

РАДИАЦИОННЫЙ БЛИСТЕРИНГ

М. И. Гусева, Ю. В. Мартыненко

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	671
2. Основные закономерности блистеринга и отшелушивания	673
3. Теория	684
4. Способы уменьшения эрозии материалов при блистеринге и отшелушивании	688
Цитированная литература	689

1 ВВЕДЕНИЕ

В 1963 г. в работах Праймака¹ и Каминского² было обнаружено образование пузырей на поверхности изоляторов, облученных ионами H^+ , D^+ и He^+ . В 1966 г. Праймак и Луэр³ наблюдали пузыри также на поверхности металлов (Cu, Ni, Al), облученных ионами H^+ и He^+ .

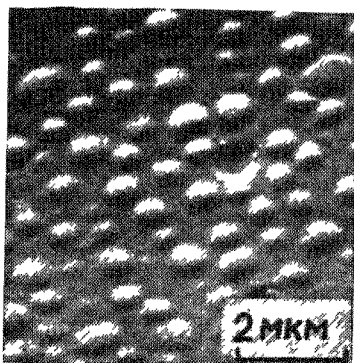


Рис. 1. Блистеры на поверхности монокристаллического ванадия, облученного ионами гелия с энергией 10 кэВ до дозы $6 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$.

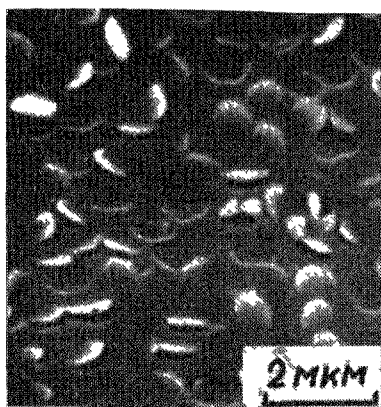


Рис. 2. Блистеры с торцевыми крышками на поверхности замороженного жидкого ванадия после дозативного облучения ионами H^+ и He^+ с энергией 10 кэВ до доз $6 \cdot 10^{18}$ и $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ соответственно.

Это явление получило название блистеринг, от английского слова blister — волдырь (рис. 1). При увеличении дозы облучения пузыри блистеры вскрываются и их крышки удаляются (рис. 2). Таким образом процесс блистеринга приводит к эрозии поверхности. В некоторых случаях вместе (или паряду) с образованием пузырей происходит отшелушивание поверхностного слоя (рис. 3). При отшелушивании удаляемые куски

поверхностного слоя не имеют определенной формы и размера, в отличие от блистеров, но как правило, их размеры больше размеров блистеров. Эрозия при отшелушивании также больше, чем при блистеринге. Как мы увидим позднее, механизмы отшелушивания и блистеринга различны, хотя причина обоих процессов одна — это внедрение атомов плохо растворимых газов. В последнее время эти явления называют различными терминами: блистеринг и отшелушивание (флекинг, flaking), но часто термин «блистеринг» используют в обобщенном смысле и для собственно блистеринга, и для отшелушивания. Следует отметить, что наряду с радиационным блистерингом, который происходит при облучении ускоренными

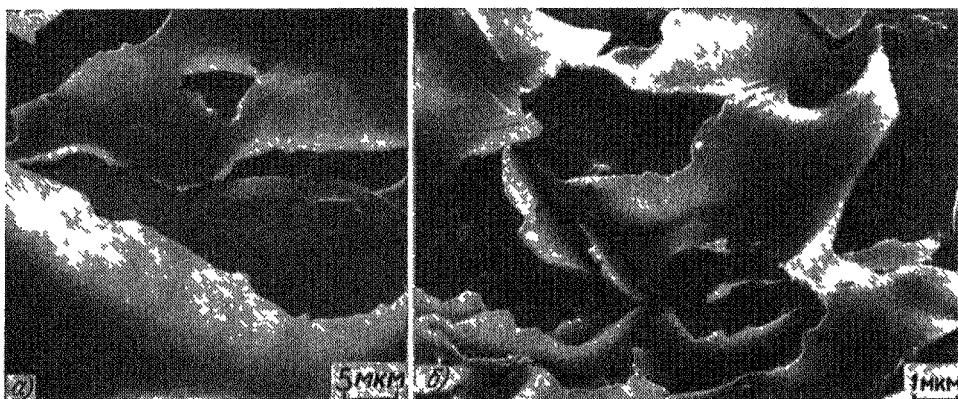


Рис. 3. Флекинг на поверхности нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ при температуре 200 °С.

