

Электроннолучевая сварка

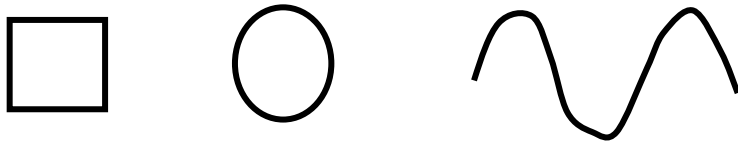
ЭЛС позволяет:

- соединять за один проход металлы и сплавы толщиной от 0,1 до 400 мм;
- обеспечивать малый объем литого металла;
- глубокое и узкое проплавление т.н. «Кинжальное»;
- большая скорость сварки;
- мелко-зернистая структура металла шва;
- наличие вакуумной защиты;
- сваривать тугоплавкие и химически активные металлы и сплавы;
- расстояние от пушки до свариваемой поверхности может изменяться от 50 до 500 мм, обеспечивая возможность сварки в трудно доступных местах;
- кратковременность теплового воздействия;
- незначительные термические деформации соединяемых деталей и конструкции в целом (во многих случаях не превышают допусков на механическую обработку)
- как правило после ЭЛС термическая обработка не требуется;
- использование импульсного режима позволяет за счет изменения частоты и продолжительности импульсов регулируется тепловложение.

Электроннолучевая сварка

Особенности ЭЛС:

Отклонение электронного пучка в магнитном и электростатическом поле происходит практически безинерционно. Это дает возможность перемещать пучок по поверхности свариваемых деталей по различным траекториям. При этом многие сварочные задачи могут решаться без перемещения изделия или сварочного инструмента – электронной пушки.



Электроннолучевая сварка

Основные причины, существенно сдерживающие расширение промышленного применения ЭЛС:

- высокая стоимость оборудования;
- сложность оборудования по сравнению с обычным;
- необходимость в квалифицированном персонале;
- консерватизм проектантов и технологов, ориентирующихся на традиционные технологии.

Электроннолучевая сварка

Таким образом, ЭЛС остается специальным технологическим процессом и применяется прежде всего там, где невозможно использование традиционных способов, а также в серийном и массовом производстве.

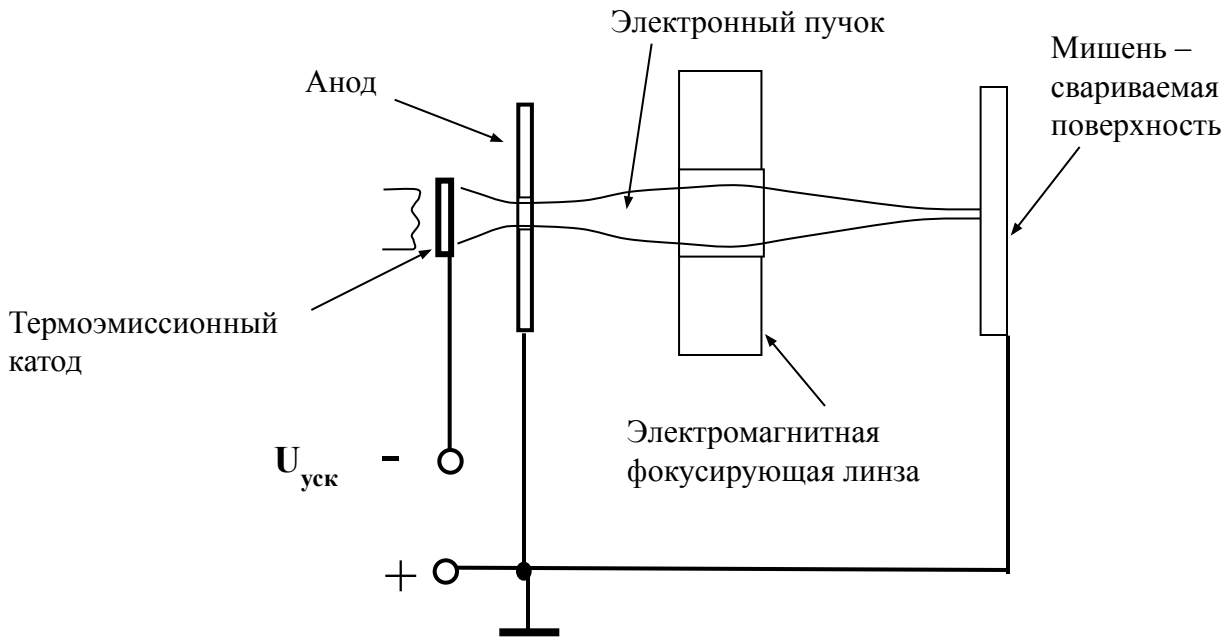
При переходе на ЭЛС **необходимым** является определение ТЭО, где нужно учитывать:

- стоимость оборудования;
- экономии сварочных материалов;
- культуру производства;
- качество сварного соединения;
- высокая работоспособность, надежность и долговечность.

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Формирование электронного пучка

- Электронный пучок - направленный поток электронов, переносящий энергию, приобретенную при ускорении в электрическом поле



Специальные способы сварки

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Сущность электронно-лучевого нагрева состоит в следующем
Кинетическая энергия, пропорциональная скорости электронов в пучке, передается мишени:

$$W_e = \frac{mv^2}{2} = eU$$

m – масса электрона $9,1091 \times 10^{-31} \text{ кг}$
 e – заряд электрона $1,6021 \times 10^{-19} \text{ К}$

Ускоренный и сфокусированный поток электронов бомбардирует поверхность мишени. Скорость электронов в момент столкновения с мишенью:

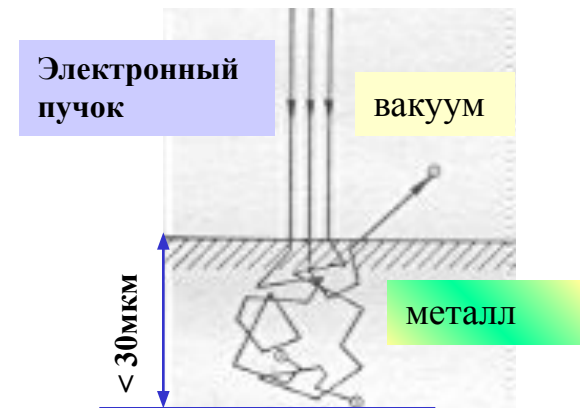
$$v = \sqrt{\left(\frac{2e}{m}\right)U_{\text{уск}}}$$

e/m – удельный заряд электрона $1,758796 \times 10^{-11} \text{ К/кг}$

В результате торможения, кинетическая энергия превращается в тепло, которого достаточно для плавления и испарения материала мишени.

Выделение энергии происходит в слое некоторой толщины. Эта величина зависит от длины пробега электрона в материале, т.е. расстояние от поверхности до точки, где электрон приобретает среднюю тепловую скорость свободных электронов данного материала и описывается уравнением Шонланда:

$$\delta_{\text{э}} = 2,1 \times 10^{-15} \frac{U_{\text{уск}}^2}{\rho}$$

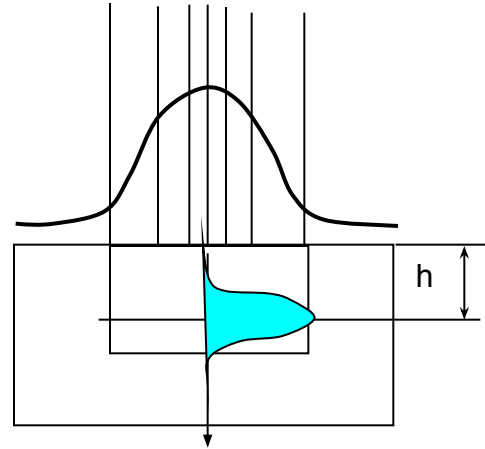


| Материал | Ускоряющее напряжение, кВ | Глубина пробега электрона, мкм |
|----------|---------------------------|--------------------------------|
| титан | 30 | 5 |
| сталь | 10 | 0,27 |

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Распределение электронов в пучке близко к распределению по закону Гаусса

$$j = j_m \exp\left(-\frac{r^2}{r_e^2}\right)$$



r – текущее значение радиуса пучка

r_e – эффективный радиус пучка

j_m – максимальное значение плотности

Распределение энергии по глубине пробега имеет максимум (максимальное выделение энергии):

□ на глубине $h = 0,7\delta_{\text{э}}$

□ ширина максимального выделения энергии: $v = 0,25h$

Специальные способы сварки

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Образование глубокого проплавления при электроннолучевой сварке

С увеличением q^2 неизбежно должна возникнуть ситуация, когда скорость вводимой энергии становится равно или больше скорости отвода энергии (тепла).

