



ТЕОРІЯ ПРОЦЕСІВ ЗВАРЮВАННЯ

(Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» // В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. Шк., 1988. – 559 с.)

Автор: д. т. н. Лузан С.О.

Лекция 11. Нагрев и плавление присадочного металла

**(тема «Нагрев и плавление металла при
сварке»)**

План лекции

1. Нагрев присадочного металла

2. Первая схема нагрева

3. Вторая схема нагрева

4. Плавление электрода

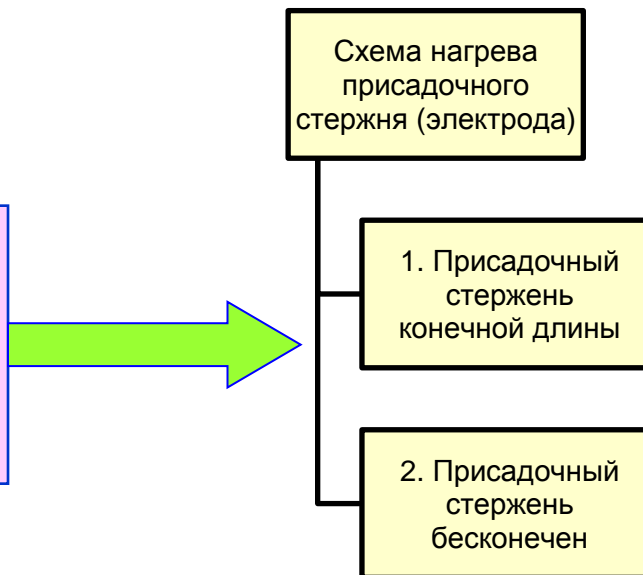
1. Нагрев присадочного металла

Термические циклы в присадочном металле не имеют самостоятельного значения, так как в конечном итоге присадочный металл подвергается переплавке. Изучение нагрева присадочного металла и распределения температур позволяет оценить условия, в которых происходит его плавление. Для электродов, содержащих в своем составе покрытие, исследование процесса нагрева важно для определения возможной потери прочности и разрушения покрытия вследствие его подплавления.



1. Нагрев присадочного металла

Все случаи нагрева присадочного металла (электрода) можно разделить на две схемы:



При 1 варианте место токоподвода относительно электрода не перемещается,
При 2 варианте электрод перемещается относительно места токоподвода.



1. Нагрев присадочного металла

К первой схеме нагрева относятся ручная дуговая сварка плавящимся электродом, электрошлаковая сварка пластинами, электрошлаковый переплав, электрошлаковая сварка плавящимся мундштуком, ручная газовая сварка с присадкой, сварка неплавящимся электродом.

Ко второй схеме нагрева относятся автоматическая и полуавтоматическая сварка плавящимся электродом (под флюсом, в среде защитных газов), электрошлаковая сварка проволоками, электрошлаковая сварка плавящимся мундштуком, сварка неплавящимся электродом с подачей присадочной проволоки в зону дуги.



2. Первая схема нагрева

В общем случае (рис. а) электрод конечной длины имеет в точке А токоподвод.

В частных случаях по электроду ток может не протекать (газовая сварка) или электрод может не плавиться (вольфрамовый, угольный электроды).

