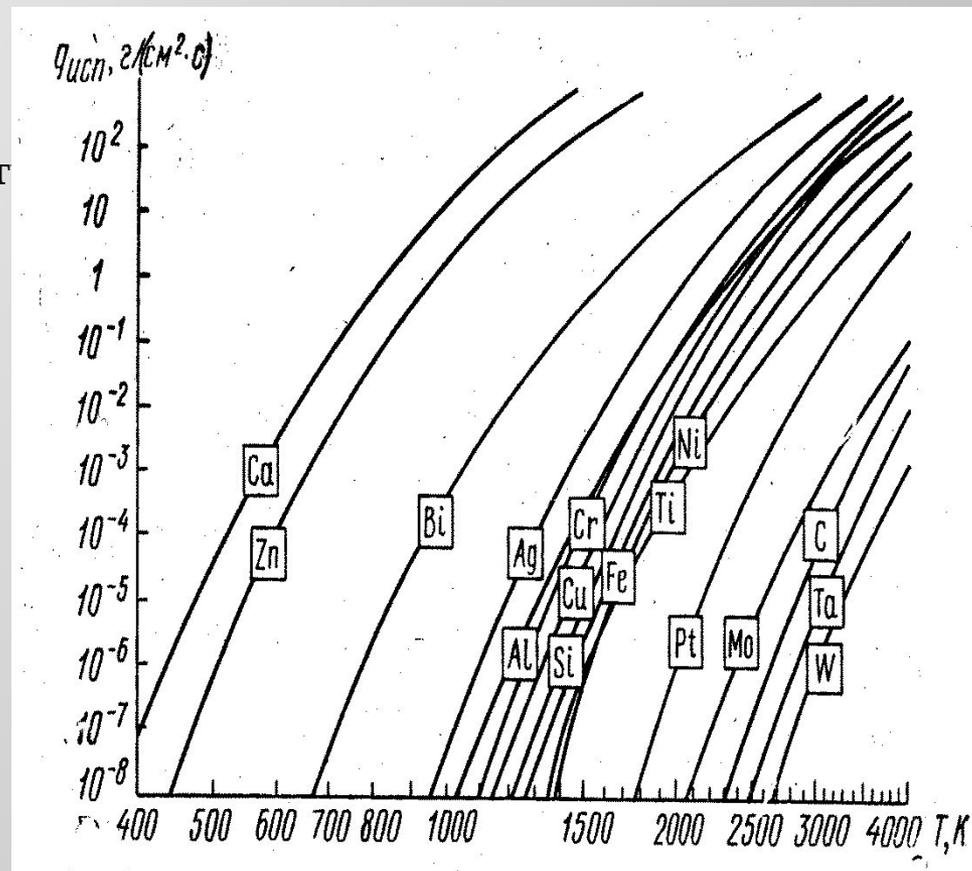
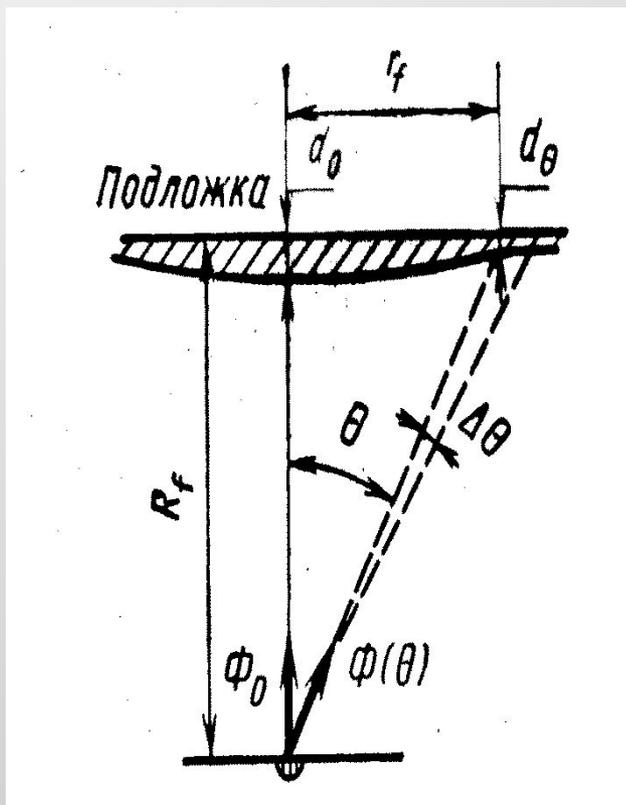


Схема электронно-лучевого испарения:

