

Л. Н. ДОБРЕЦОВ и Н. М. КАРНАУХОВА

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КАТОДНОГО РАСПЫЛЕНИЯ МЕТАЛЛОВ ИОНАМИ ТЕХ ЖЕ МЕТАЛЛОВ

(Представлено академиком П. И. Лукирским 3 VI 1952)

Явление катодного распыления можно разделить на два этапа: 1) элементарный акт взаимодействия иона с решеткой мишени (возбуждение решетки); 2) последующие процессы, приводящие к отрыву атомов вещества от решетки (собственно катодное распыление).

Из работ (1), в которых исследовалось отражение ионов от металлических поверхностей, можно извлечь ценные сведения относительно первого этапа катодного распыления. Из этих работ вытекает, что элементарное взаимодействие иона с решеткой мишени можно рассматривать как упругое соударение иона с отдельным свободным атомом мишени, т. е. что связи бомбардируемого атома мишени с другими атомами решетки на этом этапе не сказываются. Отсюда следует, что энергия, передаваемая ионом решетке при данном типе удара, а также средняя энергия, переданная ионами решетке, определяются соотношением масс бомбардирующего иона и атома мишени. Протекание второго этапа процесса катодного распыления определяется как энергией, переданной решетке, так и свойствами решетки.

Поэтому для выяснения зависимости коэффициента катодного распыления от физических констант распыляемого материала желательно сравнивать коэффициенты катодного распыления при одинаковых энергиях возбуждения решетки. Передача некоторой определенной энергии возбуждения разным решеткам от ионов заданной кинетической энергии будет иметь место лишь при одном и том же соотношении масс бомбардирующих ионов и атомов решеток, в частности при их равенстве, т. е. при бомбардировке мишеней ионами того же вещества, из которого сделаны мишени.

Целью нашей работы и было получение экспериментальных данных по катодному распылению некоторых металлов ионами тех же металлов. Мы исследовали зависимость коэффициента катодного распыления меди, марганца, железа, свинца и олова от энергии ионов в интервале энергий от 0,5 до 6 кэВ.

Основные особенности нашей методики исследования катодного распыления заключались в следующем. Во-первых, в отличие от большинства исследователей, изучавших распыление в условиях газового разряда, мы производили катодное распыление металлов в вакууме ионами, поступающими из независимого ионного источника — дуги с горячим катодом в парах исследуемого металла, стабилизированной магнитным полем. Во-вторых, для того, чтобы измеряемый ток на мишень равнялся ионному току, т. е. чтобы не нужно было учитывать вторичную электронно-ионную эмиссию, в области мишени также создавалось магнитное

поле, заворачивавшее вторичные электроны, выбитые ионами из мишени. В-третьих, чистота поверхности распыляемой мишени обеспечивалась непрерывным поступлением нейтральных атомов металла из дугового источника, конденсировавшихся на мишени, которые и образовывали распыляемый слой.

Количество распыленного вещества определялось не по уменьшению веса мишени, а по весу осадка, уловленного приемником распыленных частиц. Чтобы устранить возможность неполного улавливания распыленных частиц из-за отражения некоторой доли их от приемника, последний был сделан в виде некоторого подобия «черного тела». Приемником служила коробочка размерами $16 \times 4 \times 4$ мм, сделанная из платиновой жести с 10—12 поперечными перегородками. Такая конструкция делает очень малой вероятность того, что отраженная частица уйдет из приемника.

Основными частями экспериментальной установки являлись: дуговой источник ионов, распыляемая мишень и коллекторное устройство с приемником распыленных частиц. Все эти части были заключены в вакуумную камеру. Вакуумную камеру охватывал П-образный сердечник электромагнита, полюсные наконечники которого помещались внутри камеры, будучи отделены от сердечника ее медными стенками. Мишень, коллекторное устройство, полюсные наконечники, а также флянцы камеры охлаждались проточной водой. Один из электродов дугового источника ионов был заземлен, а мишень и коллекторное устройство были присоединены к отрицательному полюсу высоковольтного выпрямителя. Таким образом, ионы из дугового источника ускорялись этой разностью потенциалов.

