электронный журнал
МОЛОДЕЖНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ВЕСТНИК
Издатель ФГБОУ ВПО "МГТУ им. Н.Э. Баумана". Эл No. ФС77-51038.

 # 09, сентябрь 2015

УДК 621.793.72

Радиационный теплообмен капельной фазы вакуумного дугового испарителя

Литвинова В.В., *студент*
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»

Научный руководитель: Ивахненко С.Г., к.т.н., доцент
Россия, 105005, г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана,
кафедра «Плазменные энергетические установки»
ivakhnenko@bmstu.ru

Введение

Одним из наиболее перспективных и бурно развивающихся электровакуумных методов нанесения покрытий широкого спектра назначения является вакуумно-дуговой метод. Несомненными преимуществами этого метода являются высокая скорость процесса, возможность управления потоком материала, возможность подачи смещения на подложку и т.д., широкий ассортимент наносимых материалов [1, 2]. Основным недостатком данного метода является наличие капельной фазы, которая ухудшает качество покрытия [3]. Для борьбы с капельной фазы используют специальные сепараторы, которые существенно снижают скорость нанесения покрытий. Для того, чтобы снижать массовый и объемный состав капельной фазы в покрытиях необходимо исследовать процессы образования и переноса капель с катода испарителя на подложку. Эта задача усложняется, тем, что генерация капель происходит в очень небольшом и теплонапряженном объеме, сосредоточенном в катодном пятне [2]. Измерить температуру и скорость вылетающей капли достаточно сложно. Однако экспериментальные исследования показывают, что капли приходят на подложку как жидкие, так и твердые, причем, чем меньше капля, тем более вероятно ее обнаружить в твердом состоянии.

Состояние капли на поверхности определяется ее начальным состоянием (температура, скорость, диаметр) и теплообменом во время полета. Так как капля летит в вакууме, то можно предположить, что основным механизмом сброса энергии каплей является радиационный теплообмен.

Целью данной работы является решение задачи радиационного теплообмена капель различного диаметра для наиболее распространенных материалов и прогнозирование фазового состояния капли на подложке и ее температуры после генерации на катоде.

Расчет охлаждения сферической капли

Рассмотрим каплю, летящую от катода до подложки, считая, что капля имеет сферическую форму. Так как капля вылетает из катода только в жидком состоянии, а на подложке может быть как в твердом, так и в жидком состоянии, то можно выделить три возможных участка состояния капли (рис. 1):

- 1 участок – изменение температуры капли с момента вылета с катода и до момента снижения ее температуры до температуры плавления (кристаллизации);
- 2 участок – соответствует времени кристаллизации капли в полете (температуру капли считаем постоянной и равной температуре плавления);
- 3 участок – соответствует остыванию капли в твердом состоянии.
-