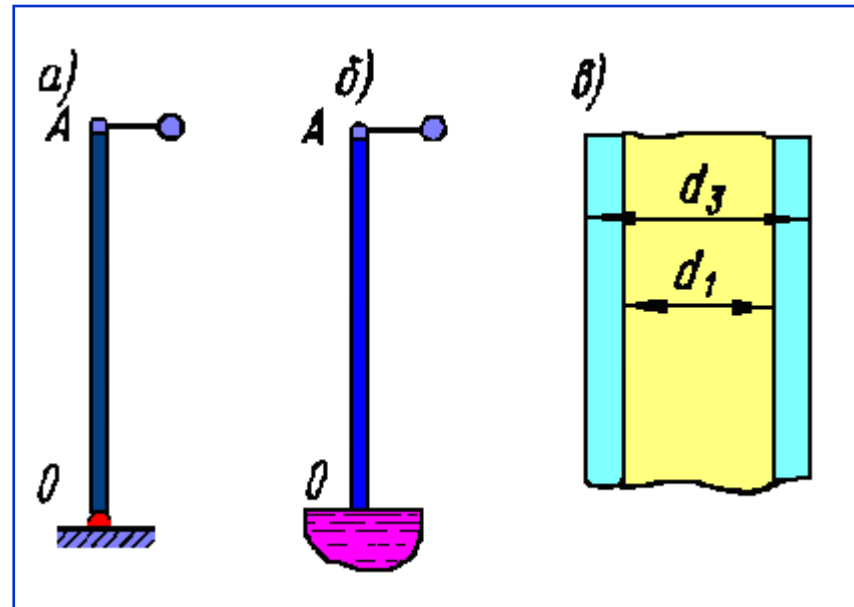


Рис. 1 - Схемы нагрева электрода

- а** – нагрев при ручной сварке;
- б** – нагрев при электрошлаковой сварке пластинами;
- в** – сечение вдоль оси электрода с покрытием



2. Первая схема нагрева

Рассмотрим отдельно нагрев электрода от протекающего тока и от источника теплоты, действующего в точке O на конце электрода.

Уравнение теплового баланса нагрева стержня проходящим током для единицы длины стержня имеет следующий вид:

$$dQ = dQ_j - dQ_\alpha \quad (1)$$

dQ_j -

количество теплоты, выделяемой током плотностью j в стержне с удельным сопротивлением ρ_r и сечением F

dQ_α -

количество теплоты отдаваемой с поверхности стержня периметром p в окружающее пространство с температурой T_c



2. Первая схема нагрева

Левая часть уравнения представляет собой накопление теплоты в электроде сечением F , в единицу времени.

$$dQ = c\rho F_3 dT_\tau / dt. \quad (2)$$

Первый член правой части (1) выражает количество теплоты, выделяемой током плотностью j в стержне с удельным сопротивлением ρ_r и сечением F :

$$dQ_1 = \rho_r j^2 F. \quad (3)$$

Второй член правой части (1) представляет собой количество теплоты отдаваемой с поверхности стержня периметром p в окружающее пространство с температурой T_c :

$$dQ_a = \alpha(T_\tau - T_c)p, \quad (4)$$

где $T_\tau = T_n + \Delta T_\tau$;
 T_n — начальная температура стержня; ΔT_τ — приращение температуры в стержне от нагрева током.



2. Первая схема нагрева

Решение дифференциального уравнения (1) при подстановке в него формул (2)-(4), если принять коэффициенты c_p , ρ_r и α не зависящими от температуры, может оказаться неточным при изменении температуры в широких пределах. Эти коэффициенты следует считать зависящими от температуры, а решение уравнения (1) проводить численными методами на ЭВМ. Значение c_p в формуле (2) выражает среднюю теплоемкость металлического стержня и покрытия в расчете на общее поперечное сечение электрода $F_3 = \pi d_3^2 / 4$ (рис. 1, в).



2. Первая схема нагрева

Удельное сопротивление ρ_r металлов возрастает с температурой (рис. 2), причем существенно зависит от марки стали. Значение соответствует площади $\pi d^2/4$ (рис. 1).