Количество распыленного вещества p , уловленного приемником, в большинстве случаев определялось методами количественного химического микроанализа. В некоторых случаях, когда распыленного вещества было достаточно для применения весового метода (например, при катодном распылении свинца и олова), кроме химического определения p , приемник взвешивался на микровесах до и после опыта, и из разности этих весов определялся также вес налета на приемнике. Длительность накопления налета лимитировалась временем «выгорания металла» из тигля дугового источника. Обычно опыт длился 5—25 мин.

До установления стабильного рабочего режима установки приемник ставился в такое положение, что был закрыт от попадания на него распыленных атомов; после достижения этого режима приемник ставился в положение, в котором распыленные атомы могли попадать на него.

Количество электричества q , пришедшего на мишень за время накопления осадка на приемнике, определялось по силе ионного тока и времени накопления. Для каждого исследуемого металла, для каждого заданного напряжения проделывалось несколько опытов, и определялось среднее арифметическое значение отношения p/q .

Для вычисления абсолютного значения коэффициента катодного распыления необходимо знать, какая доля всех распыленных частиц улавливается приемником. Эту долю можно определить, зная закон распределения распыленных частиц по направлениям вылета (закон косинуса), размеры распыляемой поверхности и приемника, а также их взаимное расположение. Выражение, определяющее долю всех распыленных частиц, уловленную приемником, может быть представлено в виде некоторого двойного интеграла; однако выполнение интегрирования не представляется возможным. Поэтому площадь распыляемой поверхности была разбита на 108 элементов, а площадь входной поверхности приемника на 32 элемента, и интегрирование заменено арифметическим вычислением соответствующей двойной суммы. Это вычисление показало, что для нашего прибора число частиц, уловленных приемником, составляет 4,23% от общего числа распыленных частиц.

Коэффициент катодного распыления для данной энергии ионов вычислялся из следующего выражения:

$$N = \frac{N_a}{N_p} = \frac{1}{0,0423} (p/q)_{cp} \frac{F}{\mu} = \frac{2,28 \cdot 10^6}{\mu} (p/q)_{cp},$$

где F — число Фарадея, а μ — атомный вес исследуемого металла (p в граммах, q в кулонах).

Во всех случаях для исследования брались наиболее чистые металлы: медь — 99,93% Cu, марганец — 99,80% Mn, железо — 99,80% Fe, свинец — 99,99% Pb; олово было также достаточно чистым, хотя численных данных о содержании в нем примесей не было.

Необходимо было убедиться, что результаты наших измерений коэффициента катодного распыления не искажены отражением нейтральных атомов исследуемых металлов, падающих из источника ионов на поверхность мишени во время опыта, т. е. убедиться, что все уловленное приемником вещество есть результат лишь катодного распыления. С этой целью для каждого из исследуемых металлов проводились по 2—3 контрольных опыта, а, именно, зажигалась дуга, приемник ставился в рабочее положение, но ускоряющее напряжение не прикладывалось. Катодное распыление мишени при этом не происходило, а отражение нейтральных атомов шло так же, как и в опытах по измерению коэффициентов катодного

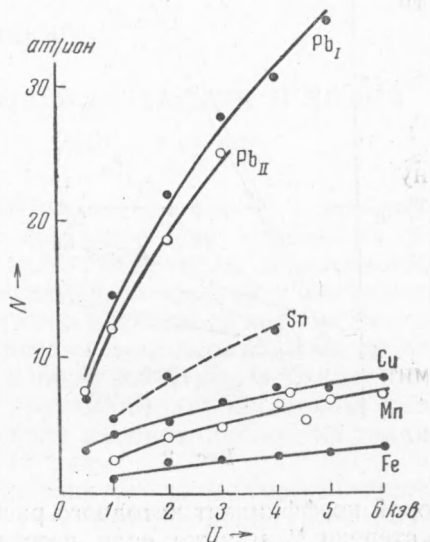


Рис. 1

распыления.