- 1 – электронная пушка;
- 2 – электронный пучок;
- 3 – охлаждающая жидкость;
- 4 – корпус вакуумной камеры;
- 5 – тигель;
- 6 – ванна;
- 7 – нижний уровень расплава;
- 8 – поверхность испарения;
- 9 – откачка;
- 10 – заслонка;
- 11 – объём вакуумной камеры;
- 12 – покрытие;
- 13 – подложка;
- 14 – нагреватель.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

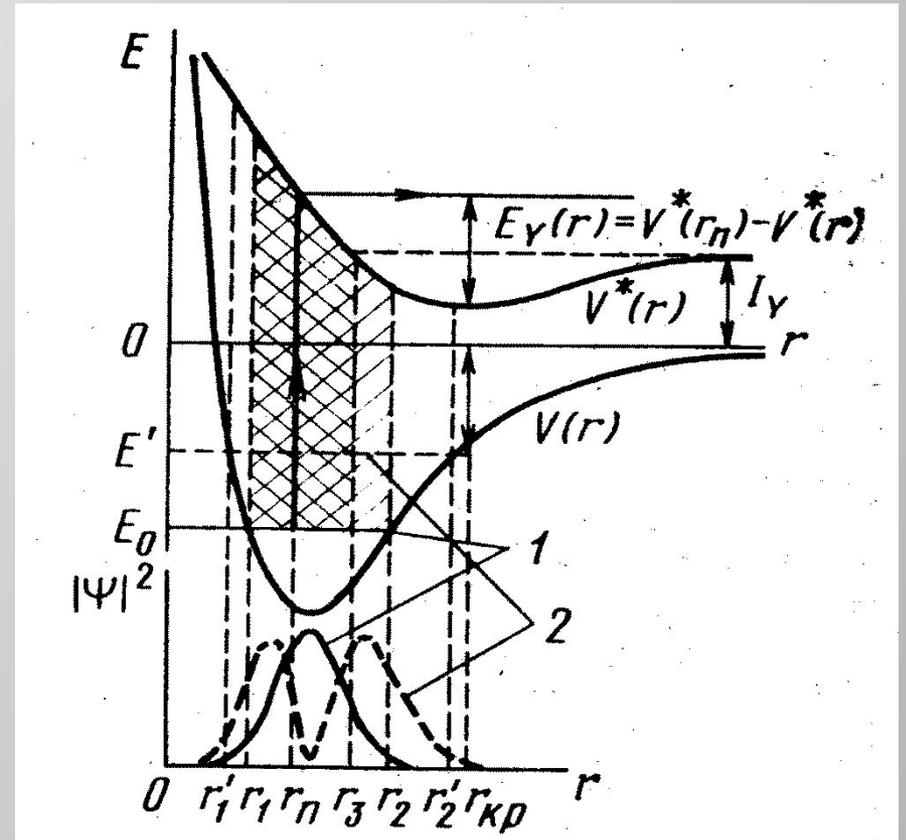
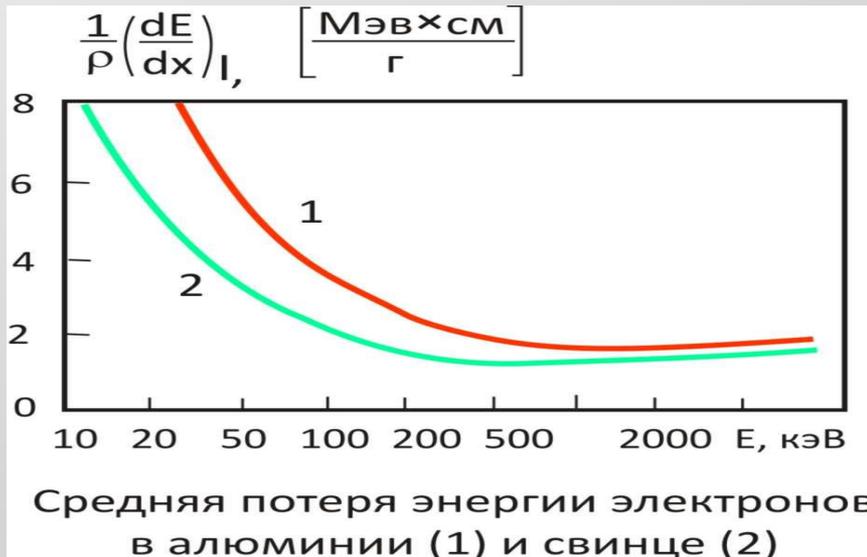
Осаждение покрытия с учётом
углового распределения плотност
потока пара.



Зависимость скорости испарения
различных материалов от
температуры.

Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Нетермические методы электронно-лучевой обработки материалов



Тема 2. Обработка материалов и изделий с помощью электронных пучков

Нетермические методы электронно-лучевой обработки материалов