

УДК 620.181.4:539.23

ОСОБЕННОСТИ ВЫБРОСА ЧАСТИЦ МЕТАЛЛА ИЗ ТИГЛЯ В ПРОЦЕССЕ ИСПАРЕНИЯ

А.А. Хороменко

Исследование явления выброса частиц испаряемого металла представляет практический интерес для изучения процессов физико-химического взаимодействия материалов на границе раздела подложка - осаждаемый слой, а также для отыскания эффективных методов борьбы с этим явлением. В данной статье приведены результаты исследования интенсивности потока и распределения по размерам выбрасываемых из испарителя частиц алюминия при контролируемых условиях разогрева и испарения металла.

Алюминий (99,999%) испарялся в вакууме $(2 \div 5) \cdot 10^{-6}$ тор с помощью термостатированного испарителя [1] и одновременно конденсировался на подложки, установленные на различных расстояниях h над тиглем. Пульверизация частиц изучалась при постоянной ($\pm 10\%$) скорости α нагрева расплава (в интервале $20 \div 1700^\circ\text{C}/\text{мин}$) и установившихся значениях температуры испарения $T_{\text{и}}$ металла (в пределах $1200 \div 1720^\circ\text{C}$). Интенсивность N_h потока капель металла определялась по количеству куполообразных частиц, подсчитанных на единице поверхности конденсата, отнесенному ко времени конденсации. (Изменение величины N_h во времени определялось по числу частиц на поверхности поочередно по - мещаемых над испарителем подложек).

В случае пудверизации частиц за счет газовыделения из расплава [2] было установлено следующее. При разогреве тигля с металлом от 660 до 1200°C за время t_p давление остаточных газов в камере возрастало до значения $(1-6) \cdot 10^{-5}$ тор и в процессе дегазации расплава монотонно уменьшалось до величины $(2-5) \cdot 10^{-6}$ тор. Изменение величины N_h во времени имело такой же характер для постоянных h и q . После достижения установившегося значения $T_H < 1300^\circ\text{C}$ частицы металла на подложках не наблюдались. Анализ экспериментальных данных показал, что интенсивность потока частиц металла можно описать следующими выражениями:

$$N_h = N_0 \cdot \exp[-8 \cdot 10^{-2} h (q/q_k)^{-1/4}],$$

$$N_0 = 2,3 \cdot 10^5 [\ln(q/q_k)]^{1/2},$$

где N_0 — средняя (за время t_p) величина интенсивности потока частиц при $h = 0$, $q_k = 27,5^\circ\text{C/мин}$ — критическая скорость нагрева расплава в тигле. Приведенные выражения справедливы при $q > q_k$. Если $q < q_k$, то частицы металла на подложках отсутствовали, то есть величина $N_0 = 0$. Для дегазационного механизма пудверизации максимум распределения частиц по радиусу r (около 10^{-4} см) с ростом h сдвигался в сторону меньших r , а величина максимума возрастала.

В случае пудверизации частиц за счет процесса кипения металла [2] были получены следующие результаты. Для фиксированных ($\pm 1\%$) значений T_H интенсивность N_h не зависела от времени и уменьшалась с ростом h по экспоненциальному закону:

$$N_h = N_0 \cdot \exp(-2 \cdot g \cdot h \cdot 10^{-5}).$$

Здесь g — ускорение силы тяжести; N_0 — интенсивность потока вылетающих из испарителя частиц, зависимость которой от температуры T_H можно представить выражением:

$$N_0 = 2\pi \cdot R \cdot 10^6 \cdot [\ln(T_H \cdot P_3 / T_k \cdot P_k)]^{1/4},$$

где R — внутренний радиус тигля; $T_k = 1450^\circ\text{C}$ — критическая температура испарения; P_3 и P_k — давления насыщенного пара ме-

талла, соответствующие температурам T_H и T_k . Приведенные выражения справедливы при $T_H > T_k$. Если $T_H < T_k$, то частицы металла на подложках не обнаруживались, то есть величина $N_0 = 0$.

