

Лабораторная работа 3

РАДИАЦИОННЫЙ БЛИСТЕРИНГ

Цель: изучить взаимодействие пучков ионов газов с поверхностью металлов.

При облучении металлов ионами инертных газов было обнаружено, что в поверхностных слоях формируются газонаполненные полости, приводящие к вспучиванию поверхности. Это явление получило название «блистеринг» (англ. *blister* – ‘волдырь’). Интенсивное изучение блистеринга было обусловлено поисками материалов для создания термоядерных реакторов. Исследование радиационного блистеринга представляет интерес для космического материаловедения и других областей, где решаются вопросы создания и использования материалов, облучаемых ионами плохо растворимых газов. Кроме этого, изучение радиационного блистеринга полезно для расширения представлений о процессах взаимодействия атомных частиц с кристаллами.

С ростом дозы облучения размеры таких газонаполненных полостей (пузырьков) увеличиваются и поверхность может разрушаться за счет вскрытия и отшелушивания (флекинга) их куполов (рис. 1).

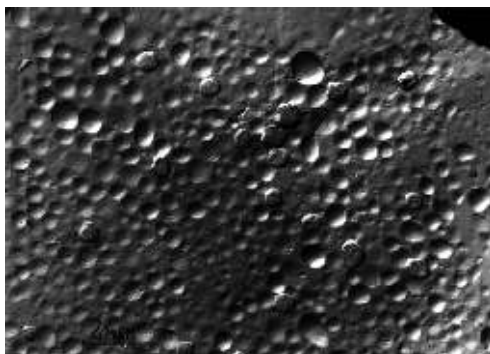


Рис. 1. Блистеры на молибденовом сплаве ЦМ-6 (He^+ , $E = 20$ кэВ, $\Phi = 5 \cdot 10^{17}$ ион/см², $T = 330$ К)

Процесс образования блистеров можно представить следующим образом. При облучении ионами инертного газа в поверхностном слое мишени образуются вакансии. Атомы газа могут накапливаться на вакансиях.

Далее образуются микропузырьки размером до 10 нм (это экспериментально установлено для гелия), которые увеличиваются в размерах в результате диффузии атомов газа из объема мишени. По мере роста таких пузырьков в них растет давление и в имплантированном слое развиваются напряжения, нормальные к поверхности образца, приводящие к образованию трещины и разрыву материала мишени. Слой материала над трещиной под действием сжимающих напряжений вспучивается – и образуется блистер (рис. 2).

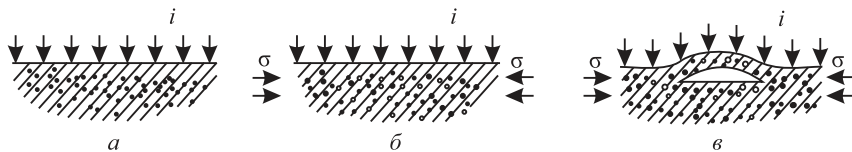


Рис. 2. Схема образования блистеров:
внедрение газа (а); формирование пузырьков, возникновение сжимающих напряжений σ , появление трещины (б); образование блистера (в)

При повышенных температурах трещина формируется главным образом под действием давления газа, выделяющегося в полость трещины из пузырьков. При этом она не локализуется, и в результате отшелушиваются большие участки поверхности (10–100 мкм) – флекинг. В противоположность отшелушиванию распределение блистеров по размерам достаточно узкое.

Следует отметить, что на процесс образования блистеров важное влияние оказывает диффузия атомов газа в пузырьки.

Появление блистеров и отшелушивание начинаются с некоторой (критической) дозы $\Phi_{кр}$. Критическая доза образования блистеров увеличивается вместе с энергией налетающих частиц и растворимостью газа. Кроме этого, она зависит от типа налетающих ионов, материала и температуры мишени, а также от кристаллографической ориентации поверхностного слоя образца.

Из общих соображений следует, что если за время облучения (набора дозы $\Phi_{кр}$) распылится слой больший, чем величина проективного пробега ионов R_p , то концентрация атомов газа в поверхностном слое мишени будет меньше критической и блистеры не образуются. Тогда условие образования блистеров будет следующим:

$$S\Phi_{кр} < R_p N,$$

где S – коэффициент распыления материала мишени; N – число атомов в 1 см^3 .

Это условие справедливо для легких ионов, для тяжелых же ионов оно справедливо при энергиях 0,1–1 МэВ, когда R_p становится большим, а S – малым. Кроме того, растворимость вводимого облучением газа должна быть значительно меньше (примерно на порядок) дозы облучения. Это необходимо для образования в мишени газовых пузырьков и дальнейшего образования блистеров.

