

УДК 669.187.2

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОЧОГО ПРОЦЕСУ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВОЇ ПЛАВКИ¹

Т. В. Карпук

*Національний Технічний Університет України
“Київський політехнічний інститут”*

Розглянуто загальну характеристику робочого процесу електронно-променевої плавки. Приведені формули для розрахунку швидкості, потужності та глибини проникнення електронів в метал.

Рассмотрено общую характеристику рабочего процесса электронно-лучевой плавки. Приведены формулы для расчета скорости, мощности и глубины проникновения электронов в металл.

It is considered basic parameters of melting process of electron beam furnace. Formulas for calculation of speed, capacity and depth of penetration electrons in metal are resulted.

Вступ

Можливість плавити метал електронним променем продемонстрував в 1879 році У. Крукс і перший зливочок чистого танталу (температура плавлення $t_{\text{пл}} = 2990$ °С) отриманий ще в 1907 р. Пірані.

Промислове освоєння електронно-променевої плавки і рафінування металів і сплавів почалося у кінці п'ятдесятих, початку шістдесятих років минулого століття, коли були розроблені достатньо потужні електронно-променеві гармати.

В основу електронно-променевої технології покладено принцип перетворення електричної енергії в теплову за рахунок бомбардування поверхні металу у вакуумі потоками електронів, прискорених в електричному полі, тобто за рахунок енергії електронів, які рухаються з великою швидкістю до поверхні металу.

Постановка задачі дослідження

Основною задачею дослідження являється огляд загальної характеристики робочого процесу електронно-променевої плавки. Дослідження руху пучка прискорених електронів та визначення середовища, яке найбільш пристосоване для проведення нагріву електронним бомбардуванням.

¹ - Роботу виконана під керівництвом к.т.н., доцента Г. О. Ремізова, НТУУ „КПІ”

Ця швидкість електронів, які пройшли прискорюючу різницю потенціалу складає:

$$V_e = 5,93 \times 10^5 \times \sqrt{U_{\text{приск}}}, \text{ м/с} \quad (1)$$

де $U_{\text{приск}}$ - прискорююча напруга, В.

Після прискорення електрони набувають кінетичну енергію:

$$E_e = \frac{m_e \times v_e^2}{2} = e \times U, \text{ Дж} \quad (2)$$

де m_e - маса електрона, кг ($m_e = 9,1 \times 10^{-31}$ кг),

e – заряд електрона, Кл ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ Кл).

Потужність потоку прискорених електронів дорівнює:

$$W = n_e \times \frac{E_e}{\tau} = \frac{n_e \times e}{\tau} \times U = I \times U \quad (3)$$

де τ - час;

n_e - кількість електронів;

$I = \frac{n_e \times e}{\tau}$ - сила струму електронного пучка, яка зв'язана з величиною

прискорюючої напруги співвідношенням Ленгмюра:

$$I = P \times U^{2/3}, \quad (4)$$

де P - повна провідність електронного пучка (первеанс), яка являється постійною для даної гармати.

Звичайно в електронно-променевих плавильних установках I знаходиться в межах (3...12) А, прискорююча напруга (20...45) кВ.

При бомбардуванні поверхні металу пучком прискорених електронів вони проникають на визначену глибину (δ), яка залежить від густини металу (γ , г/см³) і енергії падаючого електрона:

$$\delta = 2,1 \times 10^{-11} \times \frac{U^2}{\gamma}, \text{ (мм)} \quad (5)$$

і складає декілька мікрометрів.

При цьому поле електронів, що рухаються, визиває відповідне невдоволення поля іонів, які знаходяться у вузлах кристалічної ґратки нагріваємого металу, що визиває гальмування електрона і передачу енергії іонам ґратки.

Максимальна довжина пробігу електрона, в кінці якого його енергія зменшується до нуля, визначається виразом:

$$\delta_{\max} = P \times \frac{A}{z \times \gamma} \times U^2, \quad (6)$$

де A - атомна маса металу;

z - порядковий номер хімічного елементу.

(наприклад для заліза $\delta_{\max} = 3 \times 10^{-9} \times U$, мкм; U-В).

Гальмування електронів приводить до виділення енергії, отриманої при розгоні. Степінь гальмування електронів у металі характеризується сталою Томсона-Віддінгтона, яка дорівнює $1,26 \times 10^{42} \text{ см}^6/\text{г} \times \text{с}^4$.

Відповідно виділення всієї енергії електронного пучка відбувається у поверхневому шарі, тобто цей метод нагріву є поверхневим.