На глубине h будет происходить испарение металла, в результате жидкая фаза будет выброшена, образуется отверстие глубиной $\approx h$.

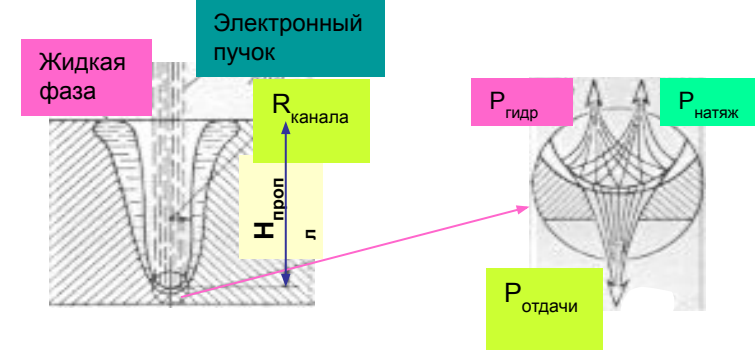
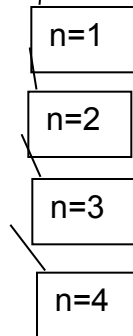
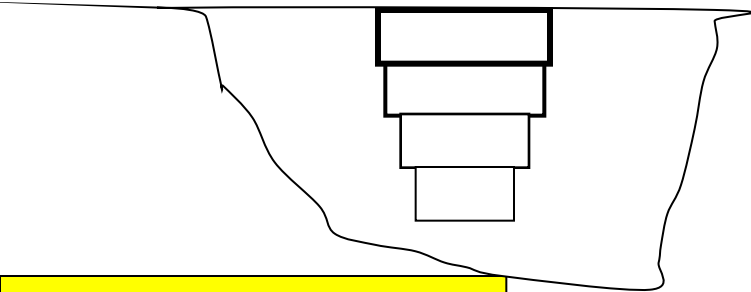
Процесс образования канала проплавления является прерывистым – периодически испаряется слой толщиной $\approx \delta_{\text{э}}$, а в промежутках электронный пучок рассеивается на парах металла и стенках канала.

Время энергонакопления до взрывного выброса жидкой фазы

$$\tau_u \approx \frac{L_{\text{исп}} \rho \delta_{\text{э}}}{q_2}$$

при $q^2 > q^{2*}$

q^{2*} - критическая энергия ввода, при которой начинается испарение металла



Время рассеивания пара

$$\tau_p = \frac{\rho \delta_{\text{э}} d_n^2}{\rho^* V_p d_k^2}$$

ρ^* - критическая плотность пара, при которой ослабление удельной мощности на дне канала соответствует критической;

V_p - скорость разлета пара

- Торможение электронов сопровождается выделением тепловой энергии.
- Происходит нагрев, плавление и испарение металла.
- Давление отдачи парового потока вытесняет жидкий фазу, освобождая твердую поверхность металла.
- Процесс повторяется; в результате чего образуется канал проплавления.
- Глубина канала зависит от энергии и количества электронов пучке и его диаметра

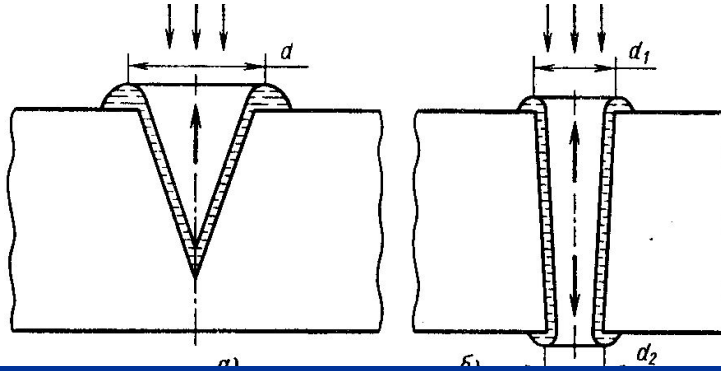
Специальные способы сварки

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Образование глубокого проплавления при электроннолучевой сварке