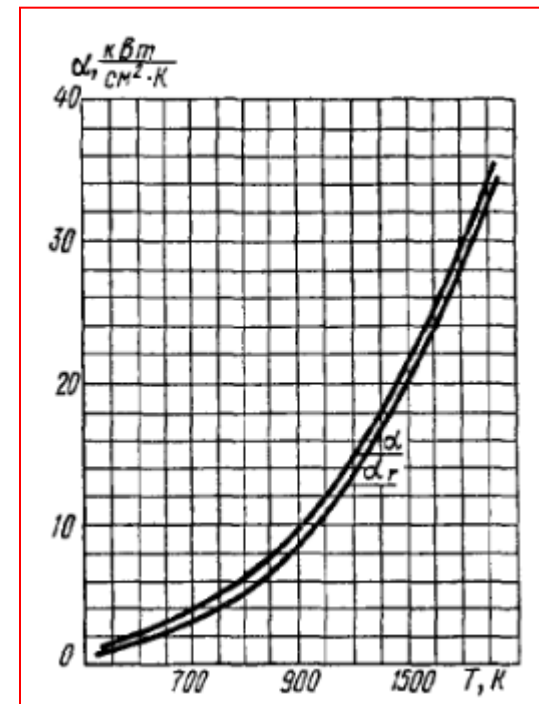


Рис. 2

Для тонких стержней, к которым относятся сварочные электроды, роль теплоотдачи довольно велика. Коэффициент α в выражении (4) следует принимать зависящим от температуры, например, как показано на рис. 2. Периметр стержня измеряют по наружному диаметру обмазки (см. рис. 1, в): $\rho = \pi d \rho_r$.



2. Первая схема нагрева

Вычисления и экспериментальные данные показывают, что скорость нагрева электрода существенно зависит от удельного сопротивления материала стержня. Стержни из аустенитной стали при температурах до 900 К имеют значительно большее ρ_r , чем из низкоуглеродистой (рис. 3)

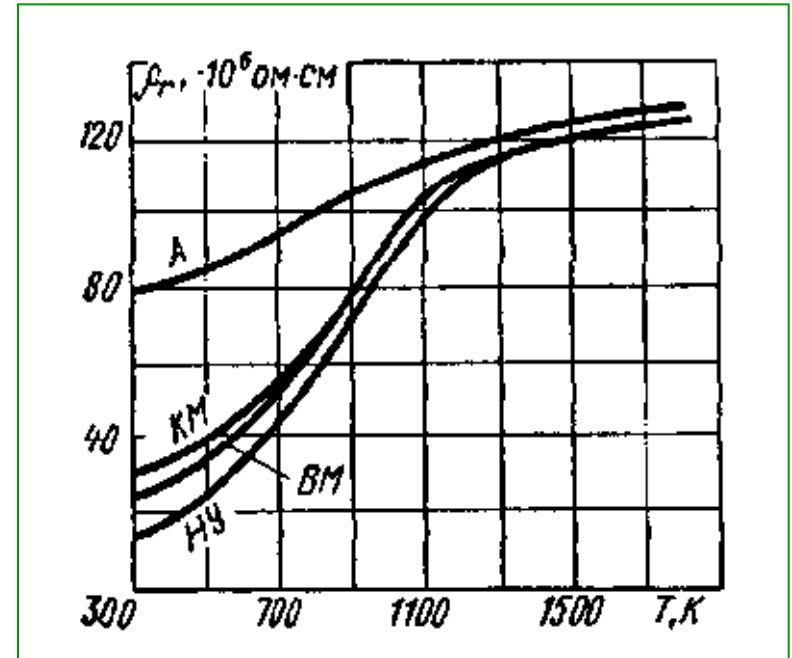


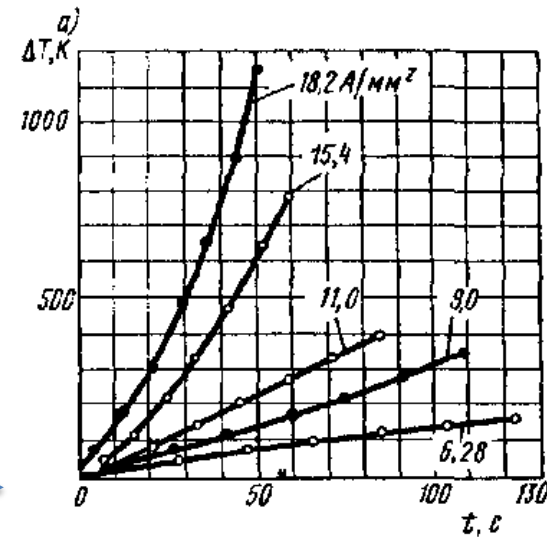
Рис. 3 – Зависимость удельного сопротивления стали (НУ – низкоуглеродистая; ВМ – высокомарганцовистая; КМ; кремнемарганцовистая; А - аустенитная) от температуры



