

Власник документу:
Бевза Олег Миколайович

ID перевірки:
1004027090

Дата перевірки:
14.06.2020 15:50:28 EEST

Тип перевірки:
Doc vs Internet + Library

Дата звіту:
14.06.2020 15:54:31 EEST

ID користувача:
90740

Назва документу: 2020-bachelor-EDD_Salamatin_elektronna_harmata_fch

ID файлу: 1004040160 Кількість сторінок: 35 Кількість слів: 12625 Кількість символів: 95314 Розмір файлу: 118.16 KB

6.59% Схожість

Найбільша схожість: 3.16% з джерело <http://uk.x-pdf.ru/5fizika/1418599-63-cistema-naukovo-tehnichnih-rozrahunkiv-ma...>

5.54% Схожість з Інтернет джерелами

32

Page 37

1.39% Текстові збіги по Бібліотеці акаунту

63

Page 37

0% Цитат

Не знайдено жодних цитат

0% Вилучень

Вилучений текст відсутній

Підміна символів

Заміна символів

14

Саламатіну Дмитру Віталійовичу

«Газорозрядна електронна гармата для плавлення металів»**АНОТАЦІЯ**

В даній дипломній роботі представлено та проаналізовано огляд науково-технічної літератури по електронним гарматам високовольтного тліючого розряду для плавлення металів, які в наш час використовуються та є лідерами на ринку плавлення металів у вакуумі з метою їх очищення, та отримання їх в максимально чистому вигляді з найменшою кількістю домішок а також аналіз їх технічних та економічних переваг та недоліків. Робота присвячена розробці газорозрядної електронної гармати високовольтного тліючого розряду (ВТР), призначеної для плавлення металів, зокрема тугоплавких (титан, цирконій, гафній). Проведено огляд існуючих варіантів електронних гармат для плавлення та їх порівняльний аналіз, з використанням методів моделювання оцінені можливості використання гармат ВТР для плавлення, розгляд існуючих варіантів та виявлення їх як переваг так і недоліків. Проведено ітераційний розрахунок процесу плавлення металів за формулами. Отримані результати проаналізовано і записано в висновки до даної роботи.

ANNOTATION

This diploma environment identifies and analyzes high-quantity electronic guns used to develop metals, which are currently used and remain leaders in the market of vacuum steel structures when they are cleaned, and they try to achieve the cleanest access to the name of impurities and also analyzed technical and economic advantages and disadvantages. The work is devoted to the manufacturers of high-quantity gas-splitting electronic guns, consisting of (VTR), available for metal-plastic metals, such as refractory (titanium, zirconium, hafnium). The review of existing variants of electronic guns for melting and their comparative analysis is carried out, with the use of modeling methods the possibilities of using VTR guns for melting are evaluated, the existing variants are considered and their advantages and disadvantages are revealed. An iterative calculation of the process of melting metals by formulas is performed. The obtained results are analyzed and recorded in the conclusions to this work

ВСТУП

Наприкінці минулого тисячоліття електронно-променеве зварювання і плавлення, термічне оброблення, випаровування, термічні порізи, переплавку та багато інших процесів, які проводять у вакуумі увібрала в себе електронно-променева технологія [1].

За допомогою електронно-променевого плавлення можна отримати метали і сплави з бажаною кількістю домішок. У разі використання випаровування різного роду матеріалів отримуємо покриття для різних потреб, починаючи від декоративних та захисних закінчуючи матеріалами з певними фізико-хімічними властивостями. Електронно-променеве оброблення допомагає нам відразу отримувати вироби бажаної форми. Електронно-променеві гармати є ефективним інструментом для втілення цих технологій у виробництво, а з іншого боку, вони є частиною електронно-променевих установок, а саме печей для переплавлення. Зазвичай електронні гармати працюють наступним

чином. Під дією високої температури, а саме нагрівання катода з вольфраму або танталу, випромінюються електрони, які в електричному полі, на шляху між катодом та анодом, набувають необхідне прискорення [2].

В наш час використовують дві схеми електронно-променевих гармат для плавлення металів: з кільцевим катодом та з анодом, яким є розплавлений метал, а також з анодами іншого типу. Для плавки певного матеріалу його насамперед кладуть в спеціальну піч, де, в результаті бомбардування його поверхні пучками електронів, які надходять одразу з 2-3 гармат, метал плавиться. Метал, що розплавився, може надходити одразу до кристалізатора або тимчасово знаходитися в проміжній ємності, з котрої він буде перелитий до кристалізатора. Тому головною перевагою використання вакууму та високої температури є те, що метал повністю очищається від зайвих домішок. На сьогодні розроблено велика кількість електронно-променевих гармат. В найпопулярніших з них використовується електронна оптика Пірса, за допомогою якої можна отримати промінь дуже малого діаметру (до часток мікрон). Гармати, робота яких базується на розжарюваних катодах, потребують для своєї роботи вакууму з тиском 10^{-2} Па та меншим [3].

Проблема полягає у тому, що основні технологічні операції, які виконуються за допомогою електронного променя, будуть так само виконуватись і при більш низькому вакуумі, а такі, як виплавка та обробка сплавів легко летючими компонентами та синтез тугоплавких з'єднань можна виконати лише при підвищеному тиску. Тобто, у даному випадку не погоджуються фізичні умови роботи гармат з розжарюваними катодами та технологічного процесу плавлення металів. Крім того, застосування даних технологічних пристроїв потребує певних фізичних умов, а саме – високої температури катода та складність умов його роботи у високому вакуумі. В результаті цього більш практичним, довговічним та сприятливим до фізичних умов середнього та низького вакууму, в якому проводиться технологічний процес електронно-променевого плавлення, є газорозрядні електронно-променеві гармати з анодною плазмою.

Характерними перевагами та особливостями електронно-променевої технології плавлення є наступні.

1. Процес плавлення та інших технологічних операцій з матеріалом проводиться у вакуумі, що, в свою чергу, зменшує забруднення металу.
2. Потужний електронний пучок може мати густину потужності приблизно до 10^9 Вт/см
3. Можливість регулювання розмірів електронного пучка та, у разі потреби, можливість його фокусування до надзвичайно малої величини, а саме до часток мікрон
4. Можливість повної автоматизації технологічного процесу, що, в свою чергу, дає легкість в управлінні та можливість повного програмування майже всього технологічного процесу із виключенням людського фактору.
5. Універсальність електронного променя як технологічного інструменту, що дозволяє застосовувати електронно-променеві установки для плавлення для різних потреб та у різних місцях.

6. Отримання великого ККД, що веде за собою дуже великий показник продуктивності обладнання.

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ ВАРІАНТІВ ГАЗОРОЗРЯДНИХ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТ

1.1 Загальний опис електронно-променевої технології

Поява в середині XX століття електронно-променевої (1956 г.), плазмово-дугової (1958 р) і лазерної (1964 г.) технологій поставило перед розробниками нових технологій обробки і зварювання матеріалів важливе загальнотеоретичне питання: чому традиційне джерело енергії для цих цілей, вільно палаюча зварювальна електрична дуга, здійснює плавлення металів "поверхнево", тобто відношення глибини розплавленої зони до її ширини є меншим за 1, а нові джерела, електронний промінь, лазер, плазма – "кинджально", з відношенням глибини розплавленої зони до її ширини ≤ 100 [5].

Тоді в науці з'явилося поняття концентрованих потоків енергії (КПЕ). Виявилося, що якщо джерело енергії розвиває питому потужність $\geq 10^5\text{--}10^6$ Вт/см², що притаманно електронному променю, лазеру та плазмі, процес нагрівання речовини стає самоорганізуючим, або синергетичним, і, відповідно, різко, тобто за наявності деякого порога питомої потужності, змінюються закономірності перенесення тепла в об'єкті, що нагрівається. Подолання цього порогу відкрило перед технологами істотно нові можливості.

1. Підвищення продуктивності процесів зварювання і обробки в сотні разів.
2. Підвищення якості та надійності оброблюваних виробів.
3. Отримання нових ефектів в зварюванні та обробці поверхні.

Все це виявилось пов'язано з фундаментальними відкриттями в новій галузі фізики – синергетиці [5].

Великий науковий і технологічний досвід роботи з КПЕ показав, що найбільш ефективним джерелом енергії при обробці матеріалів вважається електронний промінь. Для обробки і зварювання матеріалів використовують електронні промені потужністю 1 МВт і більше (що не відноситься до лазерів і плазми). Для того щоб пучок мав велику густину струму, утворюється компресія електронного потоку, який імітується саме холодним катодом. Тому в електронно-променевих гарматах на основі ВТР з анодною плазмою для забезпечення відповідних електронно-оптичних властивостей використовують увігнутий катод. За допомогою іонізації газу, а також завдяки розсіяним електронам, утворюється анодна плазма, яка, в свою чергу, є джерелом іонів, які рухаються в напрямку до катоду. Схема електродної системи електронної гармати ВТР показана на рис. 1.1.

Електронний промінь має максимальний коефіцієнт поглинання енергії під час дії на речовину. Обробку матеріалів електронним променем проводять у вакуумі, що зменшує вплив на матеріал, який гріється, в типових окислювальних середовищах [6].

Фактично електронний промінь, в деякій мірі, є ідеальним джерелом енергії для обробки матеріалів. Якщо його погіршувати, наприклад, зменшуючи

коефіцієнт поглинання енергії, тоді виникають проблеми, характерні для впливу на речовину променю лазера. Якщо вакуум замінити на атмосферу інертного газу, слабо кисневе (CO_2) або міцно кисневе (повітря) середовище, тоді отримаємо аналог газового розряду, а саме електричну дугу. Найбільшою популярністю користуються електронні гармати високовольтного тліючого розряду, схема якої приведена.

Рис 1.1 – Схема електронної гармати з анодною плазмою на основі високовольтного тліючого розряду

1 – катод (холодний), 2 – анод, 3 – плазма, 4 – лінза, 5 – пучок електронів, 6 – матеріал, який обробляється

Сутність процесу електронно-променевого впливу на речовину полягає в тому, що кінетична енергія сформованого в вакуумі тим або іншим способом електронного пучка, імпульсного або безперервного, в зоні обробки перетворюється в теплову. Оскільки діапазони потужності і концентрації енергії в промені великі, можливі всі види термічного впливу на матеріали: нагрів до заданих температур, плавлення і випаровування з дуже високими швидкостями.

В даний час жодна галузь промисловості, пов'язана з отриманням, з'єднанням і обробкою матеріалів, не може обійтись без електронно-променевого нагріву. Це пояснюється характерними перевагами даного методу, головні з яких – можливість концентрації енергії від 10^3 до $5 \cdot 10^8$ Вт / см^2 .

Для управління режимами роботи електронно-променевих гармат з анодною плазмою треба змінювати прискорювальну напругу або густину плазми. Густину плазми в гарматі можна змінювати двома способами: по-перше, за допомогою зміни тиску, по-друге через використання допоміжного розряду, для цього, власне, в плазмі і використовують керуючий електрод, на який подають невисокий позитивний або негативний потенціал відносно аноду.

До переваг електронно-променевих гармат, які базуються на високовольтному розряді і використовують анодну плазму можна віднести наступні:

1. Можливість роботи у середньому або низькому вакуумі.
2. Некритичність до складу газового середовища.
3. Значно більша надійність та довговічність холодного катода, низ розжарюваного.
4. Простота в управлінні
5. Значно простіша конструкція для виготовлення

Типові вольт-амперні характеристики електронної гармати ВТР наведені на рис. 1.2.

Рис.1.2 – ВАХ електронно-променевої гармати при різних тисках, робочий газ – повітря. 1

У газорозрядних електронно-променевих гарматах з високовольтним тліючим розрядом між катодом і анодом, завдяки бомбардуванню поверхні катода іонами плазми, відбувається емісія електронів. Електронний пучок формується завдяки конструктивним особливостям катода і анода. Електромагнітна лінза, яка складає фокусну і відхиляючу систему, слугує для

фокусування променя і подальшого його переміщення з заданою частотою і траєкторією по поверхні матеріалу.