Для сквозного проплавления

$$d_K^2 = d_1^2 + d_2^2$$

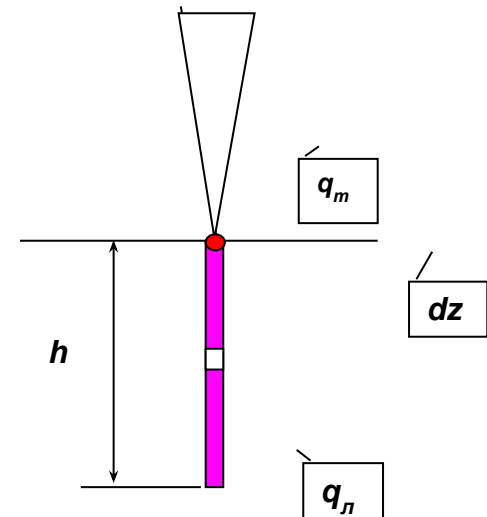


Продолжительность процесса образования канала проплавления есть

суммарная продолжительность элементарных циклов: $t = n(\tau_u + \tau_p)$

В общем балансе времени на процесс «чистого» испарения уходит только 5 – 10%, остальное время занимает рассеивание.

С точки зрения тепловых процессов модель глубокого проплавления можно считать результатом комбинации двух одновременно действующих источников тепла – точечного и линейного.



Специальные способы сварки

Образование глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке

Для условий сварки делаются допущения:

- источники тепла считаются сосредоточенными;
- теплофизические константы материала не изменяются в зависимости от температуры;
- перенос тепла осуществляется теплопроводностью.

С одной стороны электронный пучок выделяет свою энергию на поверхности материала и он может быть представлен как точечный источник с тепловой мощностью q_m .

При этом форма проплавления приближается к полусфере, как происходит при воздействии других видов источников тепла, например, сварочная дуга.

Распределение температур в полубесконечном теле от действия неподвижного точечного источника может быть представлено следующей зависимостью:

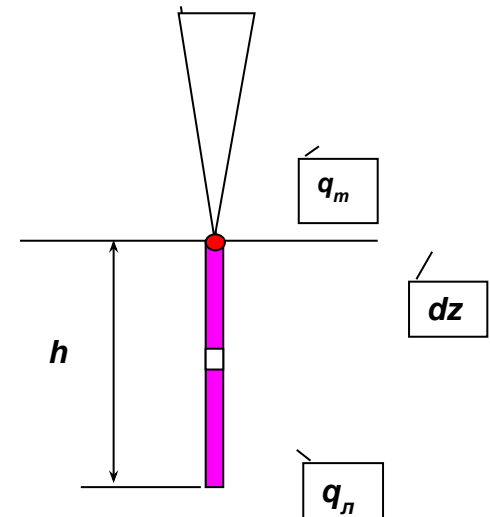
$$T_m = \frac{q_m}{2\pi\lambda R}$$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

R - координаты точки

При движении точечного источника со скоростью $V_{св}$ распределение температур будет определяться

$$T_m = \frac{q_m}{2\pi\lambda R} \exp\left[-\frac{V_{св}(x+R)}{2a}\right]$$



Специальные способы сварки

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Образование глубокого проплавления при электроннолучевой сварке