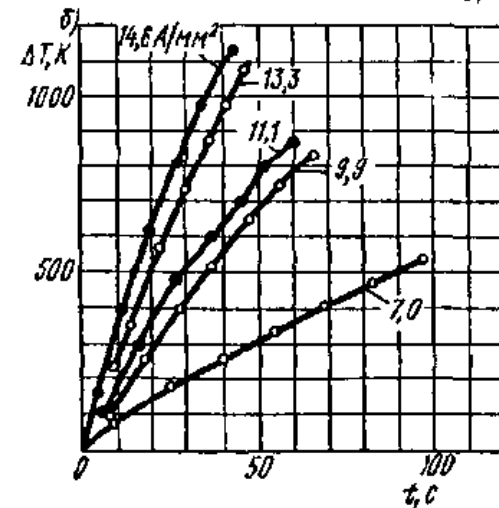
2. Первая схема нагрева

12

Поэтому стержни из аустенитной стали нагреваются значительно быстрее (рис. 4, б), чем из низкоуглеродистой (рис. 4, а), однако темп роста температуры при повышенных ее значениях в первых замедляется, так как ρ , возрастает медленнее, чем теплоотдача в воздух.



а



б

Рис. 4 – Нагрев электрода с покрытием:
а – материал стержня проволоки $\varnothing 6$ из низкоуглеродистой стали (0,15% С); б – проволока из аустенитной хромоникелевой стали (25% Cr, 12% Ni)



2. Первая схема нагрева

13

Помимо нагрева проходящим током электрод нагревается источником теплоты в точке O (рис. 1). Если электрод плавящийся, то температура на конце электрода равна температуре капель T_k . Источник в точке O можно рассматривать как движущийся со скоростью плавления электрода ω .

Используя уравнение предельного состояния процесса распространения теплоты от движущегося плоского источника теплоты в стержне в области впереди источника (6.34)

$$\rho_2 = \frac{vr}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{v^2}} \quad \tau_2 = \frac{v^2 t_n}{4a} \left(1 + \frac{4ba}{v^2} \right) \quad (5)$$

При $b=0$, получаем распределение температур в стержне от нагрева источником теплоты в точке O :

$$T - T_n - \Delta T_T = (T_k - T_n - \Delta T_T) e^{-\omega x / a} \quad (6)$$

где x – расстояние от торца электрода, температура конца которого равна температуре капель T_k ; ω – скорость плавления электрода; ΔT_T – приращение температуры от подогрева электродного стержня током.



2. Первая схема нагрева

В уравнении (6) вместо мощности q задана температура торца T_k за вычетом приращения температуры от подогрева током ΔT_T и начальной температуры T_n .
На рис. 5 представлено распределение полной температуры T