Головними перевагами електронно-променевих гармат на основі ВТР є наступні. Відсутня потреба високого вакууму у камері, що дає можливість відмовитись від використання високо-вакуумних насосів. Робочий діапазон тисків газорозрядної гармати складає від 10 до 0.01 Па.

Мінімальний вплив на працездатність електронно-променевої гармати таких чинників як: зміна тиску у камері, виділення парів та навіть частинки металу під час плавлення. Завдяки цим моментам отримується дуже велика якість плавки матеріалів.

1. Простота конструкції, експлуатації, надійність, маленька маса, яка веде за собою і малі габарити.

2. Катоди зазвичай працюють більше тисячі годин, що не ставиться навіть в порівняння з аналогами, гарматами із розжарюваними катодами.

3. Простота конструкції впливає також і на не дорожню вартість та обслуговування.

Завдяки такій кількості переваг електронно-променеві гармати на основі високовольтного тліючого розряду широко експлуатуються у провідних країнах світу таких як: Китай, США, Росія, країни Азії та Європи для виготовлення складних деталей, плавки, переплаву.

1.2. Газорозрядні електронно-променеві гармати

На рис 1.3 наведена фотографія газорозрядних електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду, які мають потужність 100, 300 та 450 кВт відповідно.

Рис. 1.3 – Газорозрядні електронно-променеві гармати високовольтного тліючого розряду:
1 – ВТР-100 (зліва), 2 – ВТР-300 (всередині), 3 – ВТР-450 (з права)

У зв'язку зі складністю і різноманітністю фізичних процесів, що протікають в ВТР, і зі складною геометрією електродів, розробка газорозрядних джерел електронів проводиться шляхом поєднання розрахункової і експериментальної роботи. При розробці джерел електронів ВТР технологічного призначення можна виділити наступні основні етапи:

1. Визначення умов роботи джерела електронів з урахуванням його призначення.

2. Вибір типу джерела електронів в залежності від його призначення і умов експлуатації.

3. Розробка концептуальної моделі джерела.

4. Розробка математичної моделі електронно-оптичної системи і визначення граничних умов.

5. Реалізація алгоритмів розрахунку для розробленого джерела і оптимізація його електродної системи з використанням методів обчислювального експерименту.

6. Розробка оптимальної конструкції електродів і інших вузлів джерела, що забезпечують отримання електронного пучка з заданими параметрами [7].

Було проведено порівняння характеристик електронно-променевих гармат ВТР (табл. 1.1).

Таблиця 1.1

Табл. 1.1. Порівняння електронно-променевих гармат ВТР

Істотними особливостями фізики електронно-оптичних систем ВТР, які необхідно враховувати під час проектування технологічних джерел електронів, а також методи їх математичного опису під час написання програмних комплексів, призначених для моделювання джерел електронів ВТР є наступні.

1. Наявність просторового заряду електронів та іонів і рухомої плазмової межі, що роблять істотний вплив на розподіл потенціалу в області формування електронного пучка. Методологія розрахунку ВТР базується на формалізованих і чисельних алгоритмах аналізу потоків заряджених частинок і синтезу геометрії електронно-оптичних систем.

2. Наявність процесів парних зіткнень в області катодного падіння потенціалу з утворенням вторинних атомних частинок, що виникають при перезарядці, іонізації, розсіювання і емісії електронів.

3. Наявність анодної плазми основного і допоміжного розрядів, геометрична форма границі якої істотно впливає на розподіл електричного поля в розрядному проміжку [8].

1.3. Описання властивостей електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду

Емісія катода електронної гармати ВТР залежить від робочого тиску і напруги на електродах і не підкоряється закону обмеження струму просторовим зарядом електронів, тобто первеанс такої гармати не є постійною величиною. При високій напрузі (більше 20 кВ) емісійна здатність електронної гармати ВТР істотно випереджає можливості традиційних електронних гармат з напруженим катодом.

З точки зору витрат енергії на створення електронного променя емісійну здатність електронної гармати ВТР характеризує також величина частки теплової потужності, що виділяється на катоді внаслідок бомбардування іонами.

Ця величина, як показали численні експерименти на електронних гарматах ВТР різних конструкцій, залежить від матеріалу катода, робочого газу і напруги на електродах

Особливістю потужних електронних гармат ВТР є наявність протока робочого газу, що забезпечує необхідний для підтримки розряду тиск в розрядному просторі гармати. Через сильну залежність параметрів розряду від тиску газу останнє повинно підтримуватися суворо певним, щоб зменшити або виключити вплив на електричні характеристики електронного променя безупинно мінливих вакуумних умов в технологічній камері.

На відміну від термоелектронної гармати для гармати ВТР характерно сталість тиску в розрядному просторі з ростом тиску в технологічній камері до деякої критичної величини, що залежить від умов протікання робочого газу через отвір для виведення електронного променя в технологічну камеру. Незалежність тиску в розрядному просторі гармати ВТР від тиску в технологічній камері пояснюється існуванням в анодному отворі потоку

робочого газу зі швидкістю рівної швидкості звуку, тому обурення тиску, що поширюється, як відомо, в газовому середовищі зі швидкістю звуку, не може пройти проти цього потоку в порожнину анода і впливати на тиск в розрядному просторі.

Електронні гармати ВТР, незважаючи на відсутність власної системи відкачування, володіють істотним, в порівнянні з традиційними гарматами запасом стійкості проти впливу газовиділення з боку технологічної камери [9].

1.4. Необхідні системи для забезпечення роботи газорозрядних електронно-променевих гармат ВТР

У наявності крайнє необхідний ряд систем для забезпечення постійної роботи газорозрядної електронної гармати, а саме:

1. Високовольтне джерело живлення;
2. Розроблена система, яка реалізує підготовку та подачу робочого газу;
3. Система, яка управлятиме гарматою;
4. Охолодження газорозрядної електронної гармати;
5. Забезпечення для контрольно-вимірювальної апаратури гармати.

Серійне промислове обладнання, яке комплектується завдяки деяким системам. Перша система – це підготовка і подача газу до газорозрядної електронної гармати, друга система – охолодження цієї гармати.

Джерело живлення для гармати можна використовувати будь-яким за принципом дії. Головне завдання – щоб високовольтне джерело мало змогу забезпечувати найвищий захист від можливого короткого замикання. Якщо в камері гармати відбудеться пробій, джерело повинно максимально швидко відновити вихідний струм та напругу [10,11].

Найголовнішим завданням керуючої системи гармати є:

1. Управління та контроль за переміщенням електронних променів;
2. Прийняття та обробка вимірювань;
3. Аналіз та підтримка параметрів газорозрядної електронної гармати;
4. Контролювання витрат газів (дивитися за змінами потужності променю).

1.5. Описання принципу роботи газорозрядної гармати ВТР

Газорозрядна електронна гармата працює наступним чином. У проміжку між катодним вузлом і анодним вузлом за допомогою вакуумного насоса, що відкачує газ через променевід за допомогою натікача газу отримують робочий тиск газу 1-10 Па.

Між катодним і анодним вузлами прикладають прискорення напруги 10-30 кВ. В проміжку між катодним вузлом і анодним вузлом запалюється високовольтний тліючий розряд, утворюється анодна плазма, іони якої бомбардуючи холодний катод вибивають з його поверхні електрони, що формують електродну систему і фокусують котушкою в електронний промінь, що направляється через променевід в технологічну камеру.

Взаємодія швидких електронів пучка, що формується катодом, з прианодною плазмою відбувається в широкому діапазоні частот. Найбільш ефективно воно на власній частоті прианодної плазми, що залежить, в основному, від її

макроструктури і на електронній або іонній плазмовій частоті, що залежить від концентрації заряджених частинок плазми.

Виконання променевода у вигляді широкосмугової розподіленої пучково-плазмової електромагнітної системи дозволяє підвищити на порядок ефективність взаємодії електронного пучка з плазмою. Посилений вихідний сигнал знімається через хвильовдний вивід і по ланцюгу зворотного зв'язку подається з допомогою коаксіального введення в резонаторну секцію [12].

1.6. Електронна-променева установка на основі електронної гармати

Для забезпечення роботи електронної гармати ВТР необхідний ряд систем, що забезпечують електроживлення, охолодження і відкачування гармати, а також подачу робочого газу та вимірювання параметрів гармати під час роботи.

Крім того, необхідне управління електронним променем, блокування високої напруги при різних аварійних і нерозрахованих режимах.

Система електроживлення може бути зібрана з будь-якої з відомих схем регульованого або нерегульованого випрямляча з максимальним захистом і кратністю струму короткого замикання не більше 2-3. Наявність газорозрядного проміжку в гарматі тягне за собою, з одного боку, істотно більшу частоту пробойів (зазвичай - один в 0,1-1 хв.), з іншого боку, через малий час відновлення електричної міцності при відключенні джерела живлення дозволяє різко зменшити тривалість паузи при автоматичному повторному включенні (до 0,1-1 мс).

При використанні джерела живлення з контактором оптимальний час паузи при автоматичному повторному включенні становить 5-10 мс, при цьому тривалість режиму короткого замикання зазвичай не перевищує 35 мс. Навіть при частоті пробойів один в 1 хв. зниження середньої потужності гармати при веденні технологічного процесу не перевищує 1%.

Істотно нелінійна вольт-амперна характеристика гармати дозволяє повністю уникнути проблеми перенапруження джерела живлення при перехідних режимах [12].

Система управління електронним променем електронної гармати ВТР 200-300 / 25 нічим не відрізняється від традиційних систем з однієї магнітної лінзою і відхиляючою системою, за винятком не електричного способу регулювання потужності електронного променя зміною витрати робочого газу через розрядний простір гармати.

Відхиляюча конструкція дозволяє працювати на частотах розгортки до 500 Гц. Система подачі робочого газу дуже проста і зазвичай складається з джерела робочого газу (генератора газу або балона), приєднаного до гармати через редуктор і дозуючий вентиль, за допомогою якого здійснюється установка і регулювання робочих режимів гармати. Практика експлуатації плавильних установок з бустерними насосами показує, що частка потоку робочого газу гармати в загальному потоці відкачуваного з технологічної камери газу рідко перевищує 10%.

Тепловиділення на електродах гармати при максимальних і несприятливих режимах може досягати 10-15 кВт, що вимагає інтенсивного примусового водяного охолодження як катода, так і анода [13].

При роботі електронно-променевої установки з гарматою ВТР вимірюванням підлягають: струм розряду, прискорююча напруга, граничний і робочий вакуум гармати, а також граничний і робочий вакуум в технологічній камері. Для вимірювання струму і напруги гармати можуть використовувати будь-які електровимірювальні методи та прилади; при цьому бажано використовувати і самописні - це дозволяє більш достовірно оцінювати стан гармати, особливо після аварійних або нестандартних ситуацій.

Висновки до першого розділу

1. Було проведено огляд електронно-променевої технології, як галузі в фізиці. Проаналізовано переваги та сфери використання даної технології по відношенню з аналогами.
2. Наведено вольт-амперні характеристики електронної гармати ВТР при різних тисках.
3. Проведено порівняння електронно-променевих гармат ВТР різної потужності.
4. Визначено головні етапи розробки джерел електронів високовольтного тліючого розряду.
5. Описано властивостей електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду.
6. Виявлено необхідний ряд систем для забезпечення постійної роботи газорозрядної гармати.
7. Описання принципу роботи газорозрядної гармати ВТР.

2. ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИЙ ПЕРЕПЛАВ

2.1. Електронно-променеве плавлення металу

Електронно променеве плавлення – зазвичай це перехід з твердого у рідкий агрегатний стан металу або сплаву під дією нагрівання у так званій «печі», яке обумовлене перетворенням кінетичної енергії електронів в теплову при зштовхуванні з поверхнею матеріалу що в ній знаходиться.