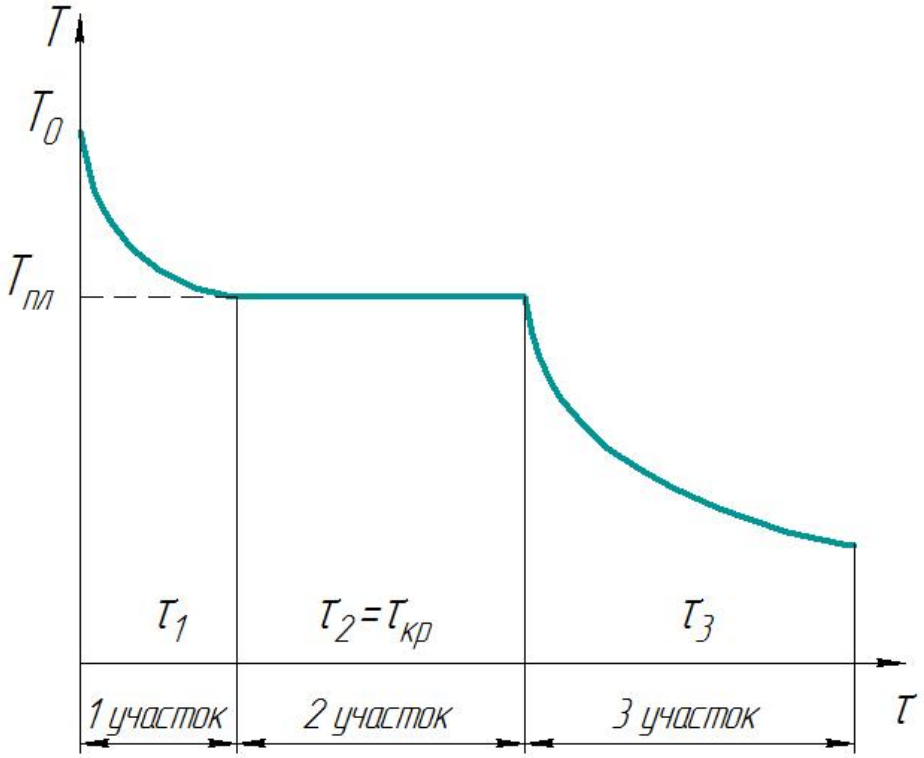

Рис. 1. Расчетный график зависимости температуры капли от времени полета

Рассмотрим участок 1, когда капля вылетает с катода с температурой выше температуры плавления. В этом случае существует какое-то время, пока она остывает до

температуры плавления. Выведем зависимость для определения этого времени и температуры. Внутренняя энергия капли U будет уменьшаться за счет излучения W:

$$dU = -W(T)dt\,, \tag{1}$$

где U – внутренняя энергия капли, $W(T)$ – мощность излучения при температуре T, t – время.

Мощность излучения определяется по выражению Стефана-Больцмана:

$$W(T) = \varepsilon\,\sigma_{st}\,S_{\text{к}}\,T^4\,, \tag{2}$$

где ε – степень черноты материала капли; $\sigma_{st} = 5{,}67 \cdot 10^{-8}\,\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – постоянная Стефана-Больцмана; $S_{\text{к}}$ – площадь капли.

Площадь капли определяем, считая ее сферической:

$$S_{\text{к}} = \frac{\pi\,{d_{\text{к}}}^2}{4}\,, \tag{3}$$

где $d_{\text{к}}$ – диаметр капли.

Изменение внутренней энергии капли при изменении температуры с жидком состоянии:

$$dU = c_l\,m_{\text{к}}\,dT\,, \tag{4}$$

где c_l – удельная теплоемкость материала капли в жидком состоянии; $m_{\text{к}}$ – масса капли.

Масса капли определяем, считая ее сферической:

$$m_{\text{к}} = \rho_{\text{к}}\,\frac{\pi\,{d_{\text{к}}}^3}{6}\,, \tag{5}$$

где $\rho_{\text{к}}$ – плотность материала капли.

Подставляем в (1) выражения (2) и (4). Разделяя переменные получаем:

$$\frac{dT}{T^4} = -\frac{\varepsilon\,\sigma_{st}\,S_{\text{к}}}{c_l\,m_{\text{к}}}dt\,. \tag{6}$$

Введем константу, зависящую только от свойств материала:

$$\text{A}_1 = \frac{2\,c_l\,\rho_{\text{к}}}{3\,\varepsilon\,\sigma_{st}}\,. \tag{7}$$

Подставляем (7) в (6) и интегрируем полученное выражение, считая что в начальный момент времени $t = 0$ температура капли была $T = T_0$. Получаем зависимость температуры капли от времени в расплавленном состоянии на участке 1:

$$T_1(t) = \left(\frac{\text{A}_1\,{T_0}^3\,d_{\text{к}}}{3\,{T_0}^3\,t + \text{A}_1\,d_{\text{к}}}\right)^{\frac{1}{3}}\,. \tag{8}$$

На участке 3, когда капля находится в твердом состоянии после кристаллизации, зависимость температуры капли от времени будет аналогична зависимости (8), с учетом изменения теплофизических свойств материала в твердом состоянии.

$$T_3(t) = \left(\frac{\mathrm{A}_3\, T_{\text{пл}}{}^3\, d_{\text{к}}}{3\, T_{\text{пл}}{}^3\, t + \mathrm{A}_3\, d_{\text{к}}} \right)^{\frac{1}{3}}, \tag{9}$$

где A_3 – комплекс физических величин, зависящих только от свойств материалов:

$$\mathrm{A}_3 = \frac{2\, c_m\, \rho_{\text{к}}}{3\, \varepsilon\, \sigma_{st}}, \tag{10}$$

где c_m – удельная теплоемкость материала капли в твердом состоянии.

Рассмотрим участок 2, когда температура капли достигла точки кристаллизации. В этом случае капля находится в состоянии фазового перехода и ее температура не меняется с течением времени.

Теплота, которая выделяется при кристаллизации капли равна:

$$Q_{\text{к}} = \lambda\, m_{\text{к}}\,, \tag{11}$$

где λ – удельная теплота плавления.