С другой стороны, при образовании глубокого проплавления электронный пучок может быть представлен как линейный источник тепла q_l . его можно рассматривать как совокупность мгновенных точечных источников

$$dq = q^2 / (h_{\text{проплава}} dZ)$$

dZ – приращение глубины действия линейного источника

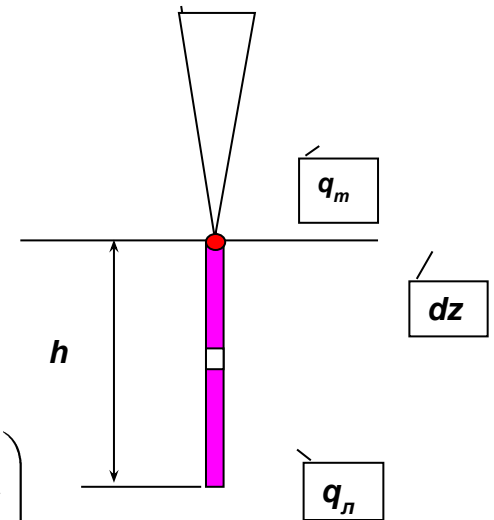
Для стационарного случая в упрощенном виде изменение температуры от воздействия линейного источника будет:

$$T_l = \int_0^{h_{np}} \frac{q_l}{2\pi\lambda R h_{np}} dZ$$

Для условий проплавления перемещающимся пучком:

$$T_l = \frac{q_l}{2\pi\lambda h_{np}} \exp\left(-\frac{V_{св} X}{2a}\right) K\left(\frac{V_{св} r}{2a}\right)$$

k и r – соответственно коэффициент сосредоточенности и радиус нормального кругового источника тепла.



Результат действия точечного и линейного источников можно представить:

$$T = T_m + T_l$$

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Тепловой баланс при электронно-лучевом нагреве:

$$Q = Q_{мп} + Q_{плав} + Q_{исп} + Q_{изл} + Q_u + Q_{рен} + Q_{2э} + Q_{тэ}$$

$Q_{мп}$ – отвод тепла за счет теплопроводности;

$Q_{плав}$ – расход тепловой энергии на плавление металла;

$Q_{исп}$ - расход тепловой энергии на испарение металла;

$Q_{изл}$ - расход тепловой энергии на световое и тепловое излучение;

Q_u - расход тепловой энергии на ионизацию остаточного газа и паров металла ;

$Q_{рен}$ - расход тепловой энергии на рентгеновское излучение;

$Q_{2э}$ - расход тепловой энергии на вторичное электронное излучение;

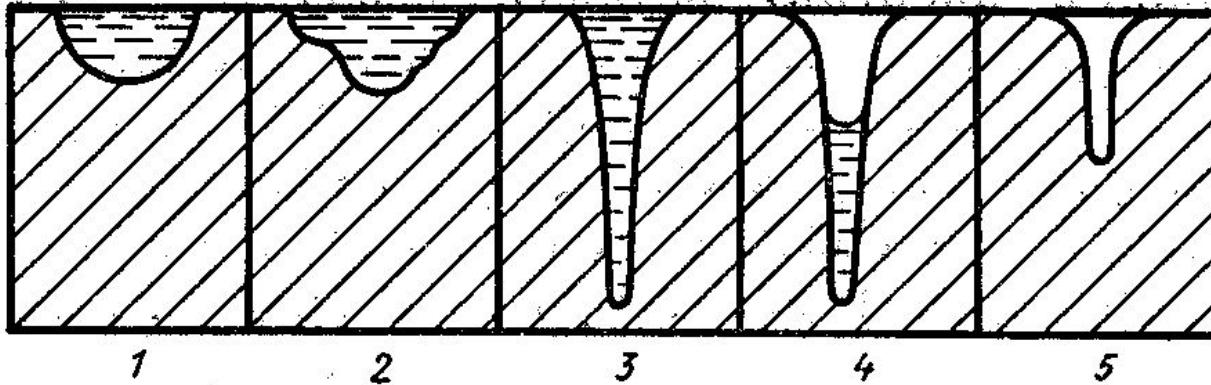
$Q_{тэ}$ - расход тепловой энергии на термоэлектронную эмиссию.