Вперше можливість плавлення променем була показана людству у 1879 році Вільямом Круксом – видатним Англійським хіміком, фізиком який за 18 років до цього відкрив такий хімічний елемент як Талій. Вільям за допомогою катодної трубки розплавив платиновий катод. Хоча перші злитки почали виплавляти лише на початку 20 сторіччя. А для практичного промислового застосування цей метод дозволили ще через 50 років, коли цих пристроїв почали потребувати провідні сфери такі як: атомна і аерокосмічна.

Перші промислові варіанти мали потужність до 50 кВт і випускались в таких країнах як:

1. Німеччина (Геркус);
2. США (Стауфер, Темескал);
3. СРСР (інститут електрозварювання ім. Є.О.Патона) [12].

Основною причиною попиту на даний винахід було те, що за допомогою них метал виплавлявся абсолютно чистим, без будь яких домішок, так як весь

процес проходив у вакуумі. За допомогою цієї технології і можна отримати такі метали як ніобій, цирконій, ванадій, тантал у чистому вигляді. Принципова схема електронно-променевої плавки зображена на рис 1.4.

Плавку за допомогою електронного променя можна, також використовувати як зварювання за допомогою плавлення. По відношенню до дугової зварки якість плавки променем краща більш ніж у 6 разів, що характеризується відношенням ширини до глибини зварювального шва.

Рис.1.4 – Принципова схема електронно-променевої плавки

1 – рубіновий стрижень; 2 – ксенонова лампа; 3 – система охолодження; 4 – лінза; 5 – сфокусований потік монохроматичного світла; 6 – матеріал.

За допомогою електронно-променевої плавки можна досягти дуже велику якість з'єднань навіть для тугоплавких металів які окислюються при підвищеній температурі. Питома потужність деяких лазерів перевищує 10^6 Вт/см, що дозволяє пробивати отвори в таких матеріалах як: алмази рубіни, сапфіри та інші. Дає можливість зварки металів і не металів з різними теплофізичними характеристиками.

При інтенсивному плавленні у місці зіткнення променю і виробу температура може досягати $6000\text{ }^{\circ}\text{C}$. За допомогою лазерного зварювання матеріали можуть оброблятися у різних середовищах таких як: газ, вакуум, повітря. Завдяки волоконній оптиці промені можна посилати навіть у важкодоступні або небезпечні зони, наприклад зони з великою радіоактивністю. Але найголовніше застосування лазерного зварювання це перш за все отвори з діаметром до 0,4мм, які так важливі у мікроелектроніці.

2.2. Види катодів для електронно-променевих гармат

По причині робочих умов, до катода електронно-променевої зварювальної гармати пред'являють надзвичайно жорсткі вимоги.

Про активному зварюванні в камері процес зварювання протікає паралельно з процесом випаровування металу у зварювальній ванні. Такі метали як мідь, алюміній та інші з низькою температурою плавлення, при потрапленні на катод утворюють при певних умовах летючі легкоплавкі матеріали-евтектики. Їх випаровування призводить до того, що на катоді починають формуватися заглибини і змінюється його початкова форма, що веде за собою зміну фокусування електронного променя. За умови якщо температура плавлення потрібного матеріалу вища за робочу температуру заданого катода то емісія буде спадати в часі.

Також до руйнування поверхні катода може привести іонне бомбардування, що може бути спричинене недостатньо високим вакуумом у процесі зварювання. Зазвичай це в районі (10^{-4} мм рт.ст.). Часта розгерметизація зварювальної камери теж погіршує якість поверхні катода що на пряму впливає на його термін служби.

За таких умов категорично заборонено використовувати оксидні катоди, які в свою чергу найбільш популярні і широко застосовуються при електронно-вакуумній плавці.

У зварювальних гарматах також бажано не використовувати інші термо-катооди :

- 1.Оксидно-торієві (на основі двоокису торію ThO_2)
- 2.Синтезовані(спечена суміш нікелевого порошку і вуглекислих барію і стронцію)
- 3.Особливо-ефективні катоди, які виникають шляхом удосконалення оксидно-барієвих катодів, мають ще назву L-катоди [14].

Багато зварювальних камер використовують металеві катоди. Для досягнення великої щільності струму бажано використовувати метали з порівняно невеликою роботою виходу. Також допускається нагрівання до відносно високих температур при малій швидкості випаровування металу. Найпоширеніші це- вольфрам і тантал.

Хоча у деяких варіантах зварювальних гармат використовують металоподібні лантанборідні катоди (LaB_6), які мають у своєму запасі кращі емісійні характеристики у порівнянні з металевими катодами. Але найкращими та повністю відмінними від термоемісійних катодів вважаються – холодні та газорозрядні катоди.

2.3. Порівняння катодів

Конструктивно для зварювальних електронних гармат виготовляється 2 види катодів: катод виконується прямо канальним, катод з непрямым підігрівом. Перші більш прості у виготовленні, хоч і мають перелік недоліків.

В першу чергу це складність в забезпеченні правильної геометричної форми імітуючої поверхні. До всього цього можна додати ще те, що при розігріванні катода струмом, створюється магнітне поле, яке в свою чергу відхиляє потік електронів від осі прожектора. При розігріванні катода змінним струмом змінюється величина і напрямок магнітного поля, яке в результаті отримуємо круглий магнітний перетин пучка котрий вироджується в лінію. При розігріві катода постійним струмом вісь пучка зрушає щодо геометричної осі прожектора. Тому більш велика щільність емісії досягається у катодах з непрямым підігрівом до того ж вони є еквіпотенціальними. Прямо канальні катоди доречно використовувати в пристроях з невеликими щільностями струму та невеликими періодами роботи [14].

Основна перевага лантанборідних катодів в порівнянні з металевими - висока емісійна здатність при відносно низькій робочій температурі ($1\ 600^{\circ}\text{C}$). Але на роботу лантанборідного катода впливають пари зварюються. При зварюванні матеріалів з температурою плавлення нижче $1\ 500-1\ 900^{\circ}\text{C}$ не спостерігається металізація лантанборідного катода парами зварюються.

Час роботи катода і стабільність його параметрів визначаються в цьому випадку ступенем руйнування поверхні катода іонним бомбардуванням і винесенням матеріалу катода в складі легкоплавких евтектиків, що утворюються на його поверхні в результаті взаємодії з парами металів, що зварюються. Більш стабільні параметри пучка забезпечують масивні (товщиною 1-1,5 мм) металеві катоди, що підігріваються шляхом електронного бомбардування. Нагрівання катодів випромінюванням вольфрамової спіралі, хоча і відрізняється своєю простотою, виявляється неекономічним при необхідності досягнення температури імітуючої поверхні катода понад $1\ 600-1\ 700^{\circ}\text{C}$.

Слід зазначити, що при будь-якому способі підігріву катода необхідно забезпечити його роботу в режимі обмеження струму просторовим зарядом для отримання стабільних параметрів електронного пучка. Тому з метою виключення впливу можливих випадкових коливань температури катода на струм пучка робочу температуру катода вибирають на 5-10% більшою, ніж це необхідно для отримання заданого струму пучка [14].

2.4. Електронно-променева плавка металів IV групи

Метали **IVA** групи періодичної системи Д.І. Менделєєва – титан, цирконій і гафній – складають чудову трійку хімічно-активних металів. Їх промислове застосування пов'язано з розвитком нових технологій: хімічної і аерокосмічної промисловості, атомної енергетики та інших. Хімічні властивості їх близькі, що викликає певні труднощі при поділі один від одного, але їх застосування принципово різне через особливості фізичних властивостей. Титан - легкий метал з щільністю 4,5 г / см³. Сплави титану мають малу вагу, що в поєднанні з високими властивостями міцності робить їх незамінними в аерокосмічній техніці.

Цирконій, маючи малий поперечний переріз захоплення теплових нейтронів, порівняно високу температуру плавлення, високу радіаційну і корозійну стійкість, є одним з основних металів, що застосовуються в якості компонентів сплавів для тепловиділяючих елементів ядерних реакторів.

Гафній має дуже велике поперечний переріз поглинання нейтронів, і останнім часом він застосовується для регулюючих стрижнів і стрижнів аварійного захисту ядерних реакторів. Всі три метали мають чудову корозійну стійкість в широкому спектрі агресивних середовищ. Їх корозійна стійкість значно вище, ніж у нержавіючих сталей і близька до танталу. Тому всі три метали успішно застосовуються в хімічному машинобудуванні: морська вода і сильні окислюючі середовища для титану, сильно розкислюючі середовища для цирконію та гафнію [15].

При електронно-променевої плавці над поверхнею розплавленого металу внаслідок наявності градієнтів температури, концентрації і тиску виникає потік парів металу і газів. При певних умовах напрямок потоку буде або до поверхні розплаву, або від неї.

В умовах вакуумної плавки потік речовини відчуває взаємодію з залишковими газами вакуумного середовища, що призводить до утворення газопарової фази над поверхнею рідкого металу. У таблиці 2.1. показано відсоткову кількість домішок при електронно-променевому переплаві.

Табл.2.1 – Вміст газових домішок в титані, цирконії і гафнії після електронно-променевого плавлення.

При випаровуванні металу і взаємодії поверхні розплаву з залишковими газами велику роль відіграють процеси зіткнення. Характеризує цей процес довжина вільного пробігу λ . Коли вона дорівнює радіусу поверхні розплаву, тоді існує область, обмежена деякою поверхнею, де атоми металу зазнають велике число зіткнень. Ця поверхня, по-перше, відіграє роль джерела пара замість поверхні розплаву, по-друге, служить захисним екраном поверхні

розплаву від безпосередньої взаємодії із залишковою атмосферою вакуумної камери.

Довжина вільного пробігу атомів металу за температури плавлення залежить від багатьох факторів і може бути розрахована за формулою.

де T – температура; p – тиск випаровування металу; r – молекулярний радіус;
атомна маса, ρ – щільність металу.

Титан. При дослідженні процесу очищення титану методом електронно-променевої плавки в якості вихідних матеріалів використовувався йодований титан. Плавки губчастого титану здійснюється в два етапи. На першому етапі в кристалізатор печі ЕЛП засипають шматочки губчастого титану, які потім спікаються і плавляться.

В процесі спікання і оплавлення інтенсивно виділялися гази з металу. Вміст газових домішок в губчастому металі є настільки великим, що спостерігається "бульбашкова" стадія виділення газів. Подальша плавка проходить класичним крапельним методом з витягуванням злитка. Слід зазначити, що плавка титану підвищеної ступеня чистоти сприятливо позначається на вакуумних умовах установки через хороші гетерні здібностей шарів титану, осівших на стінки камери за рахунок випаровування при ЕПП.

Цирконій. Вихідними матеріалами при рафінуванні цирконію і гафнію методом ЕЛП використовувалися метали, отримані методом кальціо-термічного відновлення їх тетрафториду: кальціо-термічний цирконій і кальціо-термічний гафній а також йодований цирконій. Дослідження показали, що електронно-променева плавка є вельми ефективним рафінуючим процесом для цирконію. Мікротвердість вихідного йодованого цирконію становила 1200 МПа, а після плавки знизилася до 800 МПа. У разі кальціо-термічного цирконію твердість по Бринелю знижується з 2250 МПа до 1750 і 1370 МПа у металу після першого і другого електронно-променевого перепау відповідно.

Подвійний перепау йодованого цирконію в установці з безмасляної системою відкачування дозволив отримати злиток цирконію з твердістю 639 МПа.

Гафній. Рафінування кальціо-термічного гафнію методом електронно-променевої плавки показує, що при збільшенні питомої потужності плавки не тільки прискорюється процес рафінування гафнію від металевих домішок, але відбувається і рафінування від кисню за рахунок його видалення у вигляді монооксиду металу HfO .

Проведення розрахунків часу витримки розплаву гафнію при електронно-променевому перепаві, необхідного для зниження концентрації металевих домішок до заданої величини, показали, що в процесі електронно-променевої плавки може бути скрутна очищення гафнію від кремнію, а очищення від більш летких домішок зменшується в ряду $\text{Zn} > \text{Be} > \text{Mn} > \text{Cr} > \text{Cu} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{V} > \text{Co} > \text{Ni} > \text{Si}$ [15].

Висновки до другого розділу

1. Загальний огляд історії та процесу електронно-променеве плавлення металу. Оцінка переваг та недоліків.

2. Було проаналізовано різноманітні види катодів, та обрано доречний для електронно-променевих гармат.
3. Визначення найкращого катоду з найбільшою емісійною здатністю при відносно низькій робочій температурі.
4. Проведено аналіз плавлення тугоплавких матеріалів за допомогою електронно-променевого переплаву.
5. Розраховано довжину вільного пробігу атомів металу за температури плавлення.

3.МОДЕЛЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОНІВ ВТР

3.1. Розрахунок розподілу електричного поля і траєкторій заряджених частинок

Самоузгоджене електронно-оптичне завдання для умов горіння ВТР вирішується з використанням методу не до формованих трубок струму, при цьому для знаходження розподілу потенціалу в розрядному проміжку був використаний метод інтегральних рівнянь [16]. Спочатку задається положення і форма кордону анодної плазми, що визначаються експериментальним шляхом. Струм іонів з поверхні анодної плазми визначається з використанням відомого співвідношення Бома [17, 18, 19]:

Де,

- N_i – концентрація іонів в розрядній плазмі,
 T_e – температура електронного газу в плазмі,
 m_i – маса іонів газу.

Метод інтегральних рівнянь, що використовується для розрахунку розподілу потенціалу з урахуванням просторового заряду, записується в загальному вигляді наступним чином:

Де, $\sigma - \rho$ – густина поверхневого заряду, ρ_m – густина об'ємного заряду, r, z – радіальна та азимутальна відстань від точок спостереження до поверхневих та просторових зарядів, $K(t)$ – повний еліптичний інтеграл першого роду.

Розрахунок траєкторій заряджених частинок для ламінарних потоків електронів та іонів проводився не на основі рівнянь класичної механіки, а з використанням диференціального рівняння траєкторій, відомого з електронної оптики, оскільки в це рівняння не входить час як явний параметр [19, 20].

Де, m_s - маса частинки,

v_s - швидкість частинки.

Рівняння, що наведене вище в границях окремих комірок кінцево-різничної сітки вирішувалось методом Рунге-Кутта четвертого порядку з використанням системи MatLab. Описання ітераційної методики вираховування просторового заряду буде приведено далі.

3.2. Визначення положення і форми кордону анодної плазми

Для використовуваних на практиці електродних систем ВТР із сферичним катодом і конічним анодом можна з точністю до 10 - 15% визначити положення кордону плазми з аналітичного співвідношення [19, 21, 22]:

Де, d_a – висота анодної плазми,

R_a – радіус основи анода,

h_a – його висота,

l_a – його створююча.

3.3. Методика розрахунку просторового заряду

Після розрахунку розподілу потенціалу шляхом обробки матриці (4) межа плазми розбивається на кілька сотень елементарних ділянок і зі співвідношення визначається кількість іонів для заданої щільності струму і розраховуються траєкторії відповідних макрочастинок. Розрахунок просторового заряду проводиться по гідродинамічній моделі відповідно до методу недеформованих трубок струму. Для забезпечення стійкої збіжності методу була використана релаксація по струму [18,23]:

– реальний струм іонів,

– зменшене значення струму іонів на відповідній ітерації

n – кількість ітерацій по струму.

Оскільки розрахунок просторового заряду проводився з використанням методу недеформованих трубок струму, передбачалося, що аналізовані просторові осередки досить малі, і перетинають їх траєкторії можна інтерполювати прямою лінією. В цьому випадку ітераційні вирази для обчислення просторового заряду можна записати у вигляді:

Де, s – сорт частинки,

– струм трубки,

m/q – максимальний заряд рухаючих частинок в аналізованій трубці,

Q_z – апроксимоване значення потенціалу на вході та на виході з комірки,

n – порядковий номер трубки струму, перетинаючого комірку,

ρ_e / ρ_{ion} – просторовий заряд електронів та іонів, що вноситься відповідною трубкою.

Після проходження всіх ітерацій по току обчислені значення просторового заряду підставляються в систему рівнянь до тих пір, поки не буде досягнута суміжність ітераційного процесу для всіх елементарних осередків. Збіжність процесу оцінюється стандартним способом, виходячи з різниці значень потенціалу в заданій точці на теперішній і попередньої ітерації [24].

Аналітичні вирази для визначення щільності струму з поверхні катода і для обліку елементарних процесів взаємодії частинок в розрядному проміжку будуть приведені в наступному розділі статті.

3.4. Облік елементарних взаємодій частинок в розрядному проміжку і електродних процесів

Струм електронів з поверхні катода, з урахуванням процесу перезарядки прискорених іонів на атомах залишкового газу і його іонізації прискореними іонами, визначається з співвідношень [17, 18, 19].

Де, – струм електронів та іонів на поверхні катода,

– переріз перезарядки і іонізації атомів газу в області катодного падіння потенціалу,

γ – коефіцієнт вторинної іонно-електронної емісії,

$\phi(r;z)/E(r;z)$ – значення потенціалу і модуля напруженості електричного поля в точці з координатами $(r;z)$,

E_0 – напруженість поля, при якій переріз перезарядки максимальне,
 $U_{ю}$ – відповідне цьому полю значення напруги,
 P_{a0} – приведені значення тиску в розрядному проміжку,
 $C, A_{ii}, A_j, A_i, \alpha$ – емпіричні постійні, які залежать від
використовуваного газу та матеріалу катоду.

Для обліку процесу перезарядки іонів на атомах залишкового газу
співвідношення можна переписати таким чином [19]:

ΔN_i – зміна концентрації іонів в проміжку кінцево-різничної комірки за
рахунок процесу перезарядки,

N_a – стала Авогадро,

ξ – коефіцієнт питомої іонізації атомів газу,

$P_{атм}$ – атмосферний тиск,

$Q_{ср}$ – середнє значення еквівалентного потенціалу в об'ємі комірки.

При розрахунках в відповідності з ітераційними співвідношеннями, ступінь
іонізації газу визначалась з рівняння Моргуліса для перерізів іонізації [19]:

Де,

a, b – емпіричні константи,

U_e – потенціал, що відповідає енергії первинних електронів,

U_j – потенціал іонізації газу.

При використанні газових сумішей у випадку відсутності процесів вторинної
іонізації сумарна ступінь іонізації газу визначається як адитивна величина.

Для розрахунку траєкторій електронів в області анодної плазми
використовувалася модель вільного дрейфу заряджених частинок з
урахуванням їх розсіювання на позитивних іонах, оскільки плазма є
провідним квазінейтральним середовищем з фіксованим потенціалом і
електричне поле в ній відсутнє.

3.5. Моделювання транспортування електронного пучка з низького в високий вакуум

Відповідно до фізики горіння ВТР в розрядному проміжку необхідно
підтримувати тиск порядку одиниць паскаль, що дозволяє деякі технологічні
операції, наприклад, зварювання тонкостінних виробів, здійснювати без
розв'язки по тиску розрядної і технологічної камери. Це в значній мірі
спрощує електронно-променеве технологічне обладнання.

З іншого боку, багато технологічні операції, наприклад, нанесення покриттів
складного хімічного складу в середовищі активних газів, вирощування
монокристалів, вакуумна плавка металів високої частоти, виробляються при
більш низькому тиску, приблизно $10^{-1} - 10^{-2}$ Па. В цьому випадку виникає
необхідність розв'язку по тиску камери джерела електронів і технологічної
камери, яка здійснюється шляхом їх одночасної відкачування через
технологічну камеру і напуску газу в розрядну камеру. При цьому область
формування електронного пучка і технологічна камера відокремлюються
одна від одної каналом транспортування з вузьким поперечним перерізом, що
і забезпечує необхідний перепад тиску. Тому при проектуванні електронно-
променевого технологічного обладнання, в якому використовуються
газорозрядні електронні гармати, важливе завдання є моделювання

транспортування короткофокусних електронних пучків в еквівалентні-потенційні каналі [25, 26].

Фізико-математична модель процесу транспортування електронного пучка з низького в високий вакуум в еквіпотенційній каналі описується досить складною системою алгебро-диференціальних та ітераційних рівнянь, що включає: рівняння вакуумної техніки; математичні моделі різних магнітних лінз; систему рівнянь, що описує комплекс фізичних процесів, пов'язаних з дрейфом електронного потоку в розрядженому газі; рівняння, що описують вплив теплових швидкостей електронів на геометричні параметри пучка в процесі його транспортування. Серед фізичних ефектів, що роблять істотний вплив на взаємодію електронного пучка із залишковим газом в процесі дрейфу основними є наступні: компенсація і перекомпенсація просторового заряду, пінч-ефект, розсіювання електронів на атомах залишкового газу. Відповідні аналітичні співвідношення і методика розрахунку параметрів електронного пучка наведені в роботах. Результати модулювання реальних систем транспортування з декількома магнітними лінзами, а також методи оптимізації геометричних параметрів каналу і струмів лінз, досить докладно розглянуті і проаналізовані в роботі. Код програми, яку використовують для модулювання транспортування електронного пучка, наведено в роботі.

3.6. Аналіз отриманих результатів

Розроблена система рівнянь (3.1 – 3.9) для моделювання джерел електронів ВТР була використана при конструюванні нових типів газорозрядних електронних пушок, впроваджених в різних галузях промисловості для проведення різноманітних технологічних операцій. На рис. 3.3 наведені результати розрахунку розподілу електричного поля в розрядному проміжку, а на рис. 3.4 – розраховано розподіл щільності струму в фокальній площині пучка. Порівняння отриманих результатів моделювання з експериментальними даними показало, що фізико-математична модель, заснована на співвідношеннях (3.1 – 3.9), при правильному підборі емпіричних параметрів у співвідношеннях (3.5, 3.9), є досить точною і адекватною. Статистичний розкид розрахункових і експериментальних даних не перевищував 30%. Крім того, була розроблена і реалізована методика апроксимації вольт-амперних і енергетичних характеристик джерел електронів на основі ВТР, яка не пов'язана з розглянутою вище електронно-оптичним завданням, проте воно в значній мірі спрощує проектування електронно-променевого технологічного обладнання [27, 28].

У роботі [22] було показано, що границя плазми може бути апроксимована з використанням аналітичного співвідношення:

де A , B та α – напівемпіричні коефіцієнти, які визначаються як результат апроксимації фотографій розрядного проміжку шляхом їхнього комп'ютерного аналізу та обробки.

Багаторічний досвід роботи з розробленою системою моделювання показав, що вона є досить ефективною при написанні, модифікації і експлуатації, оскільки в ній використані розвинені математичні і графічні можливості система MatLab, включаючи аналітичний процесор і графічні функції.

Розроблена системи моделювання представляє великий науковий і практичний інтерес для проектувальника електронно-променевого технологічного обладнання, як для технологів, так і для конструкторів.

Рис. 3.1 – Ілюстрація використання методу інтегральних рівнянь для розрахунку розподілу електричного поля в джерелах електронів ВТР

– електрони,
– іони

Рис.3.2 – Апроксимація геометрії кордону анодної плазми з використанням аналізу фотографії розрядного проміжку

Рис. 3.4 – Розподіл щільності струму пучка в фокальній площині пучка. Прискорює напруга: 1 - 20 кВ; 2 - 15 кВ; 3 - 10 кВ

Висновки до третього розділу

1. Розраховано розподіл електричного поля і траєкторій заряджених частинок.
2. Визначено положення і форми кордону анодної плазми з аналітичного співвідношення (3.10).
3. Розроблення методу для розрахунку просторового заряду.
4. Облік елементарних взаємодій частинок в розрядному проміжку і електродних процесів.
5. Моделювання транспортування електронного пучка з низького в високий вакуум.
6. Аналіз отриманих результатів.

4. КОНСТРУКТИВНІ ТА МОДЕЛЮВАННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ЕЛЕКТРОННО-ПРОМЕНЕВИХ ГАРМАТ

4.1. Конструкція сучасної електронно-променевої печі

На рисунку 4.1 зображено конструкцію сучасної електронно-променевої печі ВМО-04 для плавки цирконію. Максимальна довжина виплавленого злитку – 1,6 м.

Рис. 4.1 Конструкція електронно-променевої печі ВМО-04 для плавки цирконію

1 – блок електронних гармат; 2 – пристрій для бокової подачі матеріалу; 3 – приймальний пристрій для злитків; 4 - плавильна камера.

Всі електронно-променеві печі мають схожу конструкцію, а сам технологічний процес електронно-променевої плавки проходить у високому вакуумі, від 0,1 до 0,01 Па. Відкачка об'єму робочої камери і гармати проводиться вакуумною системою. Широке застосування отримують ті електронно-променеві печі в котрих застосовується декілька аксіальних електронних гармат в яких здійснюється рафінування рідкого металу в проміжних ємностях від шкідливих домішок і неметалічних включень а далі наступне формування злитку в кристалізаторі [29].

4.2. Схема та принцип дії електронно-променевої установки з кільцевим катодом

Численним сімейством електронно-променевих установок є плавильні установки, які в основному використовуються для переплавки сталі, молибдену, ніобію та інших тугоплавких і хімічно активних металів. Їх потужність регулюється і може варіюватись від 50 до 2000 кВт

Одна з простих схем електронної плавильної установки з кільцевих катодом і автоелектронним нагріванням, в якій анодом слугує сам метал, що плавиться представлена на рис.4.2. Катодом К служить вольфрамова спіраль нагріта струмом до 2 500 К. Анодом А є розплавляючий електрод і рідкометалевий шар у верхній частині злитка, що утворюється в кристалізаторі. Катод оточує молібденовий екран Е, що знаходиться під тим же потенціалом. Електрони вилітаючи з катода відштовхуються екраном і у вигляді кільцевого пучка направляються на електрод і в рідкометалічну поверхню злитка. Нижня частина електрода розплавляється під ударами бомбардуючих його електронів. Метал по мірі плавки краплями стікає в ванну [30].

Рис.4.2 Схема електронно-променевої установки з кільцевим катодом

4.3. Схема та принцип дії електронно-променевої установки з радіальними гарматами

При зміні положення електрода буде змінюватися і кількість потрапляють на нього електронів. Якщо електрод підняти так, що припиниться його плавлення, тоді метал у ванні буде перегріватися або триматися при незмінній температурі.

Установки з радіальними гарматами, приклад зображено на рис 4.3. працюють на прискорюючій напрузі від 5 до 15 кВ. Головними їх перевагами є простота конструкції і висока провідність: це дозволяє отримувати в них великі струми пучка при малій напрузі. Їх недоліком є знаходження катода в зоні камери, тому при газовиділенні з поверхні ванни він виявляється в зоні підвищеного тиску. Покинувши катод електрони зіштовхуються з атомами газів і іонізують їх.

Утворені при цьому позитивні іони направляються до катода і адсорбуються на ньому, що сильно знижує його емісійну здатність і скорочує термін служби. З цієї причини плавильні електронно-променеві установки з кільцевих катодом мають обмежене застосування для переплавки металів з незначним виділенням газу [30].

Рис.4.3 – Схема електронно-променевої установки з радіальними гарматами

4.4. Конструкція і принципова схема плавильної печі

Всі електронно-променеві установки конструктивно складаються з:

1. Електронно-променеві гармати
2. Вакуумна системи
3. Вакуумна камера
4. Джерела високої напруги і системи управління
5. Пристрою для подачі заготовки що розплавляється
6. Кристалізатору з піддоном
7. Механізму для висування злитка

Рис. 4.4 – Принципова схема електронно-променевої установки

Так як рідкий метал має дуже велику температуру і з дуже великою інтенсивністю випромінює тепло то для його охолодження і стримання стінок вакуумної камери від перегріву застосовується охолодження проточною водою. Вакуумна камера має систему водяного охолодження стінок, верхньої та нижньої плити. На верхній плиті робочої камери розташовується фланець

для установки електронно-променевої гармати та пристрої її вертикального переміщення. Двері камери має систему водяного охолодження. На двері камери розташоване вікно діаметром 200 мм, виконане з матеріалів, які забезпечують захист від іонізуючих випромінювань.

Найважливішим компонентом електронно-променевої установки є вакуумна система, від якої власне і залежить успіх всієї плавки. У модулі управління розташовані елементи контролю: система пуску вакуумних насосів, система управління і регулювання клапанами. Основною частиною модуля управління є спеціалізований промисловий контролер, що забезпечує передачу даних за стандартом Ethernet між сервером і блоками управління виконуючих механізмів.

Електрообладнання установки складається з систем управління відкачуванням, вимірювання тиску в характерних точках установки, електропостачання та управління електронно-променевим джерелом, напуску технологічних газів в обсяг вакуумної камери, позиціонування заготовок / виробів всередині вакуумної камери щодо електронно-променевого джерела, відеоспостереження за технологічним процесом, а також централізованого контролю і візуалізації параметрів роботи установки.

Технологія електронно-променевої плавки дозволяє створювати високоякісні деталі, які мають властивості, притаманні металам, оброблюваних класичними способами [31].

Рис.4.5 – Схема вакуумної установки

1.Газорозрядна електронно-променева гармата

2.Технологічна камера

3.Натікач

4.Електронний блок

5.Високовольтне джерело живлення

6.Осцилограф

7.Дифузійний насос

8.Форвакуумний насос

9-12. Вакуумери

13-15. Вентилі

4.5. Конструктивні особливості газорозрядних електронно променевих гармат

Зварювальний електронна гармата – цей електронний прилад, який є досить складним. В процесі створення такої зварювальної гармати було вирішено багато принципових питань, стосовних застосування пучків прискорених електронів з метою зварювання і плавки металів.

У самих перших гарматах для електронно-променевого зварювання, пучок електронів формувався тільки за допомогою прикатодного електрода, без застосування додаткових фокусуючих систем. Анодом гармати, було сам виріб. Так як фокусна відстань електростатичного прожектора мало змінюється при пропорційній зміні потенціалів на його електродах, то така гармата може харчуватися малостабільним випрямленою напругою. Поряд з простотою такої гармати слід зазначити такі значні її недоліки.

1. Однокаскадна електростатична система фокусування, особливо в поєднанні з низькою прискорюючою напругою, не може забезпечити формування інтенсивного електронного пучка з високою щільністю енергії. Тому з її допомогою неможливо з'єднання тугоплавких металів товщиною більше 1-2 мм.

2. У гарматі для полегшення формування гострофокусного пучка максимально зменшується поверхню емітера, що призводить до перенапруження режиму його роботи при значних струмах. Внаслідок цього вольфрамова спіраль, що зазвичай використовується як емітер, виходить з ладу вже через кілька годин роботи.

Технологічні і електронно-оптичні характеристики гармати з однокаскадним електростатичним фокусуванням підвищуються при введенні в конструкцію прискорюючого електрода, що знаходиться під потенціалом виробу.

У гарматах з однокаскадним електростатичним фокусуванням зазвичай використовуються прискорююча напруги не вище 20 кВ. Такі гармати вже на початку шістдесятих років були витіснені зі сфери промислового застосування гарматами з більш надійними електронно-оптичними системами

Комбіноване (електростатичне і електромагнітне) фокусування дуже широко застосовується в різноманітних гарматах. Пучок електронів формує у гарматах з таким фокусуванням пучка прожектор, що складається з катода, прикатодного електрода і прискорюючого електрода – анода.

Пучок має мінімальний перетин - який проектується (зазвичай зі зменшенням) на виріб, що зварюється завдяки електромагнітної фокусуючої системи. Специфічні властивості вакуумного зазору як ізолятора, зниження і нестійкість ізоляційних властивостей вакуумного проміжку анод - катод є основними принциповими обмеженнями, що перешкоджають підвищенню прискорюючої напруги електронно-променевих зварювальних установок.

При напрузі вище 30-50 кВ пробійна напруженість поля знижується навіть у разі збільшення вакуумного проміжку і електричні пробої між анодом і катодом неминучі.

Отримувати електронні пучки високих енергій доцільно за допомогою електронно-оптичної системи, в основу якої покладено принцип прискорення заряджених частинок в прискорювальній трубці з однорідним електричним полем, розподіленим уздовж її осі.

Пучок електронів малої енергії що вийшов з прожектора формується і потім поступово прискорюється всередині трубки, досягаючи на її виході повної енергії. Робота градієнтної гармати заснована на цьому принципі, причому прискорюючу трубку в даному випадку можна розглядати як електростатичну фокусуючу систему з малою оптичною силою. Основні вузли електронно-оптичної системи гармати - прожектор, система магнітного фокусування і система електромагнітного відхилення пучка електронів [32].

Катодний вузол кріпиться на високовольтному прохідному ізоляторі. Через броньований високовольтний кабель підключений до джерела живлення до прожектора гармати. Зміна струму пучка здійснюється подачею негативної

напруги, що управляє на прикатодному електроді прожектора або, рідше, зміною струму розжарення катода. У разі імпульсно-модульованого режиму електронно-променевого зварювання на прикатодний електрод гармати подаються негативні прямокутні імпульси моделюючої напруги. У деяких гарматах під вакуумом можна змінювати відстань між елементами прожектора, завдяки чому вдається змінювати параметри формованих пучків (кут збіжності, максимальний струм і т. д.). Розрідження катодного простору гармати проводиться через канали в анодному блоці або за допомогою спеціальної вакуумної системи (в разі малого каналу в фокусуючих системах).

За допомоги однієї або двох магнітних лінз зазвичай здійснюється фокусування пучка. У гарматах з одного лінзою для зменшення діаметра пучка на виробі лінза розташовується далеко від анода і близько до виробу. При цьому збільшується кут збіжності пучка на виході з лінзи.

У гарматах з двохлінзовою фокусуванням перша лінза розташовується близько до анода, завдяки чому зменшується перетин пучка в другій лінзі, її сферична аберація, а отже, менше перетин пучка і кут збіжності пучка на виробі. Коригування положення пучка щодо крайок зварюваного металу здійснюється за допомогою магнітних відхиляючих систем. Магнітна фокусуються і відхиляє системи в потужних зварювальних гарматах розміщуються в водоохолоджуваному склянці, закріплюється, в нижній частині корпусу гармати. Канал для подачі води з'єднується послідовно з системою охолодження корпусу гармати.

Поряд зі стаціонарними гарматами отримали застосування рухливі гармати, переміщувані всередині вакуумної камери щодо нерухомого зварюється. застосування переміщуються в вакуумі зварювальних гармат дозволяє в ряді випадків зменшити габарити вакуумної камери і спростити механізми всередині камери, виконувати шви в будь-якому просторовому положенні, зварювати неповоротні стики і т. д.

Хоча розвиток електронно-променевого зварювання прийняло широкий розмах, використання тієї чи іншої зварювальної гармати з відповідними параметрами електронного променя часто обумовлюється не вихідними теоретичними даними або досвідченими результатами, а наявністю на даному виробництві певної конструкції гармати. Висока вартість обладнання, фірмові інтереси часто змушують використовувати готову розробку, іноді занадто складну або недостатньо хорошу [32].

4.6. Моделювання процесу електронно-променевого плавлення металів

Для практичної реалізації електронно-променевих технологій та при проектуванні електронно-променевого обладнання важливими є попередні оцінки часових, температурних та енергетичних параметрів технологічного процесу. При цьому важливу роль відіграють засоби чисельного моделювання нагріву, плавлення та випаровування матеріалів під дією електронного потоку. При цьому для математичного моделювання теплової дії електронного променя на речовину використовують рівняння теплопровідності.

Такі розрахунки базуються на експериментальних вимірюваннях та

визначенні термодинамічних параметрів твердих та рідких речовин в залежності від температури.

Модель процесу електронно-променевого випаровування може також бути побудована на основі рівняння теплового балансу, яке є частковим випадком рівняння теплопровідності. При складанні математичних моделей процесу випаровування важливим є врахування всіх елементарних теплових процесів, якими супроводжується електронно-променевий нагрів речовини. Ці процеси суттєво впливають на розподіл теплової потужності, яка поглинається речовиною. Найбільш важливими з таких процесів є нагрів речовини, її плавлення та випаровування, та витрати теплової потужності на теплопровідність, теплопередачу та випромінювання. Всі ці процеси протікають залежно від температури матеріалу, який нагрівається, тому математична модель процесу випаровування записується у вигляді нелінійних алгебро-диференціальних рівнянь.

Розглянемо математичні моделі теплових процесів, якими супроводжується нагрів, плавлення та випаровування речовини. Найбільш простим тепловим процесом з точки зору його математичного описання є теплопередача. Як відомо, втрати теплової потужності на теплопередачу прямо-пропорційно залежать від різниці температур та зворотно-пропорційно до довжини тіла, через яке здійснюється теплопередача.

Будемо розглядати процес теплообміну для охолоджуваного водою тигля з навіскою, схема конструкції якого та головні геометричні параметри наведені на рис. 4.6. Головними геометричними параметрами тигля, показаними на цьому рисунку, є: $l_{ст}$ – товщина стінки тигля, R_t – його радіус, $l_{ж}$ – товщина рідинного шару розплавленого металу, $h_{тв}$ – висота шару нерозплавленого металу, l_3 – товщина зазору між металом та стінкою тигля.

У загальному вигляді, якщо вважати, що висота металу та коефіцієнт теплопровідності є залежними від температури, рівняння, яке описує процес теплопередачі, запишеться у вигляді:

- площа поверхні тигля, з якої проводиться випаровування,
- температура металу на поверхні тигля,
- температура стінки тигля.

Якщо вважати, що параметри та

є незалежними від температури, то можна вважати, що залежність носить лінійний характер. При аналізі теплових процесів в місці контакту твердого тіла з охолоджуваною рідиною або газом розглядається не процес теплопередачі, а процес тепловіддачі, і замість рівняння показано вище необхідно розглядати рівняння тепловіддачі:

Де,

- коефіцієнт тепловіддачі,
- температура поверхні, яка охолоджується,
- температура рідини або газу, які охолоджують метал.

Рис. 4.6 – Конструкція охолоджуваного водою тигля з навіскою та його геометричні

параметри

При електронно-променевому нагріванні речовини завжди випромінюється тепло з поверхні металу, який нагрівається. Потужність, яка витрачається на випромінювання, залежить від температури поверхні, та у загальному випадку визначається законом Стефана-Больцмана:

- температура у технологічній камері,
- випромінювальна здатність,
- константа Стефана.

Також потужність витрачається і через інший процес, а саме речовина поглинає частину при її опроміненні електронним променем, що і є вторинною електронною емісією.

Якщо врахувати втрати на вторинну емісію та на випромінювання, можна визначити активну потужність, що витрачається для нагріву речовини. Вона вираховується за наступною формулою:

Де,

- потужність електронного променя,
- коефіцієнт вторинної електронної емісії.

Тоді остаточно, згідно з рівнянням теплового балансу, можна записати

Із співвідношень наведених вище, для реальної геометрії охолоджуваного водою тигля з металевою навіскою, наведеної на рис 10, можна записати ітераційні співвідношення для обчислення температури поверхні металу при його нагріванні до температури плавлення:

Де, n – номер ітерації, t – час, m – маса металу, p – тиск газу у технологічній камері, r – тепловий опір.

Далі наведена частина програми, яка використовується для того щоб змодельовати процес нагрівання алюмінію у мідному охолоджуваному водою тиглі. Розрахунки проводилися за формулами (4.1 – 4.6), які перелічені вище з геометричними та тепловими параметрами процесу нагрівання, наведеними у таблиці 5. В ній можна побачити і параметри, що необхідні для подальших розрахунків процесів плавлення та випаровування.

Таблиця 4.1 – Геометричні та теплові параметри для нагрівання алюмінію у мідному охолоджуючому водою тиглі

Далі подане графічне зображення розрахунків, отриманих за допомогою використання вище наведеної програми для різних значень потужності електронного пучка, див. на рис.4.7. З отриманих результатів можна зробити важливий висновок про те, що при малій потужності електронного пучка не досягається температура плавлення алюмінію, оскільки вся потужність, яка поглинається речовиною, витрачається на випромінювання та теплопередачу і система переходить у стан термодинамічної рівноваги при значно менших температурах, ніж температура плавлення.

Так, при потужності електронного променя в 1 кВт Алюміній у мідному охолоджуваному водою тиглі нагрівається приблизно до 400 °K, а при потужності 5 кВт – до 850 °K. В цілому залежності температури поверхні алюмінію від часу мають експоненціальний характер, але якщо потужність електронного пучка перевищує 10 кВт, відрізки експоненти на ділянці від кімнатної

температури до температури плавлення можна з досить великою точністю описати лінійною залежністю.

Наведена вище програма має суттєву особливість, пов'язану з описанням умов виходу з циклу, в якій обчислюється значення температури поверхні алюмінію для різного часу його опромінювання електронним променем. Якщо потужність електронного променя є достатньою для нагріву навіски до температури плавлення, цикл виконується, доки температура поверхні є меншою за температуру плавлення. А у випадку малої потужності, коли термодинамічна рівновага встановлюється при температурі, меншій за температуру плавлення алюмінію, вихід з циклу здійснюється за умовою

де

– крок інтегрування рівняння балансу потужності по часу,

– збільшення температури поверхні для визначеного кроку інтегрування по часу.

Рис. 4.7 – Залежність температури поверхні алюмінію від часу при його опромінюванні електронним пучком різної потужності для параметрів охолоджуваного водою тигля, заданих у таблиці 5

Написана програма має багато варіантів використання, зокрема вона підійде для розробки технологій нанесення металевих покриттів, оскільки вона дозволяє оцінити не тільки мінімальну потужність, при якій з тигля заданої геометрії можна випаровувати метал, але й час проведення технологічної операції та характер залежності температури поверхні від часу. Якщо отримані часові параметри зміни температури навіски не влаштовують проектувальника, необхідно змінювати або потужність електронного променя, або геометрію тигля.

Завданням для бакалаврської випускної роботи є моделювання процесу електронно-променевого плавлення алюмінію та розробка, за отриманими результатами моделювання, електронно-променевої гармати високовольтного тліючого розряду, призначеної для плавлення алюмінію.

4.7. Конструктивні особливості електронно-променевих гармат ВТР

Розробка газорозрядних електронно-променевих гармат з високовольтним тліючим розрядом має деякі проблеми та складності через ті фізичні процеси, які у ній протікають, порівняння котрих здійснено у таблиці 4.2. Вихідні параметри гармат напряму залежать від точності розмірів та конфігурації електродів та інших елементів конструкції, а також їх теплових режимів. В процесі розробки електроди та інші не менш важливі конструкційні вузли піддаються інтенсивному бомбардуванню іонами, нейтральними частинками та електронами, що супроводжується їх нагрівом та розпиленням.

Як можна бачити, всі електронно-променеві гармати, які використовуються в наш час, є однотипними та різняться лише конструктивними рішеннями. Основними функціональними вузлами гармат є електродна система з холодним катодом і система транспортування електронного пучка з розрядного проміжку в технологічну камеру [33].

Табл.4.2 – Порівняння конструктивних та параметричних відмінностей ВТР

Електродна система гармат складається з холодного катода, який зазвичай виготовляється в формі сфери і полого анода з вихідним отвором у його основі для проходження саме електронного пучка. В якості матеріалів катода прийнято використовувати алюміній, який забезпечує порівняно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії і відрізняється дуже хорошою теплопровідністю при охолодженні катода. Для матеріалу анода зазвичай використовують або мідь або сталь [33].

4.8. Конструкції розроблених електронних гармат ВТР технологічного призначення

Розробка газорозрядних електронних гармат ВТР утруднена складністю і різноманітністю як відбуваються в їх фізичних процесах. Вихідні параметри гармат сильно залежать від точності розмірів і конфігурації електродів і інших елементів конструкції, а також їх теплових режимів [35–37].

В процесі роботи електроди та інші вузли конструкції піддаються інтенсивному бомбардуванню іонами, електронами, нейтральними частинками, що супроводжується їх нагріванням і розпиленням. Вплив цих процесів росте зі збільшенням потужності розряду. Через сильну залежність параметрів розряду і формованого електронного пучка від тиску і роду газу, процеси в технологічній камері, пов'язані з випаровуванням і газовиділенням при електронно-променевому нагріванні, можуть порушувати стійкість роботи гармати.

У зв'язку з наведеними особливостями електронних гармат ВТР при їх розробці необхідно враховувати експлуатаційні умови в електронно-променевих процесах, для яких вони призначаються. Проведені в даній роботі теоретичні і експериментальні дослідження дозволять здійснювати розробку електронних гармат ВТР в діапазоні потужності від одиниць до сотень кВт, призначених для застосування в різноманітних технологічних процесах, пов'язаних з електронно-променевим нагрівом.

Розроблені гармати однотипні і відрізняються в основному конструктивним рішенням. Основними функціональними вузлами гармат є електродна система з холодним катодом і система транспортування електронного пучка з розрядного проміжку в технологічну камеру.

Електродна система гармат складається з холодного катода, виконаного у вигляді частини сфери, і анода з вихідним отвором в його основі для проходження електронного пучка. Як матеріал катода використовують алюміній, що забезпечує порівняно високий коефіцієнт іонно-електронної емісії і відрізняється хорошою теплопровідністю при охолодженні катода. Для матеріалу анода в різних конструкціях використовують найчастіше мідь або нержавіюча сталь.

Електродна система з увігнутим катодом і порожнистим анодом забезпечують генерацію і формування електронного пучка, кут сходження якого і фокусна відстань визначаються радіусом кривизни катода, поздовжнім розміром анода і поперечним розміром всієї електродної системи. При цьому розташування фокуса пучка збігається з отвором в підставі анода, що дозволяє виконати

отвір мінімального діаметра для забезпечення вакуумного перепаду між розрядним проміжком і технологічної камерою.

Система транспортування електронного пучка забезпечує його проведення через променепровід, що з'єднує розрядний проміжок з технологічною камерою, його фокусування на оброблюваному матеріалі, а також відхилення і розгортку по законам, визначним технологічним процесом. Для фокусування пучка в різних конструкціях гармат використовується одна або дві магнітних лінзи, а для відхилення пучка система з чотирьох пар тороїдальних котушок. Необхідний динамічний опір газовому потоку надає лучепровід, геометричні параметри якого визначаються за наведеною в даній роботі методиці.

Електронна гармата потужністю до 5 кВт при прискореній напрузі 35 кВ призначена для електронно-променевого зварювання, тому головною вимогою до її конструкції є формування електронного пучка мінімального діаметра з можливості малим кутом збіжності. Для генерації електронного пучка в гарматі використовується алюмінієвий катод діаметром 12 мм, оточений конічним фокусуючим електродом виготовленим з міді.

Через різницю коефіцієнтів іонно-електронної емісії алюмінію і міді генерація електронів пучка відбувається тільки з поверхні катода, що забезпечує більш чіткі кордони електронного пучка і рівномірний розподіл щільності струму в його перерізі. Катод з фокусуючим електродом закріплено на торці мідної основи, встановленого на високовольному ізоляторі, виготовленому з капролона. Порівняно невелика потужність розряду дозволяє використовувати непряме олійно-водяне охолодження катодного вузла.

Конічний перфорований анод встановлено в циліндричному корпусі, до якого приєднаний мідний променепровід з розташованою на ньому магнітною лінзою. Анод і променепровід охолоджуються проточною водою. Так як перфорований анод розміщений в герметичному корпусі гармати, куди подається робочий газ, то камера, утворена корпусом, є газобаласним об'ємом, стабілізуючим тиск при роботі гармати. Зображення даної гармати приводиться на рис. 4.8.

Рис. 4.8 – Газорозрядна електронна гармата для зварювання потужністю до 5 кВт

Відкачування газу з пушки здійснюється в основному через отвір в основі корпусу, так як вихідний отвір в променепроводі для зменшення впливу газовиділення і пароутворення в зоні зварювання на роботу пушки має малий діаметр. Корпус гармати змонтований на фланці-хрестовині і за допомогою юстировочних гвинтів встановлений на базовому фланці, з яким він з'єднаний герметично за допомогою сальфону. Така конструкція пушки дозволяє переміщати її по вертикалі на 40 мм і нахилити на кут до 15 градусів, що необхідно при наведенні пучка на зварюваний стик, так як гармата не має відхилля. Гармата забезпечує формування електронного пучка з питомою потужністю близько 10^6 Вт / см² на відстані до 100 мм від вихідного отвору.

Електронні гармати потужністю 30 і 100 кВт призначені для таких процесів, як випаровування, плавка і ін. Що проводяться при тисках 10⁻² - 10⁻¹ Па. Тому важливою вимогою до конструкції цих гармат являється забезпечення

вакуумного перепаду між розрядним проміжком пушки і технологічною камерою. Крім того, потужність розряду в десятки кВт вимагає досить ефективного охолодження електродів і інших елементів конструкції гармати. Конструктивно ці гармати виконані за єдиним принципом і відрізняються, в основному, розмірами електродів і всієї конструкції в цілому. Конструкція електронної гармати для випаровування наведена на рис 4.9. Вони виконані у вигляді єдиного вузла, що дозволяє встановлювати їх на будь-який технологічний камері як вертикально, так і під заданим кутом. Основою конструкції є циліндричний водоохолоджувальний корпус, в якому встановлений на торцевому високовольтному ізоляторі алюмінієвий катод, виконаний у вигляді частини сфери радіусом 100-120 мм і охоплений циліндричним електродом з нержавіючої сталі. Катод і підставка, на якому він закріплений, мають пряме водяне охолодження.

Рис.4.9 – Газорозрядна електронна гармата для випаровування.

До нижньої частини корпусу, приєднано мідну основу з вихідним отвором по осі системи. Спільно з корпусом гармати підставу утворює анодну порожнину комбінованої форми - циліндр з конічним дном.

До основи анода приєднаний мідний водоохолоджувальний променепровід, на якому встановлено дві магнітних лінзи, що відхиляють. Застосування двох лінз дозволяє проводити електронних пучок через подовжений променепровід обмеженого діаметра, що забезпечує перепад тиску між гарматою і технологічною камерою не менше, ніж на два порядку.

При виході з променепровіда електронний пучок має малий кут збіжності, що дозволяє транспортувати його в технологічній камері на значній відстані без погіршення фокусування. Максимальний кут виділення пучка від осі гармати становить не менше 15 градусів.

Рис.4.10 Газорозрядна електронна гармата потужністю 500кВт

У конструкції гармати потужністю 500 кВт велику увагу приділено відведення тепла від електродів і тракту проходження пучка, яке становить одиниці кВт і більше.

Через порівняно великого поперечного розміру електродів корпус гармати виконаний у вигляді двох циліндричних частин. У верхній частині корпусу змонтований катодний вузол, а нижня частина корпусу, спільно з мідною основою, утворюють анодний порожнину.

Алюмінієвий катод виконаний з порожниною для проходження води, в якій встановлений конічний розподільник потоку води. Робоча поверхня катода виконана у вигляді частини сфери радіусом 150 мм. Катод охоплений циліндричним електродом з нержавіючої сталі і за допомоги водоохолоджувальної підставки встановлений на високовольтному ізоляторі.

Особливу увагу при розробці конструкції гармати було звернено на проходження електронного пучка в отвір мідної основи анода і променепроводу. Це пов'язано з тим, що при великому абсолютному значенні міцності гармати незначний витік струму на анодній підставці або променепроводі викликає їх проплавлення. Тому система електродів і водоохолоджувального тракту проходження пучка відпрацьована так, що

максимальні втрати потужності на електродах не перевищують 5% від загальної потужності розряду.

У гарматі, також як і в попередніх конструкціях, для транспортування пучка застосовані дві магнітних лінзи і відхиляє з чотирьох пар тороїдальних котушок. При оптимальної фокусуванні електронний пучок може транспортуватися в технологічній камері на відстань більше ніж 1 м без помітної зміни його діаметра. Відхилення пучка забезпечується на кут до 25 градусів щодо осі гармати.

4.9. Технологічні можливості розроблених електронних гармат ВТР

При оцінюванні електронно-променевих систем технологічного призначення одним з основних показників, крім загальної потужності, є питома потужність в місці фокусування електронного пучка. Поряд із загальною потужністю вона визначає технологічні можливості системи як джерела енергії і служить якісним показником, який визначає її застосування.

В електронних гарматах, які формують сходяться пучки з поверхнею увігнутого катода, через відносно малої щільності струму збільшення загальної потужності вимагає збільшення емітує поверхні катода. При цьому для зменшення кута збіжності пучка доводиться збільшувати його фокусну відстань. Тому збільшення потужності гармати ВТР нерозривно пов'язано зі збільшенням поперечного розміру електронного пучка в місці його фокусування.

У таблиці 4.3 наведені усереднені параметри електронних пучків, що формуються гарматами ВТР в діапазоні потужності 1-600 кВт при прискореній напрузі до 40 кВ.

Таблиця 4.3 – Усереднені параметри електронних пучків, формованих гарматами ВТР

Як впливає з проведених в даній роботі досліджень, підтверджених також даними з літературних джерел, формуючих електронних пучків з діаметром близько 1 мм, що забезпечують потужність близько 106 Вт / см², можливо лише при потужності розряду одиниці кВт. При цьому мінімальний кут збіжності пучка на виході з гармати після магнітного фокусування може становити 3-50. Пучки з такими параметрами можуть використовуватися для електронно-променевого зварювання більшості конструкційних металів. Дослідження залежності геометричній формі проплавлених від параметрів зварювання і впливу цих параметрів на формування зварних швів показали, що внаслідок меншої питомої потужності і порівняно великого кута збіжності електронного пучка гармати ВТР забезпечують меншу глибину проплавлення, ніж термokatодна пушка, що не перевищує 5-10 мм.

У зв'язку з цим гармати ВТР можуть успішно застосовуватися для зварювання металів невеликих товщин, а також виробів з бортуванням зварюючих кромок, де не потрібне глибоке проплавлення, а такі переваги, як простота зварювального обладнання на основі гармат ВТР, його висока надійність і продуктивність, можливість використання в масовому і серійному виробництві робить електронні гармати ВТР більш вигідними порівняно з іншими типами гармат.

Перспективним застосуванням електронних гармат ВТР потужністю десятки кВт і більше є електронно-променеве випаровування при нанесенні різноманітних покриттів у вакуумі. Особливо ефективним є використання цих пушок для нанесення покриттів із з'єднань, що здійснюється в середовищі різноманітних газів. Можливість стійкої роботи гармат ВТР з різноманітними газами, включаючи активні, в діапазоні необхідних для таких процесів тиску, використання при цьому робочих газів одночасно для роботи пушки і як технологічні, що забезпечує їх активацію, створює умови для отримання покриттів стехіометричного складу з хімічно активними з'єднаннями.

При цьому потужність електронного пучка в десятки-сотні кВт забезпечує високу продуктивність процесів, що важливо при використанні гармат в сучасному промисловому виробництві.

Перспективним застосуванням гармат ВТР потужністю близько 100 кВт і вище є вирощування монокристалів тугоплавких металів і інших матеріалів. Досить широкий діапазон тисків в зоні розігріву матеріалу, гнучкість управління розподілом потужності електронного пучка в просторі і часі, надійність роботи обладнання і його висока продуктивність роблять електронні гармати ВТР більш вигідними для використання в цих процесах у порівнянні з термокатодними пушками.

Електронні гармати потужністю близько 500 кВт були розроблені для цілей електронно-променевої плавки металів. Електронно-променева плавка в сучасній металургії знаходить все більш широке застосування при виробництві особливо чистих сталей, хімічно активних і тугоплавких металів. При використанні в електронно-променевих установках для плавки гармат ВТР вирішальною є відносна простота і надійність обладнання на їх основі. При їх використанні не потрібно застосування високовакуумних насосів і роздільної відкачування гармат з технологічної камерою. Простотою відрізняються також високовольні джерела живлення і системи управління установками. Плавильні установки з гарматами ВТР прості і надійні в експлуатації, забезпечують високу продуктивність процесів плавки і якість виплавлених матеріалів, що має істотне значення, зважаючи на великі потужності виробництва електронно-променевої плавки.

Технологічні можливості розроблених гармат ВТР підтверджують їх успішну експлуатацію на підприємствах України, Росії, Вірменії при електронно-променевій плавці титану, молібдену, кремнію.

На Україні на базі гармат ВТР розроблені відповідні сучасним вимогам установки для електронно-променевого переплаву титану продуктивністю близько 2500 тон / рік, що дозволяють отримувати злитки вагою до 10 тон. Досвід експлуатації розроблених гармат ВТР в промислових умовах показав їх експлуатаційні та економічні переваги в порівнянні з традиційними джерелами нагріву.

Якщо порівнювати розроблені електронні гармати ВТР з термокатодними, які отримали найбільш широке застосування в електронно-променевих технологіях, то більшість їх параметрів порівнянні з параметрами

термокатодних гармат, а за такими параметрами, як термін служби катода, надійність роботи, простота пристрою і експлуатації, вони значно перевершують термокатодні гармати.

Це розширює сфери застосування електронно-променевих технологій, знижує вартість електронно-променевого обладнання, і, в кінцевому рахунку, собівартості виробленої продукції. Порівняльні характеристики розроблених електронних гармат ВТР і термокатодних гармат наведені в табл.5 Більш точні і адекватні оцінки ефективності використання джерел електронів ВТР можна отримати з використанням співвідношення.

Наведені варіанти застосування гармат ВТР не вичерпують їх технологічних можливостей. Вони можуть також ефективно вживатися і для інших цілей, наприклад відпалу, спікання, локального переплавки, термообробки стрічок та інших термічних процесів. Порівняння ефективності гармат ВТР і зображено у таблиці 4.4

Таблиця. 4.4 – Оцінки ефективності використання джерел електронів ВТР

Висновки до четвертого розділу

1. Проведено огляд конструкції сучасної електронно-променевої печі.
2. Проаналізовано схему та принцип дії електронно-променевих установок з кільцевим катодом та радіальними гарматами.
3. Розглянуто конструкцію і схему плавильної печі.
4. Аналіз і моделювання конструктивних особливостей зварювальних електронно-променевих гармат та гармат ВТР.
5. Порівняння конструкції розроблених електронних гармат ВТР технологічного призначення.
6. Визначення технологічних можливостей розроблених гармат ВТР.
7. Оцінено ефективність використання джерел електронів ВТР для плавлення танталу та цирконію.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

1. Було проведено огляд електронно-променевої технології, як галузі в фізиці. Проаналізовано переваги та сфери використання даної технології по відношенню з аналогами.
2. Наведено вольт-амперні характеристики електронної гармати ВТР при різних тисках.
3. Проведено порівняння електронно-променевих гармат ВТР різної потужності.
4. Визначено головні етапи розробки джерел електронів високовольтного тліючого розряду.
5. Описано властивостей електронно-променевих гармат високовольтного тліючого розряду.
6. Виявлено необхідний ряд систем для забезпечення постійної роботи газорозрядної гармати.
7. Описання принципу роботи газорозрядної гармати ВТР.
8. Загальний огляд історії та процесу електронно-променевого плавлення металу. Оцінка переваг та недоліків.

9. Було проаналізовано різноманітні види катодів, та обрано доречний для електронно-променевих гармат.
10. Визначення найкращого катоду з найбільшою емісійною здатністю при відносно низькій робочій температурі.
11. Проведено аналіз плавлення тугоплавких матеріалів за допомогою електронно-променевого переплаву.
12. Розраховано довжину вільного пробігу атомів металу за температури плавлення.
13. Розраховано розподіл електричного поля і траєкторій заряджених частинок.
14. Визначено положення і форми кордону анодної плазми з аналітичного співвідношення.
15. Розроблення методу для розрахунку просторового заряду.
16. Облік елементарних взаємодій частинок в розрядному проміжку і електродних процесів.
17. Моделювання транспортування електронного пучка з низького в високий вакуум.
18. Аналіз отриманих результатів.
19. Проведено огляд конструкції сучасної електронно-променевої печі.
20. Проаналізовано схему та принцип дії електронно-променевих установок з кільцевим катодом та радіальними гарматами.
21. Розглянуто конструкцію і схему плавильної печі.
22. Аналіз і моделювання конструктивних особливостей зварювальних електронно-променевих гармат та гармат ВТР.
23. Порівняння конструкції розроблених електронних гармат ВТР технологічного призначення.
24. Визначення технологічних можливостей розроблених гармат ВТР.
25. Оцінено ефективність використання джерел електронів ВТР для плавлення танталу та цирконію.

SUMMARY

Gas-discharge electronic gun for melting metals. Bachelor's degree in 6.050802 - "Electronic devices and systems" specialization "Electronic devices and devices". Salamatin Dmitry Vitalievich. NTUU "KPI named after Igor Sikorsky". Faculty of Electronics, Department of Electronic Devices and Devices.

Thesis report: p. 82, illu.18, Table. 6, source.37

The object of research of the thesis is a gas-discharge electron-beam gun for melting metals.

The purpose of the work is to develop a technological gas-discharge electronic gun VTR, designed for melting metals, in particular titanium and zirconium.

In this thesis was developed a gas-discharge electron-beam gun for melting metals based on high-voltage glow discharge, as well as a review of methods of melting metals, modeling the energy parameters of electronic devices VTR. The possibilities of using technological guns of high-voltage incandescent discharge in our time are analyzed.

Keywords: ELECTRONICS, ELECTRONIC BEAM FUEL, ELECTRONIC CANNON, METAL FUEL, HIGH VOLTAGE GREATING DISCHARGE.

Electron beam processing helps us to immediately obtain products of the desired shape. Electron-beam guns are an effective tool for implementing these technologies in production, and on the other hand, they are part of electron-beam installations, namely melting furnaces. Usually electronic guns work as follows. Under the action of high temperature, namely the heating of the cathode of tungsten or tantalum, electrons are emitted, which in the electric field, on the way between the cathode and the anode, acquire the necessary acceleration.

Currently, two schemes of electron-beam guns are used for melting metals: with a ring cathode and with an anode, which is a molten metal, as well as with anodes of another type. To melt a certain material, it is first placed in a special furnace, where, as a result of bombarding its surface with electron beams, which come immediately from 2-3 guns, the metal melts. The molten metal may enter the mold immediately or be temporarily in an intermediate vessel from which it will be poured into the mold. Therefore, the main advantage of using vacuum and high temperature is that the metal is completely cleaned of impurities.

1. Typical advantages and features of electron beam melting technology are as follows.
2. The process of melting and other technological operations with the material is carried out in a vacuum, which, in turn, reduces metal contamination.
3. A powerful electron beam can have a power density of up to 10^9 W / cm^2 .
4. Ability to adjust the size of the electron beam and, if necessary, the ability to focus it to an extremely small value, namely to micron particles.
5. Ability to fully automate the process, which, in turn, gives ease of management and the ability to fully program almost the entire process with the exception of the human factor.
6. Versatility of the electron beam as a technological tool that allows the use of electron beam melting devices for different needs and in different places.
7. Obtaining high efficiency, which leads to a very high performance of the equipment.

The essence of the process of electron-beam impact on matter is that the kinetic energy formed in a vacuum in one way or another electron beam, pulsed or continuous, in the processing zone is converted into heat. Since the ranges of power and energy concentration in the beam are large, all types of thermal effects on materials are possible: heating to set temperatures, melting and evaporation at very high speeds.

Currently, no industry related to the production, connection and processing of materials can do without electron beam heating. This is due to the characteristic advantages of this method, the main of which is the possibility of energy concentration from 10^3 to $5 \cdot 10^8 \text{ W / cm}^2$.

To control the modes of operation of electron beam guns with anode plasma, it is necessary to change the accelerating voltage or plasma density. The plasma density in the gun can be changed in two ways: first, by changing the pressure, and

secondly by using an auxiliary discharge, for this purpose, in fact, in the plasma and using a control electrode, which supplies a low positive or negative potential relative to the anode.

Electron beam melting is usually the transition from a solid to a liquid state of a metal or alloy under the action of heating in a so-called "furnace", which is due to the conversion of kinetic energy of electrons into heat when colliding with the surface of the material.

The possibility of beam melting was first shown to mankind in 1879 by William Crookes, a prominent English chemist and physicist who had discovered a chemical element such as thallium 18 years earlier. William melted the platinum cathode with a cathode ray tube. Although the first ingots began to be smelted only in the early 20th century. And for practical industrial application, this method was allowed 50 years later, when these devices began to need leading areas such as nuclear and aerospace.

Structurally, 2 types of cathodes are made for welding electronic guns: the cathode is made directly channel, the cathode with indirect heating. The first are easier to manufacture, although they have a list of disadvantages.

First of all, it is difficult to ensure the correct geometric shape of the simulating surface. To all this we can add the fact that when the cathode is heated by current, a magnetic field is created, which in turn deflects the flow of electrons from the axis of the searchlight. When the cathode is heated by alternating current, the magnitude and direction of the magnetic field change, which results in a round magnetic cross section of the beam which degenerates into a line.

When heating the cathode with direct current, the axis of the beam shifts relative to the geometric axis of the searchlight. Therefore, higher emission densities are achieved in cathodes with indirect heating and they are equipotential. Direct channel cathodes should be used in devices with low current densities and short periods of operation.

Metals of the IVA group of the periodic system DI Mendeleev - titanium, zirconium and hafnium - are an excellent trio of chemically active metals. Their industrial application is associated with the development of new technologies: chemical and aerospace industries, nuclear energy and others. Their chemical properties are close, which causes some difficulties in separating from each other, but their application is fundamentally different due to the peculiarities of physical properties. Titanium is a light metal with a density of 4.5 g / cm³. Titanium alloys have low weight, which in combination with high strength properties makes them indispensable in aerospace engineering.

Zirconium, having a small cross section of thermal neutron capture, relatively high melting point, high radiation and corrosion resistance, is one of the main metals used as components of alloys for fuel elements of nuclear reactors.

Hafnium has a very large neutron absorption cross section, and has recently been used for control rods and emergency reactor protection rods. All three metals have excellent corrosion resistance in a wide range of aggressive environments. Their corrosion resistance is much higher than that of stainless steels and close to tantalum.

Therefore, all three metals are successfully used in chemical engineering: seawater and strong oxidizing media for titanium, strongly deoxidizing media for zirconium and hafnium.

A program was also created, part of which is given in paragraph 3, which is used to simulate the process of heating aluminum in a copper water-cooled crucible. The calculations were performed according to the formulas listed above with the geometric and thermal parameters of the heating process, given in table 5. It can be seen and the parameters necessary for further calculations of the melting and evaporation processes. no. In the design of the gun used for melting titanium, zirconium and hafnium with a capacity of 500 kW, much attention is paid to heat dissipation from the electrodes and the path of the beam, which is a unit of kW and more.

Due to the relatively large transverse size of the electrodes, the gun body is made in the form of two cylindrical parts. In the upper part of the housing is mounted a cathode assembly, and the lower part of the housing, together with the copper base, form an anode cavity.

The aluminum cathode is made with a cavity for the passage of water, in which a conical water flow distributor is installed. The working surface of the cathode is made in the form of a part of a sphere with a radius of 150 mm. The cathode is covered with a cylindrical electrode made of stainless steel and with the help of a water cooling stand mounted on a high-voltage insulator.

Particular attention in the development of the design of the gun was paid to the passage of the electron beam into the hole of the copper base of the anode and the beam. This is due to the fact that with a large absolute value of the strength of the gun, a small leakage current on the anode stand or the radiator causes their penetration. Therefore, the system of electrodes and the water-treatment path of the beam is worked out so that the maximum power loss at the electrodes does not exceed 5% of the total discharge power.

Схожість

Схожість із джерелами з Інтернету

32

1	http://uk.x-pdf.ru/5fizika/1418599-63-cistema-naukovo-tehnichnih-rozrahunkiv-matlab-ii-vikorisannya-dlya-rozvyazk	2 Джерело	3.16%
2	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28900/1/Mieshkova_magistr.pdf		1.83%
4	http://uk.x-pdf.ru/5informatika/270457-22-i-melnik-cistema-naukovo-tehnichnih-rozrahunkiv-matlab-ii-vikorisannya-dlya-rozv...		0.67%
5	http://uk.x-pdf.ru/5informatika/270457-21-i-melnik-cistema-naukovo-tehnichnih-rozrahunkiv-matlab-ii-vikorisannya-dlya-rozv...		0.63%
6	https://otherreferats.allbest.ru/manufacture/00652097_0.html		0.4%
7	https://docplayer.net/73953805-Reaktori-i-parogeneratori-energoblokiv-aes.html		0.29%
8	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28946/1/2019-bachelor-EDD_Hrytsenko_Systema%20keruvannya%20strumom%20haz...		0.17%
9	https://ua-referat.com/%D0%95%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BD%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%...		0.17%
11	https://studopedia.su/8_52206_rozdil--zvaryuvalne-virobnitstvo.html	2 Джерело	0.13%
12	https://studopedia.su/8_52448_konstruktsii-elektronno-promenevih-ustanovok.html		0.1%
13	https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/1429/43202.pdf?sequence=1&isAllowed=y		0.09%
17	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28812/1/Melnyk_bakalavr.pdf	14 Джерело	0.07%
18	https://studfile.net/preview/433579/page:29		0.07%
19	http://ua.co.ua/manufacture/qa2ad79b4d53a88521216c27_1.html		0.06%
21	https://en.glosbe.com/en/en/neutron%20absorption%20cross-section		0.06%
22	http://eds.kpi.ua/wp-content/uploads/2020/06/Blank_Diplom_Bachalavr2020.docx		0.06%
23	https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/28343/1/Podkhaliuzin_bakalavr.pdf		0.06%

Схожість по Бібліотеці акаунту

63

3	MazankoTO_ZPlzp73_bakalavr_2020	ID файлу: 1003601224	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv...	0.93%
10	Студентська робота	ID файлу: 1000766216	Institution: Cherkasy State Technological University	0.14%

14	Вербіцький_бак	ID файлу: 1003785959	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytec	7 Джерело	0.09%
15	Венгер_маг	ID файлу: 1000745864	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic	36 Джерело	0.08%
16	Луденя Гуаман	ID файлу: 6023586	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic	6 Джерело	0.07%
20	Студентська робота	ID файлу: 1000766215	Institution: Cherkasy State Technological University		0.06%
24	2020-bachelor-EDS_Tymchyk_sonyachni_elementy_fch	ID файлу: 1004030969	Institution: National Technical	10 Джерело	0.06%
25	127732-272844-1-RV (1)	ID файлу: 6838889	Institution: National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Ins...		0.06%