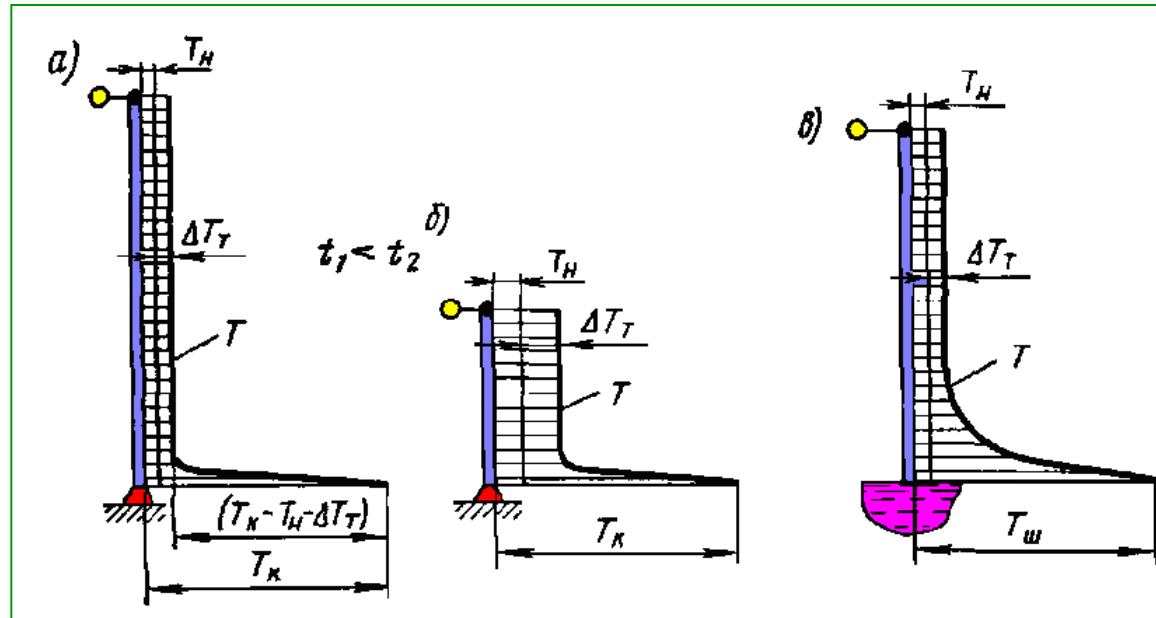


Рис. 5 – Распределение температуры вдоль электрода:
а – при ручной сварке и малом времени нагрева t_1 ;
б – при ручной сварке и значительном времени нагрева t_2 ;
в – при электрошлаковой сварке пластинами



2. Первая схема нагрева

Дуга нагревает небольшую область у самого конца электрода, так как вследствие большой скорости плавления теплота не успевает распространиться по стержню (рис. 5 а, б). При электрошлаковой сварке (пластинами или плавящимся мундштуком) теплота от шлака распространяется значительно дальше (рис. 5, в).



3. Вторая схема нагрева

При автоматической подаче электродная проволока при дуговой сварке нагревается также двумя источниками теплоты – проходящим током и дугой (рис. а).

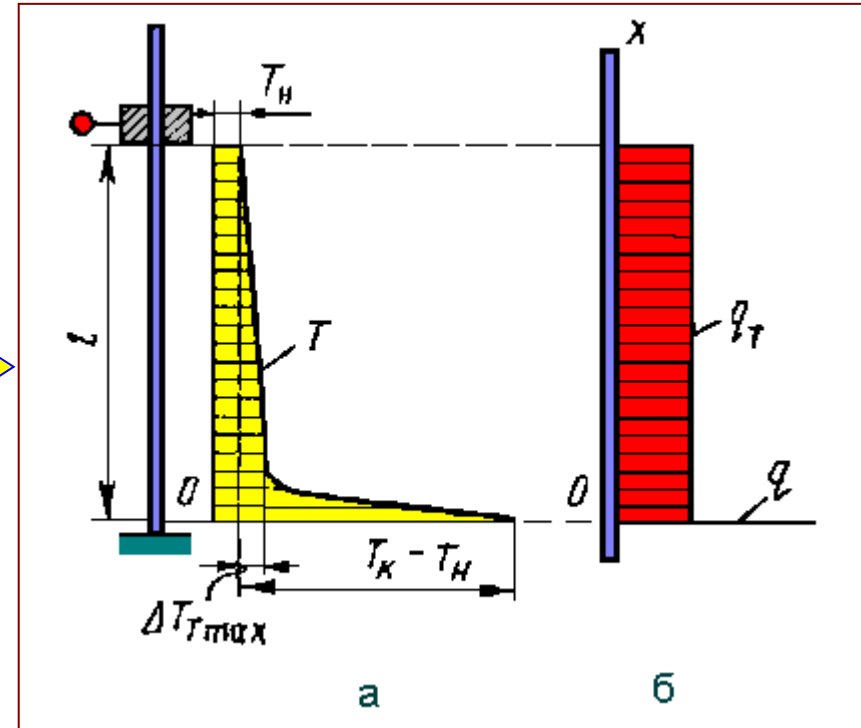


Рис. 1 – Нагрев электродной проволоки при автоматической подаче: а – распределение температур при дуговой сварке, б – схема движения источников теплоты при дуговой сварке

Длина нагреваемой части остается постоянной и равной вылету электрода l . Можно считать, что проволоку нагревают два движущихся источника теплоты: распределенный q_T и сосредоточенный q (рис. б), причем температура в точке O равна температуре капле T_k .