При удельной мощности пучка меньше 105 Вт/см^2 :

$$Q_{исп} = 5 - 10 \% ; Q_{плав} = 30 - 35 \%$$

Физические основы электронно-лучевого нагрева

Остальная мощность тратится на нагрев объема обрабатываемого материала. Повышение удельной мощности приводит к увеличению доли $Q_{исп}$ и $Q_{плав}$, а на поверхности появляется формирование расплава, форма которой меняется от полусферической к «кинжальной»



Удельная мощность при которой начинается «кинжальное» проплавление является критической, зависит от обрабатываемого материала и может быть оценена:

$$q_2' \approx \rho L_{исп} \sqrt{\frac{a}{\tau_{\varepsilon}}}$$

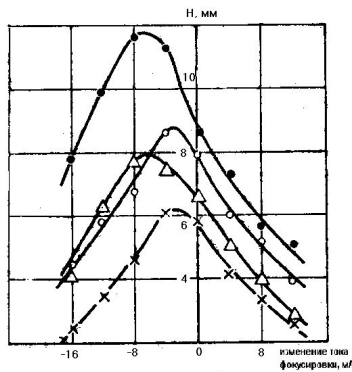
ρ - плотность материала, $кг/м^3$
 $L_{исп}$ - теплота испарения, $Дж/кг$
 a - коэффициент температуропроводности, $м^2/с$
 τ - продолжительность энергонакопления

ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОННОЛУЧЕВОЙ СВАРКИ И ГЕОМЕТРИЯ ЗОНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ

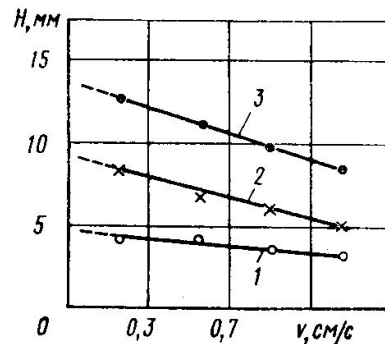
Основные параметры процесса ЭЛС

- ускоряющее напряжение, кВ;
- ток электронного пучка, мА;
- скорость сварки, м/ч;
- положение электронного пучка (ток фокусировки);
- модуляция электронного пучка (импульсный режим, развертка пучка и др.)

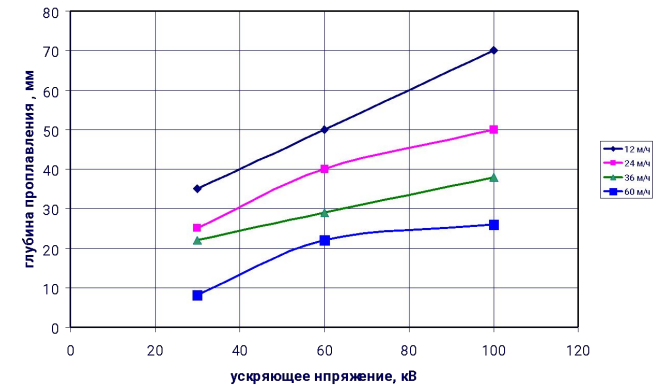
Влияние степени фокусировки на глубину проплавления



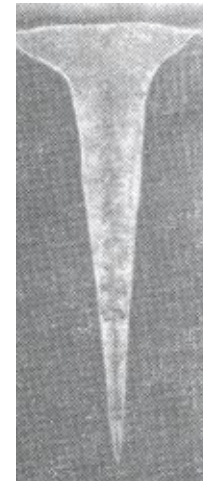
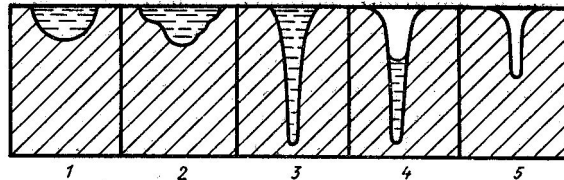
Влияние скорости сварки на глубину проплавления