Количество теплоты, которое капля сбрасывает излучение за время кристаллизации $t_{\text{кр}}$:

$$Q_{\text{кр}} = \varepsilon\, \sigma_{st}\, T_{\text{пл}}{}^4\, t_{\text{кр}}\, S_{\text{к}}\,. \tag{12}$$

Приравниваем (11) и (12) и, с учетом (2) и (4), получаем выражение для времени кристаллизации:

$$t_{\text{кр}} = \frac{2\, \lambda\, \rho_{\text{к}}}{3\, \varepsilon\, \sigma_{st}\, T_{\text{пл}}{}^4}\, d_{\text{к}}\,. \tag{13}$$

Время пролета капли определяем зная характерную длину пролета $L_{\text{пролета}}$ капли в камере и среднюю скорость полета $\upsilon_{\text{к}}$:

$$t_{\text{полета}} = \frac{L_{\text{пролета}}}{\upsilon_{\text{к}}}, \tag{14}$$

Из выражений (8), (9) и (13) видно, что наибольший вклад в скорость остывания капли дает температура плавления. Чем она выше, тем больше поток излучения с капли, тем быстрее происходит ее остывание.

Оценка фазового состояния капли

Далее проведена оценка зависимости температуры капли от времени полета для следующих материалов катода: Al, Ti, Cr, Cu, Si. Физические характеристики данных материалов приведены в таблице.

Параметр материала	Al	Ti	Cr	Cu	Si
Температура плавления, $T_{пл}$, K [4]	933	1933	1890	1357	1683
Удельная теплота плавления, $\lambda, Вт \cdot с$ [5, 6]	$390 \cdot 10^3$	$377 \cdot 10^3$	$316 \cdot 10^3$	$214 \cdot 10^3$	$1600 \cdot 10^3$
Плотность, $\rho, кг/м^3$ [4]	2698	4540	7190	8960	2330
Степень черноты, ε [7, 8]	0,19	0,65	0,26	0,87	0,6
Удельная теплоемкость жидкого материала, c_l , $Дж/(кг \cdot К)$ [9]	1177	687	806	513	1013
Удельная теплоемкость твердого материала, c_m , $Дж/(кг \cdot К)$ [9]	1037	684	614	451	946

При оценке конечного фазового состояния капли основную неопределенность составляет начальная температура капли. Она превышает температуру плавления на неопределённую величину. Однако если время кристаллизации превышает время полета капли $\tau_{кр} \geq \tau_{полета}$ то капля придет на подложку в расплавленном состоянии. Если $\tau_{кр} < \tau_{полета}$, то фазовое состояние капли будет определяться начальной температурой капли и временем τ_1 остывания до температуры кристаллизации. Будем считать, что начальная температура, с которой капля вылетела с катода T_0, для каждого материала будет складываться из температуры плавления $T_{пл}$ и условного $\Delta T = 250$.

Для расчетов диапазон скорости всех капель $v_к$ варьируется от 20 до 200 м/с из [10]. Исходя из этого времени и характерных линейных размеров вакуумных камер время полета капель от катода до подложки $t_{полета}$ из формулы (14) для всех типов капель будет одинаковым, и принимать значения от $3{,}5 \cdot 10^{-3}$ с до $5 \cdot 10^{-2}$ с.

Для анализа теплового состояния капель выбран диапазон диаметров капель $d_к$ от 0,8 до 10 мкм. Размеры капель выбирались исходя из технологических качеств получаемого покрытия, представленных в работе [11].

Для *алюминиевых* капель диаметрами от 0,8 до 10 мкм время кристаллизации $\tau_{кр.Al}$ составляет от $7 \cdot 10^{-2}$ до $8{,}6 \cdot 10^{-2}$ с, что больше характерного времени полета капли $\tau_{полета}$. Поэтому капли алюминия всегда будут приходить на подложку только в жидком состоянии, что подтверждается экспериментом [12].