В рассматриваемом случае распределение частиц по радиусу имело вид:

$$dN_r / N_h = [\alpha(r)^{1/3} \exp(-\beta \cdot r)] dr,$$

где N_r — интенсивность потока частиц радиусом r на высоте h , $\alpha = 5,997 \cdot 10^5$ и $\beta = 3,333 \cdot 10^4$. Максимум распределения соответствовал $r = 10^{-5}$ см, что согласуется с результатами работы [3]. Для частиц с $r < 2,5 \cdot 10^{-4}$ см вид распределения не изменялся при $T_H > T_k$ и $h = 12 - 54$ см.

Эксперименты указали на существование второго максимума в распределении частиц по радиусу для интервала $T_H > 1485^\circ\text{C}$. Эта часть распределения имела вид:

$$dN_r / N'_h = \{\gamma(r)^3 \exp[-\delta(r)^{1/3}]\} dr.$$

При увеличении T_H или h параметры γ и δ изменялись так, что значение второго максимума в распределении возрастало и сдвигалось в сторону меньших радиусов от $r = 2,5 \cdot 10^{-3}$ до $r = 2,5 \cdot 10^{-4}$ см. Наибольший радиус (в микронах) отдельных частиц приведен в таблице для различных значений T_H и h .

$h, \text{ см} \backslash T_H, ^\circ\text{C}$	1485	1525	1575	1630	1720
12	15,5	30	100	500	160
22	8,75	16	27,5	60	35,5
32	5	8,5	13,75	21	18
42	2,5	5,5	8	11,5	9
54	1,5	2,5	3,75	5	5

Величина интенсивности N'_h частиц второй части распределения составляла $(1 \div 5) \cdot 10^2 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$ для $T_H = 1575 \div 1630^\circ\text{C}$, $h = 12 - 22$ см и $R = 0,3$ см. С уменьшением T_H до значе-

ния 1485°C интенсивность $\sqrt{N}$ снижалась до величины около $1 \text{ см}^{-2} \text{ сек}^{-1}$.

Следующие эксперименты указывают на возможные механизмы пульверизации частиц. Если центральная часть площади расплава закрывалась диском так, чтобы оставался открытым лишь кольцевой участок поверхности металла на границе с тиглем, то второй максимум в распределении частиц по радиусу отсутствовал, а максимальный радиус капель не превышал величины $5 \cdot 10^{-4} \text{ см}$ при $T_{\text{ж}} = 1575 - 1630^{\circ}\text{C}$ и $h = 12 \text{ см}$. Вместе с этим первая часть распределения и значение интенсивности $\sqrt{N}$ мелких частиц не изменялись. Можно предполагать, что разбрызгивание крупных капель обусловлено кипением металла в вакууме при $T_{\text{ж}}$ около 1600°C , а пульверизация мелких частиц происходит при выходе пара из образующихся на стенках тигля полостей [2].

Таким образом, экспериментально установлено существование критической скорости нагрева металла и критической температуры его испарения, превышение которых сопровождается выбросом капель из тигля, попадающих на подложку. Практическим средством борьбы с пульверизацией частиц является испарение дегазированного металла при температурах ниже критической.

Л и т е р а т у р а

1. ПЧЕЛКИН В.Ю., СОЛДАТЕНКОВ И.С., ХОРОМЕНКО А.А. Трубчатый испаритель. ИТЭ, 1971, № 4, стр. 174.
2. ХОРОМЕНКО А.А., ПЧЕЛКИН В.Ю. Об эффекте образования частиц на конденсированных в вакууме металлических пленках. ФММ, 1969, 28, вып. 3, стр. 554.
3. ГЕН М.Я., ЗИСКИН М.И., ПЕТРОВ Ю.И. Исследование дисперсности аэрозолей алюминия в зависимости от условий их образования. Докл. АН СССР, 1959, 127, № 2, стр. 366.

Поступила в ред.-изд.отд.
18 июля 1972 г.