Влияние ускоряющего напряжения на глубину проплавления

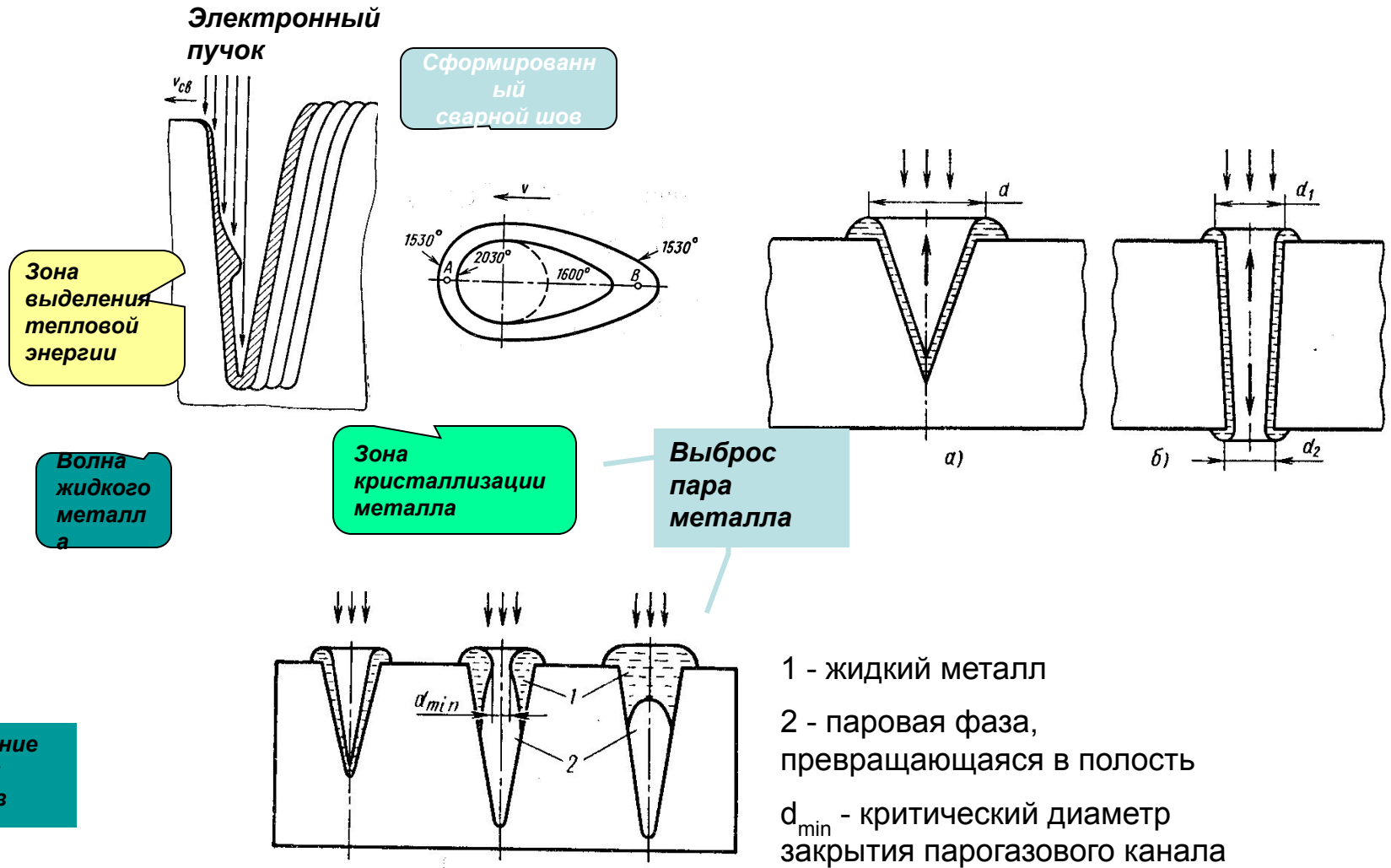


ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА С МАТЕРИАЛОМ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ



При постоянной энергии электронного пучка глубина и ширина проплавления может меняться в широких пределах

ГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СВАРНОГО ШВА



ЭЛЕКТРОННЫЙ ПУЧОК – ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ИСТОЧНИК НАГРЕВА

- Электронный пучок - направленный поток электронов, переносящий энергию, приобретенную при ускорении в электрическом поле.
- Кинетическая энергия, пропорциональная скорости электронов в пучке, передается мишени:

$$W_e = mv^2 / 2 = eU$$

- Мощность электронного пучка:

$$q_p = I_p U_{\text{уск}}$$

- Удельная мощность в пучке:

$$q_2 = q_p / S_p = I_p U_{\text{уск}} / \pi r^2$$

- Скорость электронов в момент столкновения с мишенью:

$$v = \sqrt{(2e / m) U_{\text{уск}}}$$