Для *титановой* капли наблюдается иная картина. Для диапазона диаметра капель от 0,8 до 6 мкм время кристаллизации $\tau_{кр.Ti}$ составляет от $1{,}8 \cdot 10^{-3}$ до 10^{-2} с, что меньше или равно времени полета $\tau_{полета}$. Тогда при суммировании времен пролета на 1 и 2 участках получаем интервал времен от $2{,}4 \cdot 10^{-3}$ до $1{,}8 \cdot 10^{-2}$. Это говорит о том, что капли данного диапазона могут приходить на подложку в твердом состоянии. Для диапазона диаметра капель титана от 6 до 10 мкм время кристаллизации $\tau_{кр.Ti}$ составляет от $1{,}3 \cdot 10^{-2}$ до $2{,}2 \cdot 10^{-2}$ с. Тогда при суммировании времен пролета на 1 и 2 участках получаем величины от $1{,}8 \cdot 10^{-2}$ до $3{,}0 \cdot 10^{-2}$ с, что также входит в диапозон времен пролета от катода до подложки. При диаметрах капель свыше 15 мкм время кристаллизации уже будет больше времени полета капли. Таким образом, на подложке будут наблюдаться капли титана как в твердом, так и в жидком фазовых состояниях [11].

Для диапазона диаметра капель *хрома* от 0,8 до 6 мкм время кристаллизации $\tau_{кр.Cr}$ составляет от $6{,}4 \cdot 10^{-3}$ до $4{,}8 \cdot 10^{-2}$ с, что входит в диапазон времени полета капли $\tau_{полета}$. При суммировании времен полета капель на 1 и 2 участке характерные времена составляют от $9{,}7 \cdot 10^{-3}$ до $7{,}3 \cdot 10^{-2}$ с. Для капель хрома диаметром более 6 мкм время кристаллизации будет больше времени полета капли. Таким образом, для капель хрома наблюдается картина схожая с титаном: будут иметься капли как в твердом, так и в жидком фазовых состояниях.

Для диапазона капель *меди* от 0,8 до 6 мкм время кристаллизации $\tau_{кр.Cu}$ составляет от $6{,}4 \cdot 10^{-3}$ до $4{,}6 \cdot 10^{-2}$ с, что входит в диапазон времени полета капли $\tau_{полета}$. При суммировании времен полета капель на 1 и 2 участке характерные времена составляют от $8{,}8 \cdot 10^{-3}$ до $6{,}6 \cdot 10^{-2}$ с. Для капель меди от 6 мкм времена кристаллизации будут больше

времени полета. Следовательно, капели меди, так же как титана и хрома, будут приходить на подложку как в твердом, так и в жидком фазовых состояниях.

Для диапазона капель *кремния* от 0,8 до 6 мкм время кристаллизации $\tau_{\text{кр.}Si}$ составляет от $7{,}3 \cdot 10^{-3}$ до $5{,}5 \cdot 10^{-2}$ с, что частично входит в диапазон характерного времени полета капли $\tau_{\text{полета}}$. Суммируя времена полета капель на 1 и 2 участках, получаем диапазон от $8{,}1 \cdot 10^{-3}$ до $6{,}1 \cdot 10^{-2}$ с. Для капель кремния от 6 мкм время кристаллизации будет больше времени пролета капли. Поэтому можно сказать, что капли от 0,8 до 6 мкм будут приходить на подложку в твердом состоянии, а при размерах более 6 мкм – в жидком состоянии.

На рис. 2 представлен график для всех материалов (алюминий, титан, хром, медь, кремний), значения τ_{min} и τ_{max} проставленные как минимальное и максимальное значение времени полета капли диаметром 1,5 мкм, в зависимости от расстояния до подложки и скорости полета капли.

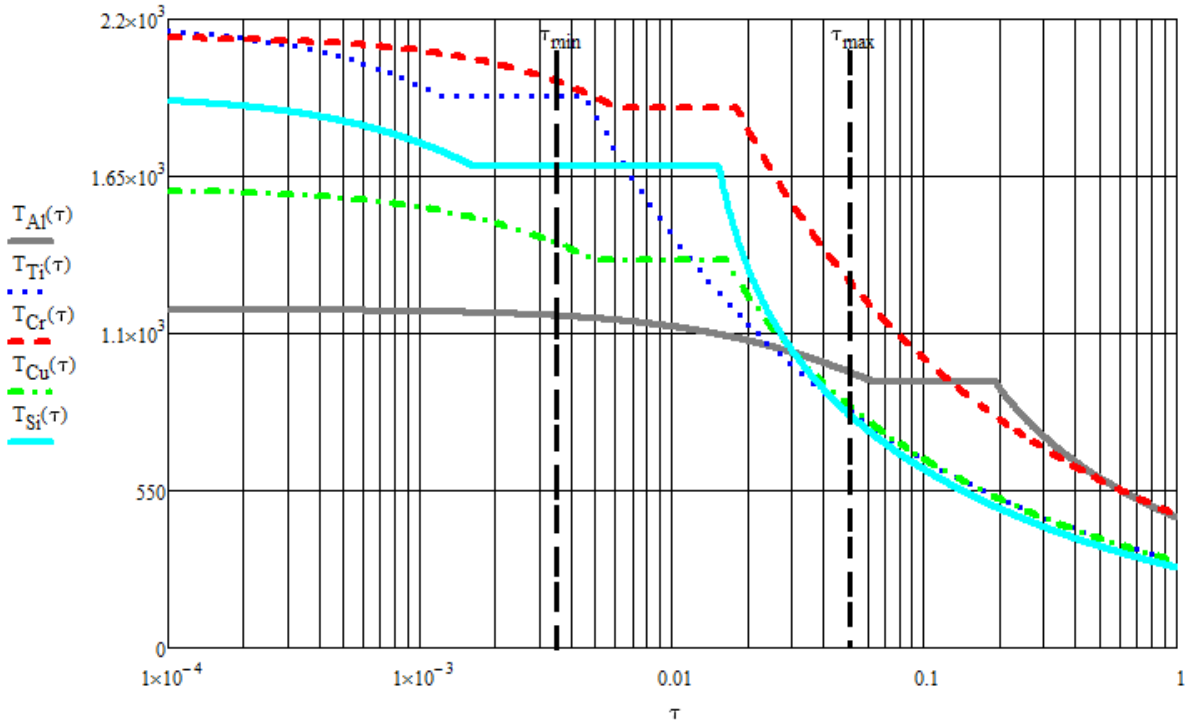

Рис. 2. Зависимость температуры капель алюминия, титана, хрома, меди и кремния от времени полета в вакуумной камере

Заключение

Приведенные расчеты позволяют сделать вывод о том, что температура капли зависит главным образом от температуры плавления материала капли: чем выше температура плавления, тем интенсивней капля сбрасывает тепло с поверхности. Поэтому все тугоплавкие материалы приходят на подложку в твердом состоянии, а легкоплавкие –

в жидком. Так капля алюминия всегда будет приходить на подложку в расплавленном состоянии, что соответствует данным, полученным в работе [12]. Капля же титана, напротив, в полете успеет застыть и прийти на подложку уже в форме твердого шара, что соответствует данным [11]. Капли меньшего размера успевают остыть быстрее, поэтому они чаще приходят на подложку в твердом виде, с увеличением размера конечная температура капли увеличинвается.

Список литературы

1. Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Жуков А.В., Кириллов Д.В., Мелик-Парсаданян А.К., Пархоменко Ю.Н. Вакуумная дуга с монокристаллическим кремниевым катодом для получения наноструктурированных материалов // Справочник. Инженерный журнал. 2008. № 9. С. 22-27.
2. Духопельников Д.В., Кириллов Д.В, Щуренкова С.А. Динамика движения катодных пятен по поверхности катода в поперечном магнитном поле // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 1. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/256359.html (дата обращения 20.09.2014).
3. Береговский В.В., Марахтанов М.К., Духопельников Д.В., Щуренкова С.А. Объемное содержание и дисперсный состав капельной фазы в покрытиях, полученных вакуумно-дуговым методом на установке PLATIT П-80 // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 3-5.
4. Эмсли Дж. Элементы: пер. с англ. М.: Мир, 1993. 256 с. [John Emsley. The elements. Oxford: Clarendon press, 1991].
5. Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г. Справочник по элементарной физике. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Книга по требованию, 1973. 252 с.
6. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочное руководство для расчетов и проектирования. 2-е изд., доп. и перераб. М.: Металлургия, 1975. 368 с.
7. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. Изд. 2-е, стереотип. М.: Энергия, 1977. 344 с.
8. Туманов А.Т. Конструкционные материалы. В 3 т. Т 3. М.: Советская энциклопедия, 1965. 528 с.
9. Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. Справочник физические величины / под ред.: Григорьева И.С., Мейлихова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.
10. McClure G.W. Plasma expansion as a cause of metal displacement in vacuum arc spots // Journal of Applied Physics. 1974. Vol. 45. P. 2078-2084. DOI: 10.1063/1.1663547.

11. Щуренкова С.А. Исследование влияния теплофизических процессов в катодной области вакуумной дуги на дисперсный состав капельной фазы в продукции эрозии катода: дис… канд. техн. наук. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2013. 153 с.
12. Литвинова В.В. Сравнительный анализ капельной фазы в алюминиевых покрытиях // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 10. Режим доступа: http://sntbul.bmstu.ru/doc/734441.html (дата обращения 05.12.2014).