3. Вторая схема нагрева

Скорость подачи проволоки обычно настолько значительна, что теплота от распределенного источника q_T почти не успевает распространиться в направлении x и приращение температуры от нагрева током может быть представлено как линейная зависимость

$$\Delta T_T = \Delta T_{T \max} (l - x) / l. \quad (1)$$

Значение $\Delta T_{T \max}$ можно определять по уравнению (2 Лк.2) численно или приближенно. Время нагрева t принимают равным l/ω .

$$dQ = c\rho F_s dT_T / dt. \quad (2)$$

Приращение температуры от подогрева дугой определяют аналогично уравнению (6 Лк.2):

$$\Delta T_D = T - T_H - \Delta T_T = (T_K - T_H - \Delta T_{T \max}) e^{-\omega x/a} \quad (3)$$



3. Вторая схема нагрева

Скорость подачи проволоки обычно настолько значительна, что теплота от распределенного источника q_T почти не успевает распространиться в направлении x и приращение температуры от нагрева током может быть представлено как линейная зависимость

$$\Delta T_T = \Delta T_{T \max} (l - x) / l. \quad (1)$$

Значение $\Delta T_{T \max}$ можно определять по уравнению (2 Лк.2) численно или приближенно. Время нагрева t принимают равным l/ω .

$$dQ = c\rho F_s dT_T / dt. \quad (2)$$

Приращение температуры от подогрева дугой определяют аналогично уравнению (6 Лк.2):

$$\Delta T_D = T - T_H - \Delta T_T = (T_K - T_H - \Delta T_{T \max}) e^{-\omega x/a} \quad (3)$$



3. Вторая схема нагрева

При электрошлаковой сварке проволоками (рис. 2, а)

электрод на участке «сухого» вылета подогрывается проходящим током в соответствии с уравнением (1) при $l=l_c$, а на шлаковом участке — током и шлаком.

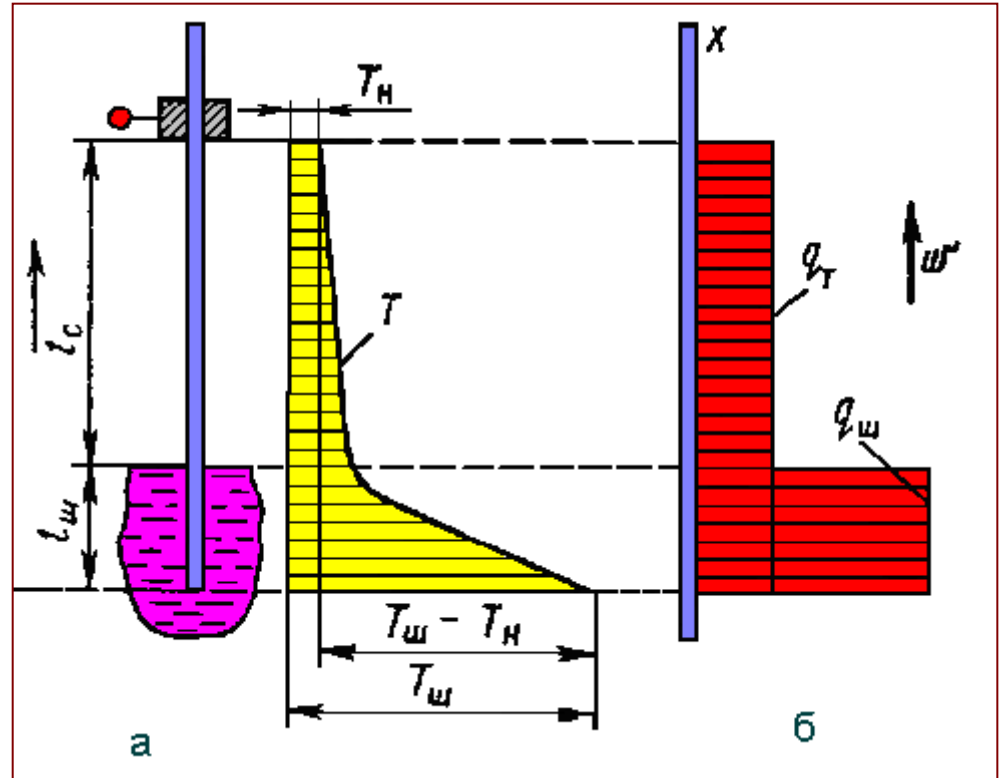


Рис. 2 – Нагрев электродной проволоки при автоматической подаче: а – распределение температур при ЭШС проволоками, б – схема движения источника теплоты при ЭШС проволоками



