▶------ ПРИКЛАДНАЯ ФИЗИКА И МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

УДК 621793.7



СЖАТЫЙ ВАКУУМНО-ДУГОВОЙ РАЗРЯД И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ ДЛЯ НАГРЕВА ИЗДЕЛИЙ В ВАКУУМНЫХ ПЕЧАХ ОТЖИГА И ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Л.П. Саблев*

В.М. Шулаев*

Р.И. Ступак*

А.М. Чикрыжов*

*ННЦ "Харьковский физико-технический институт" ул.Академическая, 1, г.Харьков, Украина

1. Введение

В существующих печах вакуумного отжига наиболее часто используется омический нагрев изделий. Поскольку в условиях вакуума передача тепла от нагревателя к изделиям конвекцией, естественно, отсутствует, а в диапазоне температур 20...600 °С весьма неэффективна, то время нагрева относительно велико, а значительное количество энергии, выделяемой нагревателем, расходуется на нагревание стенок камеры, охлаждаемых водой. Подведение энергии непосредственно к обрабатываемым изделиям является наиболее эффективным путём их нагрева, что возможно за счёт использования вакуумно-дугового разряда.

Как общеизвестно, в межэлектродном пространстве вакуумной дуги в присутствии газа содержатся электроны, ионы металла и газа, их атомы и молекулы в различной степени возбуждения, т.е. газо-металлическая плазма [1, 2].

Для плазменной обработки изделий в вакууме был создан двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд (ДВДР), который представляет собой разряд, в котором положительный столб дуги разделён на две ступени. Первая ступень состоит из газо-металлической плазмы, примыкающей к катоду, а вторая ступень – положительный столб дугового разряда в плазме рабочего газа низкого давления, примыкающая к аноду дугового разряда. [1-4].

Газовая плазма ДВДР может быть использована для целого ряда вакуумно-плазменных процессов, таких как: вакуумный прогрев изделий электронами, азотирование, плазмохимическая обработка, ионная очистка поверхностей, предшествующая процессу нанесения покрытия и т.п.

Однако разряд с размещенными в одном пространстве электродами (анодом и катодом) не обеспечивает высокой степени ионизации рабочего газа. При больших значениях электронного тока в разряде (электронная эмиссия с поверхности катода ограничивается только параметрами внешней цепи и теплофизическими свойствами катода) энергия электронного компонента плазмы в положительном столбе разряда составляет всего несколько электрон-вольт [2]. Такая энергия явно недостаточна для ионизации газовой молекулы прямым электронным ударом (возможна только ступенчатая ионизация газовой молекулы и ионизация в результате перезарядки при ион-молекулярных столкновениях). Повысить энергию электронов за счёт увеличения напряжённости электрического поля в разрядном промежутке не представляется возможным, так как вольтамперная характеристика вакуумно-дугового разряда имеет вид прямой, слабо наклонённой к оси напряжений, в широком интервале значений тока. Увеличить междуэлектродное напряжение возможно с помощью магнитных полей, направленных нормально электрическому полю (скрещенные электрические и магнитные поля). Это вызывает определенные конструктивные затруднения, в силу чего данный способ увеличения энергии электронов не нашёл практического применения в реальных вакуумно-дуговых технологических установках.

Кроме того, в газовой части двухступенчатого разряда трудно обеспечить равномерную обработку большой группы изделий.

Для увеличения степени ионизации и диссоциации технологических газов, применяемых при химикотермической обработке, увеличения подводимой к изделиям мощности и обеспечения равномерности их нагрева был разработан сжатый вакуумно-дуговой разряд (СВДР). Сущность этого разряда заключается в том, что положительный столб вакуумной дуги с холодным катодом перегородкой 1 с системой отверстий 2 разделён на катодную 3 и анодную 4 области (рис.1).



Рисунок 1. Схема формирования СВДР: 1 — перегородка; 2 — отверстие; 3 — катодная область СВДР; 4 — анодная область СВДР; 5 — область падения напряжения в плазме (область ускорения), 6 — поток ускоренных электронов

В отверстиях 2 сечение положительного столба плазмы существенно уменьшается, вследствие чего возрастает сопротивление плазменного столба в зоне 5 отверстий, и, как следствие, увеличивается падение напряжения в этой зоне. Электроны газо-металлической плазмы (области 3) в возросшем падении напряжения приобретают дополнительную энергию, которая используется для ионизации газа в прианодной области 4 вакуумной камеры и для нагрева изделия, являющегося в данном случае анодом СВДР. Электроны в виду незначительности своей массы не производят распыления поверхности анода-изделия.

На рис. 2 приведены фотографии СВДР в анодной и катодной областях установки.



Рисунок 2. Фотографии СВДР в анодной и катодной областях установки

Струи в анодной области по мере удаления от отверстий теряют свою интенсивность за счёт соударений с молекулами нейтрального газа и ионизации последнего. Сближение струй, отчётливо просматриваемое на рисунке, происходит в результате взаимодействия магнитных полей, индуцируемых двумя параллельными электронными потоками, движущихся в одном направлении. При количестве отверстий более двух, сближаются струи, исходящие из крайних отверстий

Зона в катодной области, в которой наблюдается рост напряжённости электрического поля, характеризуется повышенным свечением газа из-за увеличения сечения ионизации. и концентрации в этой области актов ионизации и возбуждения молекул газа. Чем больше величина тока СВДР, тем более протяжённая эта зона свечения. Зона невозмущённой плазмы, в которой напряжённость электрического поля невелика, на рисунке имеет вид однородного более тёмного свечения

Целью работы является экспериментальное подтверждение целесообразности использования СВДР для нагрева изделия в вакуумных печах отжига и установках химико-термической обработки изделий.

2. Результаты экспериментов и их обсуждение

Экспериментальная установка изображена на рис 3. Установка содержит цилиндрический титановый катод 1 диаметром 150 мм и высотой 100 мм. Катод установлен внутри охлаждаемой водой эмиссионной камеры 2 диаметром 250 мм и высотой 300 мм, соединённой с рабочей камерой 3. Вблизи места соединения двух камер находится перегородка 4 с системой отверстий 5 различной конфигурации. Напротив отверстий расположен анод 6 СВДР. Анод выполнен в виде сплошного медного цилиндра диаметром 200 мм и высотой 76 мм. Масса цилиндра 21,3 кг. Цилиндр окружён тройным теплозащитным экраном 9 из листовой нержавеющей стали. Цилиндр служит для калориметрических измерений. Электропитание ускорителя электронов осуществляется от двух выпрямителей с жёсткой характеристикой 10 и 12, выполненных по трёхфазной мостовой схеме (схеме Ларионова) и двух трёхфазных силовых трансформаторов 11 и 13. Параметры выпрямителей: выпрямитель 10 напряжение 40 В, ток до 150 А; выпрямитель 12 – напряжение 200 В, ток до 120 А.



Рисунок 3. Схема экспериментальной установки с вакуумно-дуговым ускорителем электронов: 1 — катод; 2 — эмиссионная камера; 3 — рабочая камера; 4 — перегородка; 5 — отверстия; 6 — анод; 7 — термопара; 8 — потенциометр; 9 — теплоизолирующий экран; 10 — выпрямитель эмиттера электронов; 11 — трёхфазный трансформатор; 12 — выпрямитель СВДР; 13 — трёхфазный трансформатор; 14 и 15 — сварочные балластные реостаты РБ 300

Установка работает следующим образом. После достижения в рабочей камере 3 низкого вакуума `(~ 0,001 Па) в камеру 3 напускают аргон до давления 0,1-1 Па. При включении источника питания 10 эмиттера электронов между катодом 1 и внутренними стенками эмиссионной камеры 2 (анодом эмиттера электронов) возбуждается вакуумно-дуговой разряд. При включении источника питания 12 СВДР возникает электрическое поле между анодом 6 и газо-металлической плазмой в эмиссионной камере 2. Электроны газо-металлической плазмы из эмиссионной камеры 2 ускоряются в электрическом поле вблизи отверстия 5 и ионизируют рабочий газ в камере 3, образуя в ней плазму рабочего газа, и прогревают изделие 5.

Типичная вольтамперная характеристика СВДР приведена на рис. 4. Особенностью этой характеристики является наличие тока насыщения. В диапазоне напряжений разряда 50...100 В происходит стабилизация тока разряда. Дальнейшее увеличение напряжения не приводит к заметному увеличению тока разряда. Следствием стабильности тока с увеличением напряжения является пропорциональный величине напряжения рост мощности электронного потока. Это обстоятельство позволяет регулировать мощность прогрева (путём изменения напряжения на разряде), не изменяя стабильности разряда, в основном определяемой величиной тока.



Рисунок 4. Вольтамперная характеристика СВДР. 16 отверстий диаметром 11 мм

Как видно из рис. 5 в рабочем диапазоне давлений аргона (0.1–1 Па) ток СВДР пропорционален давлению. Это обстоятельство существенно для регулировки мощности нагрева. Изменяя величину рабочего давления можно регулировать мощность электронного потока.

Определение коэффициента использования подводимой к электродам электрической мощности проводилось в установке, схематически изображённой на рис. 3. Расстояние между торцом медного цилиндра и перегородкой с отверстиями составляет 50 мм, в перегородке имелось 12 отверстий диаметром 12 мм.



Рисунок 5. Зависимость тока насыщения от величины давления аргона. Эмиссионная камера имеет 16 отверстий диаметром 11 мм

Были заданы близкие к максимальным для данной установки параметры разряда, а именно, суммарное напряжение двух источников питания 240 В, ток СВДР – 90 А. Давление аргона в камере поддерживалось на уровне 0,7 Па. При этих параметрах снята зависимость изменения температуры медного цилиндра от времени. Полученная кривая сравнивалась с кривыми изменения температуры, полученными расчётным путём для различных мощностей нагрева. (При расчётах степень черноты медного окисленного цилиндра была принята – 0,8). Расчётные и экспериментальные графики приведены на рис 6.



Рисунок 6. Графики зависимости изменения температуры медного цилиндра от времени нагрева. Цифры у расчётных кривых показывают мощность нагрева в кВт. Жирная кривая — экспериментальная

Сравнение экспериментальной кривой и расчётными показывает, что экспериментальная кривая практически совпадает с расчётной кривой, полученной для 15 кВт. Таким образом установлено, что в условиях эксперимента на нагрев медного цилиндра расходуется 15 кВт, что соответствует 3 70% общей подводимой мощности (21,6 кВт). Совершенно очевидны энергетические потери в эмиссионной камере, идущие на испарение катода, ионизацию газа и металлического пара в ней, а также эмиссию электронов (P = Uэмит.*I =1,8 кВт). Кроме того, часть подводимой энергии затрачивается на балластном резисторе (Рбал. = I2 R = 1,8 кВт). Остаётся невыясненной доля 13% подводимой энергии. Можно предположить, что она утилизируется на стенках рабочей камеры при рекомбинации на ней ионов плазмы рабочего газа.

Фотография реальной картины эксперимента изображена на рис.7.



Рисунок 7. Фотография эксперимента по определению мощности нагрева изделий

3. Схемы печей отжига и химико-термической обработки

Устройство (рис. 8 и 9) содержит откачиваемую цилиндрическую рабочую камеру 1 (средства откачки на чертеже не показаны), в которой установлен держатель 2 длинномерных изделий 3. Катод 4 вакуумно-дугового разряда установлен у нижнего торца цилиндрической эмиссионной камеры 5 с отверстиями 6, выполненными вдоль образующей цилиндра напротив протяжённых изделий. Эмиссионная камера 5 охватывается изделиями 3 и электрически связана с вакуумной камерой 1. Источник питания 7 вакуумно-дугового разряда отрицательным полюсом соединён с катодом 4, а положительным через балластный резистор – с вакуумной камерой 5. Источник питания 7 СВД разряда подключен к держателю изделий 2, а отрицательным – к катоду 1. Экраны 8 предотвращают нагрев стенок камеры излучением от изделий и частично отражают излучение к изделиям. Такую конструкцию вакуумной печи целесообразно использовать для нагрева изделий, у которых поперечный размер меньше высоты.



б)

Рисунок 8. Конструктивная схема вакуумной печи с центральным расположением эмиссионной камеры: а) фронтальное сечение, б) сечение по плоскости А-А: 1 — вакуумная камера; 2 — планетарный механизм вращения прогреваемых изделий; 3 — нагреваемые изделия (анод СВДР); 4 — катод СВДР; 5 — эмиссионная камера; 6 — отверстия в цилиндрической перегородке эмиссионной камеры; 7 — источник питания СВДР; 8 — экраны

Для нагрева изделий с диаметром, превышающим их длину, более целесообразно применять конструкцию, изображённую на рис. 9. В этой схеме цилиндрические стенки эмиссионной камеры с отверстиями окружают прогреваемое изделие.

Представляет интерес аналогичная конструкция печи, в которой на стенках эмиссионной камеры конденсируется испаренный материал катода (например, титан), и эти стенки служат откачивающей поверхностью. По сути, эмиссионная камера помимо своей основной цели, как эмиттера электронов, выполняет также роль сорбционного насоса (рис. 10), аналогичного описанному в [11].



Рисунок 9. Конструктивная схема печи с эмиссионной камерой, охватывающей поверхность прогреваемого изделия.

1 — вакуумная камера; 2 — держатель изделия;
3 — прогреваемое изделие (анод СВДР); 4 — катод СВДР;
5 — стенка эмиссионной камеры, охватывающая изделие;
6 — отверстия; 7 — источник питания СВДР



Рисунок 10. Конструктивная схема печи, в которой внутренние стенки эмиссионной камеры играют роль сорбционного высоковакуумного насоса

Выводы

Использование сжатого вакуумно-дугового разряда позволяет нагревать непосредственно изделия потоком ускоренных электронов, регулируя подводимую мощность изменением тока разряда и давления технологического газа. Такая система нагрева позволяет достигнуть величины коэффициента полезного использования энергии до 70 %. Предложены различные конструктивные схемы печей для термической обработки изделий.

Авторы благодарны Андрееву А.А. за участие в обсуждении результатов исследований и написании статьи.

Литература

- Вакуумно-дуговые устройства и покрытия: Монография / [А.А. Андреев, Л.П. Саблев, В.М. Шулаев, С.Н. Григорьев]. – Харьков: ННЦ «ХФТИ», 2005.– 236с.
- Н.С.Ломино, В.Д.Овчаренко, Г.Н.Полякова, А.А.Андреев, В.В.Шулаев. Межэлектродная плазма вакуумной дуги в атмосфере азота // Сб. докл. 3-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», Харьков, 2002, с. 202–222.
- L.P.Sablev, A.A.Andreev, S.N.Grigoriev, A.S.Metel. Method and device for treatment of products in gas-discharge plasma. Pat.USA 5.503.725, МПК C23c 14/34; C23c 14/32, заявл. 23.04.1992, опубл. 02.04.1996.
- А.О. Андреєв, И.В. Бубнов, А.С. Верещака, В.Г. Падалка, Л.П. Саблєв, Р.И. Ступак. Засіб хіміко-термічної обробки виробів. Патент України № 8620, С23С 14/48, заявл. 16.01.1985, опубл. 30.09.1996. Бюл. № 3.
- Л.П. Саблев, Н.С. Ломино, Р.И. Ступак, А.А. Андреев, А.М. Чикрыжов. Двухступенчатый вакуумно-дуговой разряд: характеристики и методы создания // Сб. докл. 6-й Межд. конф. «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов», Харьков, 2005, ч. 2, с. 159–169.
- Л.П.Саблев, А.А.Андреев, Р.И.Ступак, В.М.Шулаев. Нагрев материалов потоками электронов из плазмы вакуумно-дугового разряда с холодным катодом. // Сб. докл. 3-ей Межд. конф. ОТТОМ-3, Харьков, 2002, ч.1, с. 38–44.
- Л.П. Саблев, А.А. Андреев, Г.Н. Картмазов, В.М. Шулаев, Р.И. Ступак, А.М. Чикрыжов. Некоторые характеристики сжатого дугового газового разряда с плазменным катодом // Сб. докл. Харьковской нанотехнологическоцй ассамблеи, Харьков, 2006, с. 158–162.
- Шулаев В.М., Саблев. Л.П., Андреев А.А., Столбовой В.А. Сжатый вакуумно-дуговой разряд для синтеза полимероподобных плёнок а-С:Н // Сб. докл. Харьковской нанотехнологической ассамблеи, Харьков, 2007, т. 2, с. 220–226.
- Андреев А.А, Шулаев В.М., Неклюдов И.М., Саблев Л.П. Вакуумно-дуговые нанотехнологии модифицирования поверхности металлоизделий // Сб. докл. 8-го Междунар. Конгресса «Оборудование и технологии термической обработки металлов и сплавов». – Харьков.–2007. – т. 2. – с. 6–18.
- Патент України на корисну модель №25285, С23С8/00. Установка для вакуумно-плазмової обробки виробів. Л.П. Саблєв, А.О. Андреєв, С.Н. Грігор'єв, В.М. Шулаєв, РІ. Ступак. – 2007. – Заявл. 20.11.06, опубл. 10.08.07. Бюл. № 12.
- 11. Л.П. Саблев, Ю.И. Долотов, Е.Г. Гольдинер, Л.И. Гетьман, С.А. Круглов, В.Н. Луценко. Электродуговой сорбционный агрегат ВЭД-1. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Физика и техника высокого вакуума, 1973, вып. 1 (1), с. 21–22.