Особенности эрозии поверхности (блистеринг или флекинг) в основном определяются температурой мишени в процессе облучения (рис. 3). Так, при низких температурах $T_{обл} < \sim(0,1-0,2)T_{пл}$ образуются блистеры, имеющие определенный диаметр. В интервале температур $(0,1-0,2) T_{пл} < T_{обл} < \sim 0,4T_{пл}$ наблюдается флекинг. В интервале температур $\sim 0,4T_{пл} < T_{обл} < \sim(0,5-0,6)T_{пл}$ флекинг опять сменяется блистерингом, а при температурах облучения выше $(0,5-0,6)T_{пл}$ образуется пористая поверхность.

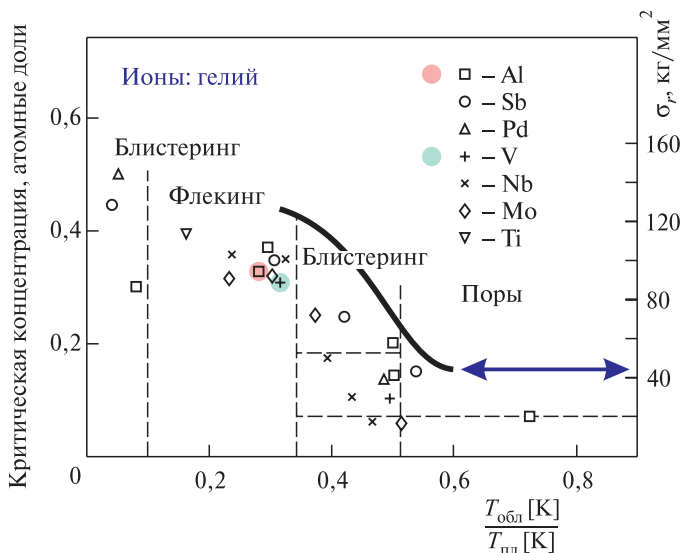


Рис. 3. Зависимость процессов эрозии поверхности металлов от температуры облучения

Толщина крышек блистеров t (и отшелушенного слоя при флекинге) определяется величиной проективного пробега ионов, т. е. глубиной проникновения ионов. При энергиях налетающих ионов больше 40–50 кэВ толщина крышек блистеров совпадает со средней глубиной проникновения ионов R_p , а при меньших энергиях – превышает R_p .

Средний размер блистеров d и толщина крышек t связаны между собой соотношением $d \sim t^{\nu}$.

Величина ν близка к $3/2$; возможно, однако, и меньшее значение ν ($\nu = 1,15-1,25$ или $\nu = 0,9-1,0$) – в зависимости от механических свойств материала мишени. В температурном интервале $(0,1-0,2)T_{\text{пл}}$ размеры блистеров не зависят от температуры, а в интервале $(0,4-0,6)T_{\text{пл}}$ – с ростом температуры уменьшаются.

В случае увеличения угла падения пучка ионов θ на мишень эрозия поверхности уменьшается, размер блистера d пропорционален $\cos^3/2\theta$.

Поверхностная плотность блистеров увеличивается с ростом дозы, причем тем быстрее, чем больше плотность тока ионов j . Зависимость блистеринга от j в интервале $1-10^3$ μA относительно слабая: с ростом j несколько уменьшается критическая доза образования блистеров $\Phi_{\text{кр}}$, увеличивается размер и поверхностная плотность блистеров.

С повышением энергии налетающих ионов размеры блистеров увеличиваются.

Существует две модели образования блистеров. Первая предполагает, что вспучивание поверхности происходит под действием давления газа в полости трещины. В соответствии с данной моделью для того чтобы под действием этого давления произошла пластическая деформация крышки блистера, необходимо выделение $\sim 10\%$ газа, имплантированного в мишень при достижении критической дозы.

Что касается второй модели, то давление газа может быть малым и играть роль небольшой затравочной силы, а вспучивание происходит за счет бокового напряжения в крышке блистера.

Для определения параметров блистеринга можно воспользоваться простой схемой образования блистеров (в рамках первой модели), предложенной O. Auciello*. Здесь предполагается, что по мере увеличения дозы имплантированных ионов на глубине R_p происходит коалесценция микропузырьков газа и их рост, который приводит к вспучиванию и разрыву поверхностного слоя мишени. На рис. 4 приведена схема, иллюстрирующая связь размера блистера d , величины среднего проективного пробега R_p и радиуса газового пузыря b .

Точное решение задачи о напряжениях, вызываемых полостью с избыточным давлением в окружающем материале, достаточно сложное, поэтому ограничимся выражениями, приведенными в работе.

* Auciello O. Simple model for blistering mechanism // Radiation Effects. 1976. Vol. 30, iss. 1. P. 11–16.