3. Вторая схема нагрева

Можно считать, что стержень нагревают два распределенных движущихся источника теплоты (рис. 2, б). Температура на конце электрода равна температуре шлака $T_{ш}$. Распределение температур примерно описывается двумя прямыми линиями: на участке $l_{ш}$ уравнением (4)

$$T = (T_{ш} - T_{н} - \Delta T_{Т max}) (l_{ш} - x) / l_{ш} + \Delta T_{Т max} + T_{н} \quad (4)$$

а на участке от $x = l_{ш}$ до $x = l_{ш} + l_c$ — уравнением (1), если принять $l = l_c$, а x отсчитывать от точки $l_{ш}$.



4. Плавление электрода

Плавление электродов при дуговых способах сварки осуществляется путем нагрева металла дугой от температуры $\Delta T_T + T_n$ в точке O до температуры капель T_k .

Теплосодержание металла при этом возрастает от h_T до h_K . Приравнивая количество теплоты, вводимое дугой, к количеству теплоты, вычисленному по теплосодержанию металла, получим уравнение процесса расплавления электрода:

$$\eta_{\text{э}} UI = w F \rho (h_K - h_T) \quad (5)$$

где $\eta_{\text{э}}$ – эффективный к. п. д. процесса нагрева электрода дугой.



4. Плавление электрода

Мгновенная производительность расплавления электрода в $g_p = \omega F_p$ при постоянных η_s и U зависит от температуры подогрева током и силы тока. Чем больше h_T , тем больше g_p (6).

$$g_p = \eta_s UI / (h_K - h_T) \quad (6)$$

Если электрод значительно не нагревается током, то производительность расплавления примерно пропорциональна току. Для характеристики процесса расплавления пользуются коэффициентом расплавления α_p , г/(А·ч) (7):

$$\alpha_p = 3600 g_p / I \quad (7)$$

При ручной сварке $\alpha_p \approx 5...14$ г/(А·ч),
при автоматической сварке под флюсом – 13...23 г/(А·ч),
при сварке в $CO_2 \approx 15... 25$ г/(А·ч).



4. Плавление электрода

При ручной дуговой сварке коэффициент расплавления и производительность расплавления возрастают к концу расплавления электрода вследствие нагрева его током. Неравномерность при правильно выбранных режимах сварки обычно не превышает 20–30%.

Чтобы избежать чрезмерного нагрева электродов током, ограничивают длину электродов (450 мм – для стержней из углеродистых сталей и 400 мм – из аустенитных) и уровень тока.

Значение допускаемого тока в основном зависит от состава покрытия. Для органических покрытий оно значительно меньше, чем для минеральных.



4. Плавление электрода

При непрерывной подаче проволоки с постоянным вылетом скорость плавления проволоки ω определяется значениями тока и вылета. Производительность расплавления проволоки g_p выражается также уравнением (6). С увеличением вылета производительность расплавления при прочих равных условиях возрастает, так как возрастает h_T .

Производительность расплавления обычно определяют опытным путем.



Задание для самостоятельного изучения:

Формы сварочной ванны

Теория сварочных процессов: Учеб. для вузов по спец. «Оборуд. и технология сварочн. пр-ва» // В.Н. Волченко, В.М. Ямпольский, В.А. Винокуров и др.; Под ред. В.В. Фролова. – М.: Высш. Шк., 1988. – (С. 228-230 с.)





Кафедра технології металлов и матеріалознавства

Лузан Сергей Алексеевич

E-mail: khadi.luzan@gmail.com

г. Харьков, ул. Петровского, 25, ХНАДУ, КАФЕДРА ТМ и М

Тел. 097-174-19-15