Несмотря на то, что продолжительность экспозиций при этих опытах нельзя было заметить следов

налета исследуемых металлов, в то время как при наличии катодного распыления этот налет был виден совершенно отчетливо. Микрoхимический анализ в этих случаях мог обнаружить в приемниках лишь следы исследуемых металлов, т. е. количества их были меньше, чем 10^{-5} г. Отсюда, зная геометрию прибора и количество испаряющегося в течение опыта металла, можно оценить верхний предел коэффициента отражения атомов от поверхности мишени.

В условиях наших опытов он оказался меньше, чем 0,5—1,0%.

Результаты исследования зависимости коэффициента катодного распыления меди, марганца, железа, свинца и олова от энергии соответствующих ионов изображены на рис. 1 и представлены в табл. 1.

Среднее отклонение результатов отдельных измерений при данной энергии ионов от среднего значения коэффициента катодного распыления для этой энергии равнялось: для меди 6%, для железа 10%, для марганца 7%, для свинца 12% в одной серии измерений (кривая I)

Таблица 1

U, кэВ	N				
	Cu	Mn	Fe	Pb	Sn
0,5	3,4	—	—	8,4	—
1	4,0	2,6	1,3	13,7	5,6
2	5,5	4,0	1,9	21,1	8,6
3	6,5	5,2	2,4	26,9	—
4	7,3	6,1	2,8	31,8	12,2
5	8,0	6,9	3,2	36,2	—
5	8,7	7,7	3,5	—	—

и 4% в другой серии, в которой были приняты меры для обеспечения большей равномерности распределения потока ионов на поверхности мишени (кривая II). Для олова было проделано только несколько ориентировочных опытов для определения порядка величины коэффициента катодного распыления, поэтому погрешность не определялась.

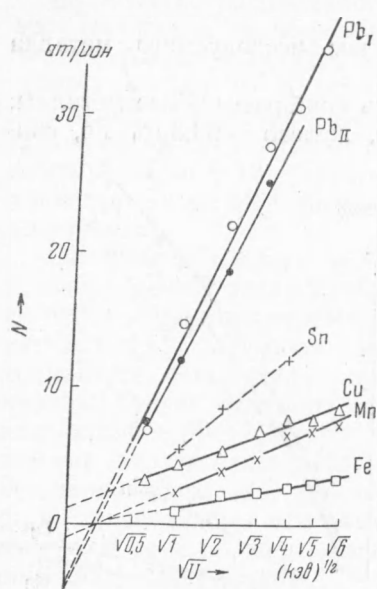


Рис. 2

Из рис. 1 видно, что во всех случаях была получена не линейная, а параболическая или близкая к ней зависимость коэффициента катодного распыления от энергии бомбардирующих ионов. На рис. 2 изображена зависимость коэффициентов катодного распыления от корня квадратного из ускоряющего ионы напряжения. Можно видеть, что экспериментальные точки хорошо укладываются на прямые линии.

Если обратиться к исследованиям других авторов, можно отметить, что несколько исследователей, изучавших катодное распыление в широком интервале энергий ионов, получили нелинейную зависимость коэффициента катодного распыления от энергии ионов, близкую к полученной нами, но не обратили на это особого внимания.

Этот характер зависимости коэффициента катодного распыления от энергии ионов не согласуется с термической теорией катодного распыления, по ко-

торой коэффициент катодного распыления пропорционален энергии ионов в степени $4/3$ или же, если ввести некоторую поправку на коэффициент accommodations ионов, линейно зависит от энергии ионов. Опыты с механической моделью, иллюстрирующей статистическую теорию Моргулиса, также дали линейную зависимость «коэффициента катодного распыления» от энергии «ионов»; следовательно, наши результаты не согласуются и с результатами опытов на указанной модели.

Поступило
16 V 1952

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

¹ М. А. Еремеев, ДАН, 79, № 5, 775 (1951); У. А. Арифов и А. Х. Аюханов, Докл. АН Уз.ССР, № 4, 12 (1951).