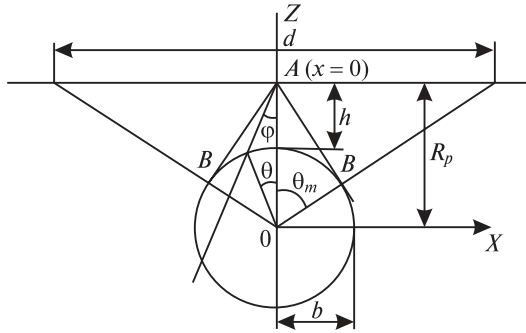


Рис. 4. Связь диаметра блистера с размерами пузырька газа, расположенного на глубине R_p . Максимальные напряжения создаются в точках A и B

Максимальные растягивающие напряжения в точках B и A следующие:

$$\begin{aligned}\sigma_{c \max} &= P \frac{\bar{R}_p^2 + b^2}{\bar{R}_p^2 - b^2}, \\ \sigma_{x \max} &= 4P \frac{b^2}{\bar{R}_p^2 - b^2},\end{aligned}\quad (1)$$

где P – давление внутри пузыря; \bar{R}_p – средний проективный пробег; b – радиус пузыря.

Максимальные напряжения будут равны, если $\bar{R}_p = \sqrt{3}b$. В этом случае $\sigma_{c \max} = \sigma_{x \max} = 2P$. Когда $\bar{R}_p < \sqrt{3}b$, в этом случае $\sigma_{c \max} < \sigma_{x \max}$, и если $\bar{R}_p > \sqrt{3}b$, то $\sigma_{c \max} > \sigma_{x \max}$:

$$\begin{cases} \theta_m = \text{tg}^{-1} \left(\frac{d}{2} \bar{R}_p \right), \\ b = \bar{R}_p \cos \theta_m, \\ h = \bar{R}_p - b. \end{cases}$$

Величину критического давления в пузыре можно определить из выражения

$$P_c = \frac{G}{1 + 2 \text{ctg}^2 \theta_m},$$

где G – предел текучести материала.

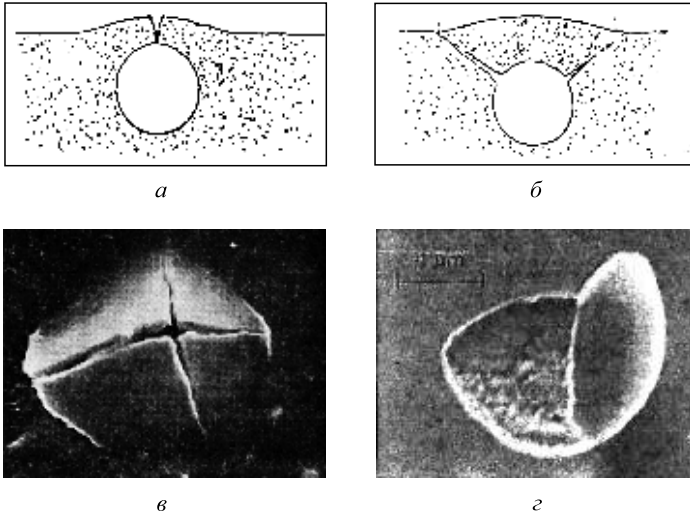


Рис. 5. Схема (а, б) и микрофотографии (в, г) возможных направлений распространения трещины

Из выражения (1) следует два случая:

- если $\bar{R}_p < \sqrt{3}b$, то трещина будет распространяться вдоль оси Z , т. е. по направлению к поверхности (рис. 5, а);
- если $\bar{R}_p > \sqrt{3}b$, то трещина будет распространяться, как показано на рис. 5, б.

На рис. 5, в, г приведены микрофотографии трещин.

ЗАДАНИЯ

1. На основе полученных у преподавателя экспериментальных данных рассчитать значения \bar{R}_p , b , h , θ_m .
2. Рассчитать значения критического давления в пузырьке газа.

Контрольные вопросы

1. Что такое блистеринг?
2. Каковы причины образования блистеров?
3. Почему для случая тяжелых ионов блистеры образуются только при высоких энергиях?
4. Что понимают под флекингом?

Список литературы

Беграмбеков, Л. Б. Процессы в твердом теле под действием ионного и плазменного облучения : учеб. пособие / Л. Б. Беграмбеков. М. : МИФИ, 2008. 196 с.

Бондаренко, Г. Г. Радиационная физика, структура и прочность твердых тел [Электронный ресурс] : учеб. пособие / Г. Г. Бондаренко. М. : Лаборатория знаний, 2016. 1 электрон. опт. диск.

Мартыненко, Ю. В. Теория блистеринга / Ю. В. Мартыненко. М. : ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1979. 40 с.

Auciello, O. Simple model for blistering mechanism // Radiation Effects. 1976. Vol. 30, iss. 1. P. 11–16.

Das, S. K. Radiation blistering in Metals and Alloys / S. K. Das, M. Kaminsky // Advances in Chemistry. 1976. Vol. 158, chapter 5. P. 112–170.