а) Доза 10^{18} см⁻² б) доза $3 \cdot 10^{18}$ см⁻²

ионами, наблюдается также образование пузырей на поверхности и в результате обработки материала в среде, содержащей газы^{4, 5}. Пузыри нерадиационного происхождения обычно значительно больше, их появление определяется способом обработки и материалом. В нашем обзоре мы ограничимся только радиационным блистерингом.

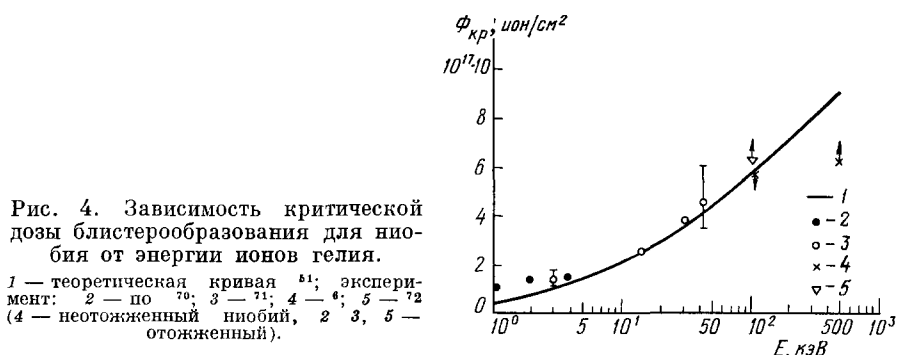
С 1972—1973 гг. началось интенсивное исследование блистеринга в связи с проблемой создания термоядерного реактора, поскольку первая стенка и элементы дивертора термоядерного реактора будут подвержены интенсивному облучению ионами или быстрыми перезарядными нейтронами дейтерия и трития, а также гелия, образующегося в результате D — T реакции. До последнего времени блистеринг рассматривался как один из опаснейших механизмов эрозии первой стенки термоядерного реактора, поскольку коэффициент эрозии материала при гелиевом блистеринге и в особенности при отшелушивании может превышать на 1—2 порядка коэффициент распыления того же материала ионами гелия и на 2—3 порядка коэффициент распыления ионами водорода.

Исследование закономерностей блистеринга представляет большой интерес как для материаловедческой проблемы термоядерного реактора, так и для других задач, в которых материалы облучаются ионами плохо растворимых газов. К настоящему времени изучены основные закономерности блистеринга и отшелушивания при моноэнергетическом облучении ионами гелия. Найдены условия, при которых радиационная эрозия за счет гелиевого блистеринга и отшелушивания не будет давать существенного вклада в эрозию элементов конструкции термоядерного

реактора. Явление радиационного блистеринга интересно и само по себе с физической точки зрения, поскольку представления, развитые при исследовании этого эффекта, существенно расширили наше понимание о процессах взаимодействия атомных частиц с твердым телом.

2. ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ БЛИСТЕРИНГА И ОТШЕЛУШИВАНИЯ

Для появления блистеров или начала отшелушивания необходима некоторая минимальная доза облучения ионами плохорастворимого газа. Эта минимальная доза называется критической дозой образования блистеров $\Phi_{кр}$ ^{6, 7}. Она растет с ростом энергии ионов (рис. 4), а также с увеличением растворимости газа. Например, для водорода $\Phi_{кр}$ больше, чем для гелия. Критическая доза $\Phi_{кр}$ зависит, кроме того, от материала,



температуры мишени и от кристаллографической ориентации поверхности. Однако эти зависимости слабее зависимостей от вида и энергии ионов. На $\Phi_{кр}$ влияет также вид энергетического спектра⁸⁻¹⁰ при облучении ионами с широким спектром.

Очевидно, что если за время облучения дозой $\Phi_{кр}$ распылится слой, больший, чем глубина проникновения ионов R_p (точнее, толщина крышки блистера), то концентрация атомов газа в поверхностном слое мишени будет всегда меньше критической и блистеры не образуются. Отсюда следует естественное условие образования блистеров

$$S\Phi_{кр} < R_p N, \quad (4)$$

где S — коэффициент распыления, N — число атомов мишени в единице объема. Для легких ионов H^+ , He^+ условие (1) выполнено при всех энергиях, а для тяжелых ионов — аргона, криптона, ксенона, для которых коэффициент распыления велик, условие (1) выполняется лишь при достаточно больших энергиях (100—1000 кэВ), когда R_p становится велико, а S — мало. Интересно, что для ионов Ne с энергией 20 кэВ, бомбардирующих монокристалл меди¹¹, условие (1) выполняется только, когда ионы входят в кристалл в условиях каналирования: при этом их глубина проникновения R_p максимальна, а коэффициент распыления S минимален.

Характер эрозии поверхности, т. е. образование блистеров либо отшелушивание определяется в основном температурой мишени во время облучения^{12, 13}. При малых температурах $T_{обл} < T_1 \approx 0,1 - 0,2T_{пл}$ ($T_{пл}$ — температура плавления) образуются блистеры с определенным диаметром. В интервале температур $T_1 < T_{обл} < T_2$ наблюдается отшелушивание; $T_2 \approx 0,4T_{пл}$, причем T_2 логарифмически растет с ростом

энергии ионов ¹²⁻¹⁶. В интервале температур $T_2 < T_{обл} < T_3$ отшелушивание опять сменяется блистерингом, $T_3 \approx 0,5-0,6T_{пл}$ и также логарифмически растет с ростом энергии ионов. При температурах $T_{обл} > T_3$ вместо блистеров образуется пористая поверхность (рис. 5), не подверженная блистерингу. На рис. 6 приведена зависимость критической

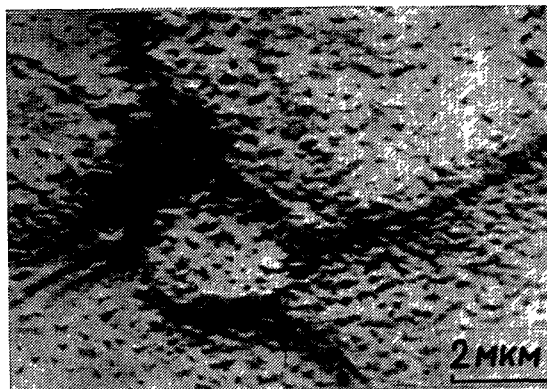


Рис. 5. Образование пористой поверхности на нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ в результате облучения ионами He^+ с энергией 40 кэВ при температуре 600 °С ($T_{обл} > T_3$) ¹³. Доза облучения 10^{18} см^{-2} .

концентрации атомов гелия, необходимой для образования блистеров, отшелушивания или пор, от отношения $T_{обл}/T_{пл}$ для различных металлов и сплавов ¹².

Как видно, критическая концентрация гелия (а также критическая доза $\Phi_{кр}$) для блистеринга и для отшелушивания приблизительно одинакова, а температурная зависи-

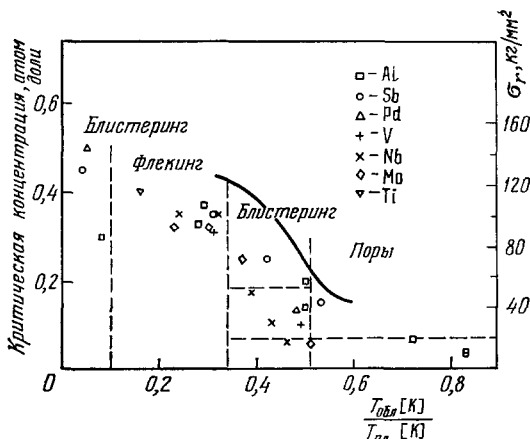


Рис. 6. Температурная зависимость критической концентрации гелия, необходимой для деформации поверхности ¹².

Сплошная кривая — зависимость предела текучести стали от температуры.

мость критической концентрации гелия определяется температурной зависимостью механических свойств материала. Вблизи температур T_1 и T_2 существуют небольшие переходные области, для которых характерно наличие как блистеров, так и отшелушенных участков (см., например, рис. 7). Для сравнения приведена температурная зависимость предела текучести $\sigma_T(T)$ стали.

На рис. 8 представлены измеренные М. Каминским и др. (см. ⁴) кривые зависимости скорости эрозии вследствие гелиевого блистеринга от температуры для ряда металлов. В соответствии с ¹⁸ максимальная эрозия поверхности наблюдается при $T_{обл} \approx (0,3-0,4) T_{пл}$.

Сдвиг максимума эрозии ($S = 1,75$ атом/ион) для алюминия в область комнатной температуры обусловлен низкой температурой плавления алюминия. Следует отметить, что по данным ¹⁹ при бомбардировке алюминия ионами He^+ с энергией 20 кэВ уже при температуре 265 К имеет место многослойное шелушение облученной поверхности. При дозе $1,9 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$

авторы цитируемой работы наблюдали отшелушивание 5 слоев алюминия толщиной 1800 Å каждый. При этом скорость эрозии составила 1,5 атом/ион.

Следует указать на существенное различие во времени образования блистеров и отшелушивания после достижения критической дозы. