

Тепловой режим катодов технологических источников плазмы с различным типом охлаждения

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ»

Рассмотрен тепловой режим катодов вакуумно-дуговых источников плазмы с различным типом охлаждения. Исследовано стационарное температурное поле катода с охлаждением как по торцевой, так и по боковой поверхностям при различной геометрии катода и плотности теплового потока на его рабочую поверхность. Выявлена неравномерность распределения температуры рабочей поверхности катода по его радиусу. Эта неравномерность больше для катода с охлаждением по боковой поверхности, и ее можно минимизировать до уровня нескольких градусов изменением геометрии катода. Определены зависимости времен выхода катодов на установившийся температурный режим с разным типом охлаждения от геометрии катода и тока дуги.

Ключевые слова: катод вакуумно-дугового источника плазмы, стационарное температурное поле катода, время выхода на установившийся тепловой режим.

1. Введение

При анализе рынка вакуумного оборудования и технологий нанесения износостойких, упрочняющих и других покрытий, выполненном в [1], отмечается стремительный его рост (10-15% в год). Здесь же сказано, что особенностью таких технологий является низкая стоимость сырья и высокая стоимость технологии в конечном продукте. Рыночная стоимость 1 кг товарной продукции, производимой с помощью пучковых технологий, составляет 10–30 тыс. дол. США, что в 1000 раз выше, чем в машиностроении, и на порядок выше, чем в микроэлектронике.

Вместе с тем анализ достижений ведущих компаний по разработкам покрытий, оборудования и технологий их получения развитых стран (Balzers, Semicon, Metaplas, Leybold, Platit и др.), использующих физические методы нанесения покрытий (PVD), а также разработок научных центров стран СНГ, выполненный специалистами НПО «Сатурн» [2], показал, что до настоящего времени в России и за рубежом фактически не созданы процессы и технологии формирования наноструктурированных покрытий многослойно-композиционных покрытий широкого применения для изделий машиностроения и, в частности, для режущего и штамповочного инструмента. Одной из причин этого является наличие в плазменном потоке, генерируемом вакуумно-дуговыми источниками плазмы, большого количества микрочастиц.

Основным параметром, определяющим количество микрочастиц в плазме, является температура рабочей поверхности катода T_p . При проектировании источников плазмы уделяют большое внимание величине T_p , обеспечивая эмпирическим путем компромиссное решение по минимизации T_p при одновременном обеспечении значений других параметров (по запасу материала катода, удобству его замены и др.) на приемлемом уровне. Работы, в которых исследованы тепловые режимы катода вакуумно-дугового источника плазмы в различных режимах, на данный момент отсутствуют.

Целью статьи является исследование теплового режима катода вакуумно-дугового источника плазмы при его охлаждении как по торцевой, так и по боковой поверхностям при различной геометрии катода и плотности теплового потока на его рабочую поверхность, а также времени выхода катода с разным типом

охлаждения на установившийся температурный режим.

2. Состояние вопроса к настоящему моменту

Экспериментальные данные, полученные для дуги с титановым катодом в работе [3], указывают на то, что влияние интегральной температуры на скорость и характер эрозии весьма существенно. Так, при неудовлетворительном теплоотводе с нерабочего торца стержневого катода (между катодом и переходником – порошкообразный графит) скорость эрозии увеличивается более чем в 5 раз по сравнению с катодом, имеющим прямое охлаждение. К сожалению, в работах [3, 4 и др.] прямые данные о температуре катода и соответствующие ей скорости его эрозии, за исключением отдельных точек, отсутствуют.

В [5] исследованы возможности и особенности регулирования и стабилизации температуры рабочей поверхности катода с охлаждением его как по торцевой, так и по боковой поверхности. Разработаны конструкции катодных узлов, в которых управление температурой рабочей поверхности катода может осуществляться путем изменения температуры охлаждаемого торца катода, тока вакуумно-дугового разряда, определяющего плотность теплового потока на катод, а также расстоянием между рабочей поверхностью катода и зоной его охлаждения за счет перемещения катода. Однако температура рабочей поверхности катода и время выхода на стационарный тепловой режим катода при различном типе охлаждения в зависимости от его геометрии и тока вакуумно-дугового разряда в [5] не изучены.

Разработанный в [6] вакуумно-дуговой источник плазмы характеризуется низким содержанием микрочастиц в создаваемом им плазменном потоке. Такая его особенность достигнута использованием дискового катода с начальным отношением диаметра D к толщине L , равным $D/L=4$. Температура рабочей поверхности катода при этом не превышает 500 К. При работе источника плазмы с катодом данной геометрии соотношение D/L постоянно увеличивается, что приводит к понижению температуры рабочей поверхности катода и изменению состава генерируемого плазменного потока.

Для получения покрытий с воспроизводимым составом в [7] между циклами напыления осуществляется периодическое уменьшение диаметра канавки в теле стержневого катода вблизи его охлаждаемой поверхности. Основным недостатком такого подхода является необходимость выполнения сложной и трудоемкой операции разборки-сборки катодного узла источника плазмы после каждого цикла обработки, что снижает производительность процесса. Более рациональным подходом поддержания постоянной температуры рабочей поверхности катода в отдельном цикле напыления является метод изменения расхода охлаждающей жидкости, предложенный в [5].

Существенное увеличение запаса плазмообразующего материала катода обеспечивается в конструкциях вакуумно-дуговых источников плазмы с охлаждением катода по боковой поверхности [8]. Такое решение позволяет перемещать катод по мере его выработки, за счет чего снимаются ограничения по запасу материала катода. Кроме того, поскольку при этом расстояние между рабочим торцом катода и зоной охлаждения не меняется, происходит стабилизация температуры рабочей поверхности катода. Однако при практической реализации источников плазмы подобного типа открытым остается вопрос о геометрии катода (его радиусе), поскольку с ростом радиуса катода

следует ожидать повышения неравномерности распределения температуры по его рабочей поверхности.

3. Постановка задачи

Моделирование температуры катода с разным типом охлаждения выполнялось на основе разработанных моделей, схематично показанных на рис.1 и 2.

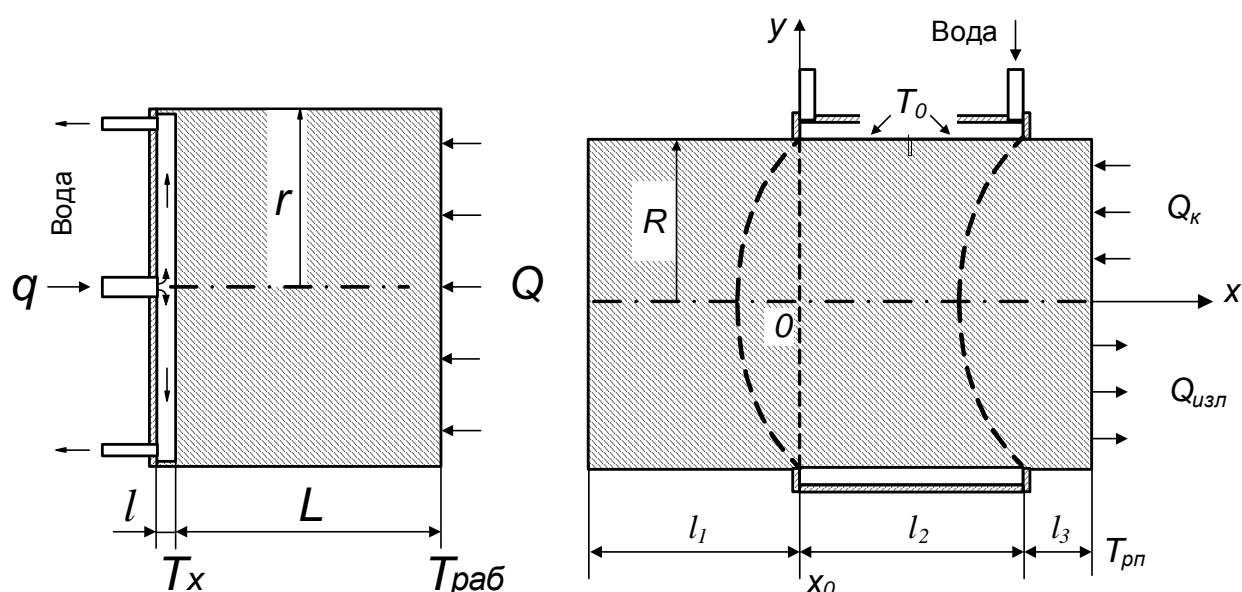


Рис. 1. Модель тепловых процессов на катоде с охлаждением по нерабочему торцу

Рис. 2. Модель тепловых процессов на катоде с охлаждением по боковой поверхности

В моделях были приняты следующие допущения:

- тепловой поток Q_k , поступающий на катод, распределен равномерно по его рабочей поверхности;
- объемный источник тепла $Q_{вн} \ll Q_k$, и им пренебрегаем;
- для расчетов использовали усредненные для рассматриваемого диапазона температур удельную теплоемкость c , теплопроводность λ титана, что обуславливает погрешность не более 10%.

В случае катода с охлаждением по торцевой поверхности учитывали потери энергии за счет излучения с его рабочей и боковой поверхностей. В случае катода с охлаждением по боковой поверхности, кроме потерь энергии излучением, учитывали конвективный теплообмен в зоне после участка охлаждения. Расчеты температур выполняли методом конечных элементов для катода из титана.

4. Результаты исследований и обсуждения

4.1. Температурный режим катода с охлаждением по торцевой поверхности

Результаты расчета температурных полей на рабочей катода при различных: длине катода L , его радиусе R , токах дуги I_d показаны на рис. 3 – 5.

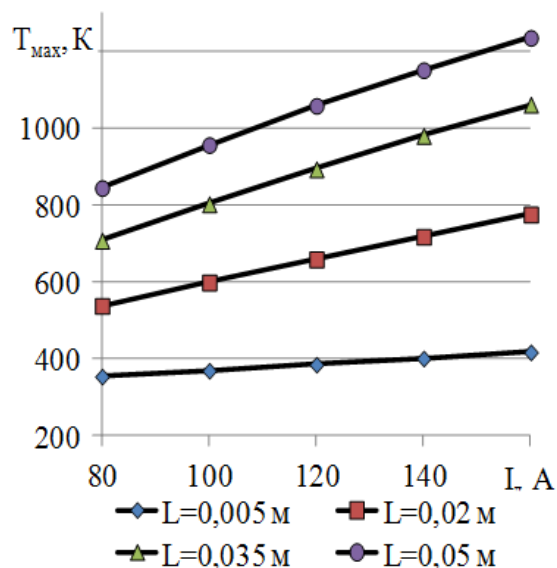


Рис. 3. Максимальная температура рабочей поверхности катода с охлаждением по торцу в зависимости от тока дуги: $R = 0,03$ м

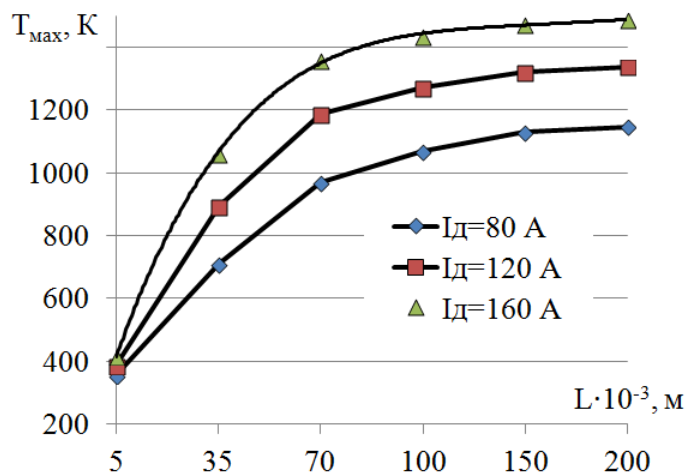


Рис. 4. Максимальная температура рабочей поверхности катода с охлаждением по торцу в зависимости от его длины: $R = 0,03$ м

С увеличением тока дуги I_d возрастает мощность P_k , выделяющаяся на катоде, что приводит к возрастанию максимальной температуры рабочей поверхности катода (рис. 3). Рост температуры при этом линейный, а скорость роста прямо пропорциональна длине катода L и обратно пропорциональна его радиусу R . При значительном увеличении длины катода (при $R = 0,03$ м $L > 0,035$ м) начинают существенно влиять потери энергии с рабочей поверхности катода вследствие излучения, что приводит к замедлению роста температуры (рис. 4). При $L = 0,30$ м потери энергии сравниваются с энергией, поступающей на катод, и устанавливается стабильная температура рабочей поверхности катода, соответствующая значению 1695 К. При больших радиусах катода стабилизация температуры происходит при большей длине катода.

С увеличением радиуса катода температура рабочей поверхности катода падает, причем тем быстрее, чем больше длина катода, что связано с уменьшением удельной мощности, поступающей на поверхность катода.

Потери энергии за счет излучения с боковой поверхности катода приводят к неравномерному распределению температуры по радиусу рабочей поверхности катода – с максимальным значением в центре катода и минимальным на расстоянии, равном радиусу катода. При малых длинах катода этот перепад температур ΔT незначителен (при $L = 5$ мм – порядка нескольких сотых градуса, при $L = 10$ мм не превышает 0,65 градуса – рис. 5). Однако с ростом L этот перепад возрастает и может достигать нескольких десятков градусов, причем его величина уменьшается при увеличении радиуса катода.

Время установления стационарной температуры рабочей поверхности катода источника плазмы является важным параметром, поскольку позволяет определить, через какое время после начала работы источника плазмы им будет формироваться плазменный поток постоянного состава. В ионно-плазменных установках последнего поколения это позволит определить задержку времени открытия заслонки, отсекающей плазменный поток от обрабатываемой

поверхности, после включения источника плазмы [9].

Время установления стационарного теплового режима катода существенно зависит от массы катода и тока дуги, увеличиваясь с ростом массы катода и уменьшаясь с увеличением тока дуги (рис. 6). Для обеспечения приемлемых времен выхода катода с охлаждением по торцевой поверхности на рабочий режим ($t_g < 100$ с) следует в конструкциях источников плазмы применять катоды длиной L не более 0,02 м и радиусом R , не превышающим значение порядка 0,05 м. При таких геометрических размерах катода максимальная температура его рабочей поверхности не превышает значений 600 К, что приводит к относительно низкому содержанию капельной фракции в плазменном потоке.

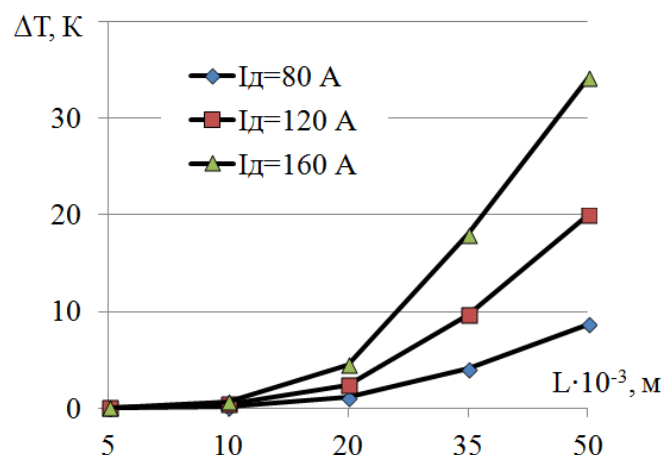


Рис. 5. Перепад температур на рабочей поверхности катода с охлаждением по торцу от его длины при различных токах дуги: $R = 0,03$ м

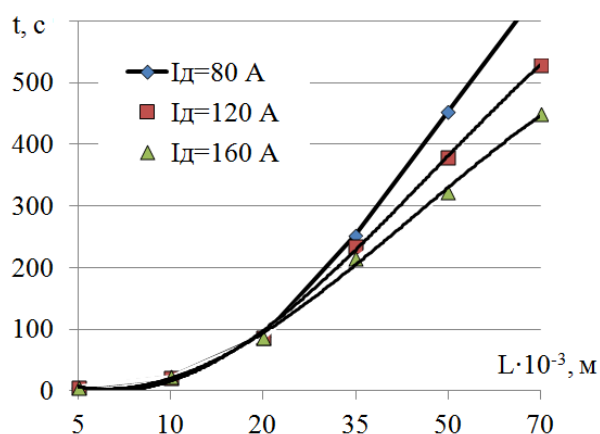


Рис. 6. Время установления стационарного теплового режима катода с охлаждением по нерабочему торцу в зависимости от длины катода: $R = 0,03$ м

4.2. Температурный режим катода с охлаждением по боковой поверхности

Сравнение максимальной температуры рабочей поверхности катода, охлаждаемого по нерабочему торцу (рис. 3), с такой же температурой катода, охлаждаемого по боковой поверхности (рис. 7), показывает, что наименьшее значение этой температуры реализуется в случае катода с охлаждением по торцевой поверхности (309 К при $R = 0,06$ м и $L = 0,005$ м для катода с охлаждением по торцу против 423 К при $R = 0,05$ м и $l_3 = 0,005$ м для катода с охлаждением по боковой поверхности).

Обращает на себя внимание высокая температура рабочей поверхности катода с охлаждением по боковой поверхности при малых радиусах катода, что объясняется обратноквадратичной зависимостью плотности теплового потока на катод в зависимости от его радиуса (при $R = 0,01$ м плотность теплового потока на поверхность катода увеличивается на порядок по сравнению с $R = 0,03$ м).

В отличие от катода с охлаждением по торцу в случае катода с охлаждением по боковой поверхности наблюдается более выраженный рост температуры рабочей поверхности катода с увеличением тока дуги и не отмечается ее стабилизация. Кроме того, можно отметить более выраженное снижение максимальной температуры рабочей поверхности катода с увеличением радиуса катода (рис. 8).

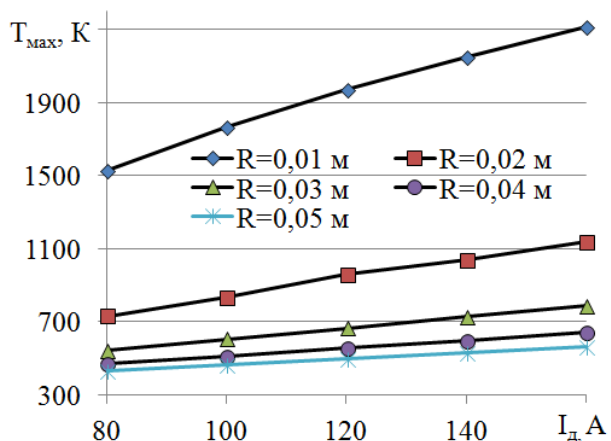


Рис. 7. Максимальная температура рабочей поверхности катода с охлаждением по боковой поверхности в зависимости от тока дуги: $L = 0,01$ м

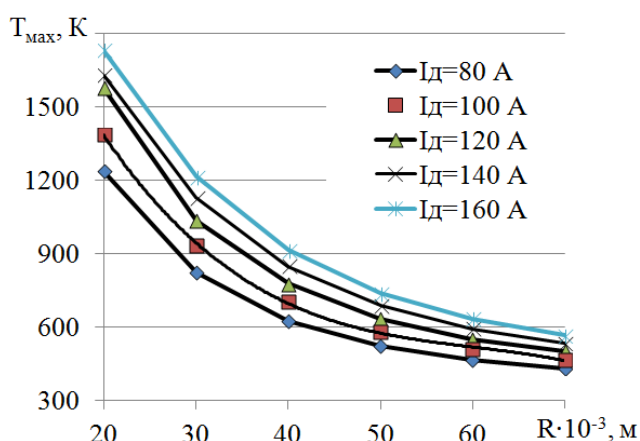


Рис. 8. Максимальная температура рабочей поверхности катода с охлаждением по боковой поверхности в зависимости от тока дуги: $L = 0,04$ м

Для случая охлаждения катода по боковой поверхности характерен более высокий перепад температур по рабочей поверхности катода, достигающий значений порядка 100 градусов. Этот перепад температур можно минимизировать до значений в несколько градусов путем изменения длины рабочей части катода l и его радиуса R (рис. 9). Полученный таким образом минимальный перепад температур при поддержании неизменным значения l будет постоянным так же, как и максимальная температура рабочей поверхности катода с охлаждением по боковой поверхности.

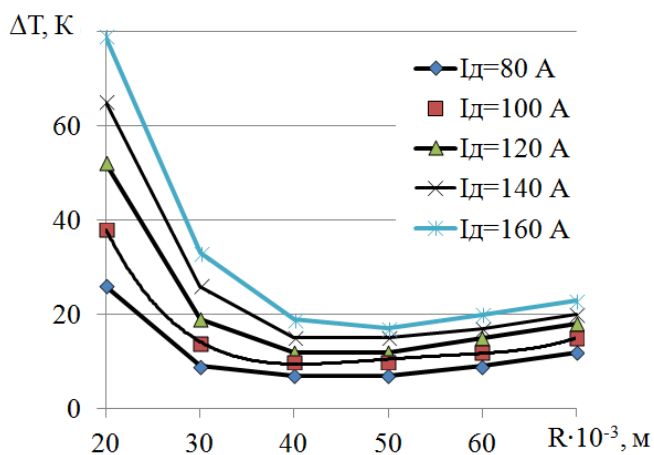


Рис. 9. Перепад температур на рабочей поверхности катода с охлаждением по боковой поверхности от его длины при различных токах дуги: $R = 0,04$ м

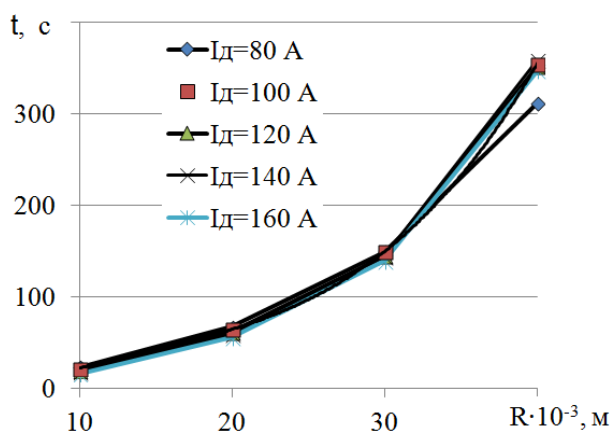


Рис. 10. Время установления стационарного теплового режима катода с охлаждением по нерабочему торцу в зависимости от длины катода при различных токах дуги: $R=0,03$ м

При малых длинах рабочей части катода ($l = 0,005 \dots 0,01$ м) время установления стационарного режима невелико, практически не зависит от тока дуги и определяется только радиусом катода (рис. 10). С увеличением длины рабочей части катода ($l = 0,02 \dots 0,04$ м) наблюдается снижение времени

установления стационарного температурного режима с увеличением тока дуги, особенно существенное для катодов с $R \geq 0,03$ м.

Сравнение времени достижения установившегося температурного режима для катодов одинакового радиуса ($R = 0,03$ м), но с различным типом охлаждения показывает, что время прогрева катода с охлаждением по боковой поверхности больше. В случае малых рабочих длин катода ($l = (0,005 - 0,01)$ м) это различие составляет 6–12 раз, при увеличении длины катода ($l = 0,02 \dots 0,04$ м) разница во времени прогрева катодов снижается до порядка двух и менее раз. Кроме того, при больших длинах катода с охлаждением по боковой поверхности зависимость времени установления стационарной температуры от тока дуги носит нелинейный характер (рис. 11), в то время как эта зависимость для катода с охлаждением по нерабочей торцевой поверхности линейна.

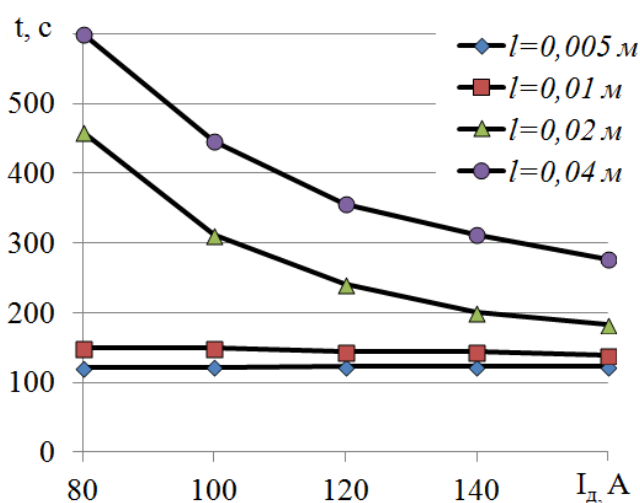


Рис. 11. Время установления стационарного теплового режима катода с охлаждением по нерабочему торцу в зависимости от тока дуги: $R = 0,03$ м

5. Заключение

Полученные в настоящей работе результаты можно обобщить следующим образом:

1. Для катода с охлаждением по нерабочему торцу установлены закономерности изменения температуры рабочей поверхности катода при трансформации геометрических размеров катода и тока дугового разряда: значение максимальной температуры пропорционально длине катода и току дуги и обратно пропорционально радиусу катода. При значительном увеличении длины катода (при $R = 0,03$ м $L > 0,035$ м) начинают существенно влиять потери энергии с рабочей поверхности катода за счет излучения, что приводит к замедлению роста температуры и к последующей ее стабилизации. Полученные закономерности позволяют определять оптимальный температурный режим катода источника плазмы при его проектировании.

2. Выявлен неравномерный характер распределения температуры по радиусу рабочей поверхности катода с охлаждением по торцу – с максимальным значением в центре катода и минимальным на расстоянии, равном радиусу катода, связанный с потерями энергии вследствие излучения с боковой поверхности катода. При малых длинах катода L этот перепад температур ΔT

незначителен (при $L = 5$ мм порядка нескольких сотых градуса, при $L = 10$ мм не превышает 0,65 К). Однако с ростом L этот перепад возрастает и может достигать нескольких десятков градусов, причем его величина уменьшается при увеличении радиуса катода.

3. Определены закономерности времени выхода катода с охлаждением по торцу на стационарный температурный режим. Для обеспечения приемлемых времен выхода катода с охлаждением по торцевой поверхности на рабочий режим ($t_e < 100$ с) следует в конструкциях источников плазмы применять катоды длиной L не более 0,02 м и радиусом R , не превышающим значение порядка 0,05 м.

4. Установлено, что максимальная температуры рабочей поверхности катода, охлаждаемого по нерабочему торцу, при прочих равных условиях меньше такой же температуры катода, охлаждаемого по боковой поверхности;

5. Показано, что более высокий перепад температур по рабочей поверхности катода в случае его охлаждения по боковой поверхности можно минимизировать до значений в несколько градусов путем изменения длины рабочей части катода l и его радиуса R .

6. Установлено, что время достижения установившегося температурного режима для катодов одинакового радиуса ($R = 0.03$ м) меньше в случае катода с охлаждением по торцевой поверхности. При малых рабочих длинах катода ($l_3 = 0,005 \dots 0.01$ м) это различие составляет 6–12 раз, при увеличении длины катода ($l_3 = 0,02 \dots 0.04$ м) разница во времени прогрева катодов снижается до порядка двух и менее раз.

Список литературы

1. Технология и оборудование формирования высококачественных упрочняющих поверхностных структур изделий магнетронно-дугowymi плазменными потоками [Электронный ресурс] : Технопарк, сайт. – Режим доступа http://www.t-park.ru/katalog/arh/2010/info/project_details.asp?type_offer=%D0%9F%D0%A0%D0%9E%D0%95%D0%9A%D0%A2&offer_id=384.htm. – 8.12.2013. Загл. с экрана.

2. Создание предприятия по производству монокристаллического твердосплавного инструмента с многослойным наноструктурированным покрытием / В. Н. Крылов, В. А. Полетаев, Т. Д. Кожина [Электронный ресурс]. – Режим доступа <http://85.142.23.144/packages/mifi/C6886AA4-A711-4C2F-93D1-C0A9D2490CEE/1.0.0.0/file.pdf>. – 8.12.2013. Загл. с экрана.

3. Хороших, В. М. I. Эрозия катода и расход массы катодного материала в стационарной дуге низкого давления [Текст] / В. М. Хороших // Физическая инженерия поверхности (ФІП ФІП PSE), 2004. – Т. 2. – № 4. – С. 184–199.

4. Daalder, J. E. Erosion and the origin of charged and neutral species in vacuum arcs [Текст] / J. E. Daalder // J. Phys. D: Appl. Phys., 1975. – V.8. – P. 1647–1659.

5. Sysoev, Yu. Managing the Composition of the Plasma Flow of the Technological Plasma Sources by Changing the Temperature of the Cathode Working Surface [Текст] / Yu. Sysoev, I. Tatarkina // Proceedings of the International Conference Nanomaterials: Applications and Properties. 3rd International Conference «Nanomaterials: Applications & Properties – 2013 (NAP-2013)» Alushta, the Crimea, Ukraine 16-21 September, 2013, Sumy, Sumy State, 2013. – Vol. 2. – No 3. – p. 03AET02 (4p).

6. Кабанов, А. В. Разработка модельного ряда автоматизированных

вакуумно-дуговых установок для нанесения износостойких покрытий [Текст] / А. В. Кабанов, С. В. Качалин // Упрочняющие технологии и покрытия, 2013. – №3. – С. 3–11.

7. Пат. 2361014 Российская федерация, МПК С23 С14/40. Способ вакуумно-дугового нанесения покрытий / А. А. Лисенков, В. Т. Барченко, В. Д. Гончаров и др.; Заявитель и патентообладатель Институт проблем машиноведения РАН. – № 2007141668/02 ; заявл. 06.11.2007 ; опубл. 21.07.2009.

8. Pat. US 3625848 In. cl. C23C 15/00. Arc deposition process and apparatus / A. A. Snaper ; заявл. 26.12.68 ; опубл. 7.12.71.

9. Аксенов, И. И. Высокопроизводительная вакуумно-дуговая установка для осаждения покрытий [Текст] / И. И. Аксенов, В. А. Белоус // ВАНТ, 2008. – №2. – С. 108–118.

Рецензент: д-р физ. мат. наук, ст. науч. сотр.,
нач. лаборатории Хороших В.М. НИЦ ХФТИ, г. Харьков

Поступила в редакцию 10.12.2013

Тепловий режим катодів технологічних джерел плазми з різним типом охолодження

Розглянуто тепловий режим катодів вакуумно-дугових джерел плазми з різним типом охолодження. Досліджено стаціонарне температурне поле катода з охолодженням як по торцевій, так і по бічній поверхнях при різній геометрії катода і щільності теплового потоку на його робочу поверхню. Виявлено нерівномірність розподілення температури робочої поверхні катода за його радіусом. Ця нерівномірність більше для катода з охолодженням по боковій поверхні, і її можна мінімізувати до рівня кількох градусів зміною геометрії катода. Визначено залежності часів виходу катодів на усталений температурний режим з різним типом охолодження від геометрії катода і струму дуги.

Ключові слова: катод вакуумно-дугового джерела плазми, стаціонарне температурне поле катода, час виходу на усталений тепловий режим.

Thermal regime of cathodes of technological plasma sources with different types of cooling

Thermal regime of cathodes of the vacuum arc plasma sources with different types of cooling was considered. Stationary temperature field cathode with cooling both front and on the side surfaces at different cathode geometry and the heat flux density on its surface was investigated. Spotted an uneven distribution of temperature of the surface of the cathode at its radius. This unevenness is more for cathode with cooling its lateral surface and can be minimized till a level several degrees by varying the geometry of the cathode. A output time on the steady temperature regime of cathodes with different types cooling in dependence from the cathode geometry and arc current was determined.

Keywords: cathode of vacuum arc plasma source, stationary temperature field of the cathode, a output time on the stationary temperature regime of cathode.