Таким чином при нагріві електронним променем джерело тепла знаходиться в самому тілі, тобто у поверхневому шарі товщиною δ , температура якого зростає і теплота передається наступним внутрішнім шарам і температура металу зростає.

Потужність електронних променів витрачається на нагрівання і плавлення торця витратного електроду і на підтримку в кристалізаторі ванни рідкого металу.

У випадку плавки теплопередача від поверхневого шару до основної маси відбувається також за рахунок конвективних потоків у рідкому металі.

При різкому гальмуванні пучка прискорених електронів, яке відбувається при взаємодії із поверхневими атомами металу, частина енергії електронів виділяється у вигляді квантів рентгенівського випромінювання. Довжина хвилі виникаючого рентгенівського випромінювання залежить від енергії електронного пучка і лежить в широкому діапазоні.

Мінімальна довжина хвилі, виникаючого гальмівного випромінювання визначається по формулі:

$$\lambda_{\min} = \frac{1,237}{U}, \text{ нм} \quad (7)$$

де U виміряється в кВ.

В спектрі найбільша інтенсивність випромінювання потрапляє на довжину хвилі:

$$\lambda = \frac{3}{2} \lambda_{\min} \quad (8)$$

При проходженні пучка від джерела електронів (гармати) до нагріваного об'єкта під дією кулонівських сил пучок намагається розширитись. Для пучка довжиною порядку 0,5 - 1,5 м, яке має місце в установках електронного нагріву, розширення його за рахунок дії сил розштовхування привело б, практично, до повного його розсіювання. Насправді це не спостерігається і електронні пучки з струмом 5 - 10 А

вдається провести на вказаній відстані з незначним розсіюванням. Це можна пояснити процесами взаємодії електронів пучка з атомами залишкових газів і парами металу. Це явище відоме як ефект іонного фокусування.

Позитивні іони, які утворюються за рахунок ударної іонізації атомів залишкових газів і металевого пару на шляху електронного пучка, компенсують негативний просторовий заряд останнього, зменшує тим самим його розширення. Вплив позитивних іонів на пучок електронів які рухаються помітно відображається до залишкових тисків порядку $(133 - 0,133) \times 10^{-5}$ Па. При падінні пучка на метал, який нагрівається, завдяки значній концентрації газів, які виділяються із переплавляемого металу, і випаровування металу ефект іонного фокусування проявляється особливо яскраво.

Проходження електронного пучка через середовище залишкового газу при тисках вище $6,65 \times 10^{-2}$ Па супроводжується помітним зниженням інтенсивності пучка.

Відповідно, середовище, найбільше пристосоване для проведення нагріву електронним бомбардуванням, являється вакуум із залишковим тиском $(13,3 - 1,33) \times 10^{-3}$ Па.

В порівнянні із дуговою плавкою у вакуумі процес плавки в електронно-плавильних печах має специфічні відмінності:

1. Значно менша швидкість плавки. Так, якщо в ДВП середньої потужності (150-200 кВт) плавка іде зі швидкістю 5-10 кг/хв, то максимальна швидкість плавки в електронній печі такої ж потужності дорівнює 4...5 кг/хв.
2. Основна теплова потужність виділяється, безпосередньо, в поверхневих шарах переплавляемого металу, як і при плавці у ДВП. Але суттєво більша концентрація енергії і менша швидкість плавки в електронних печах приводить до високих температур поверхні металу. Цим обумовлено помітно більші теплові втрати випромінюванням з поверхні ванни і втрати металу за рахунок випаровування його компонентів.

Література

1. Патон Б.Е., Тригуб Н.П., Козлитин Д.А. и др.. Электронно-лучевая плавка. – Киев: Наукова думка, 1997. – 266 с.
2. Калугин А.С. Электронно-лучевая плавка металлов. – М.: Металлургия, 1980. - 168 с.
3. Электрические промышленные печи и установки специального нагрева / А.Д. Свенчанский, И.Т. Жернов, А.М. Кручинин и др.; Под ред. А.Д. Свенчанского. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоиздат, 1981. – 296 с.
4. Шиллер З., Гайзиг У., Панцер З. Электронно-лучевая технология. – М.: Энергия, 1980. – 528 с. (перевод с немецкого)
5. Заборонок Г.Ф., Зеленцов Т.Н., Ронжин А.С. и др. Электронная плавка металлов. – М.: Металлургия, 1972. – 348 с.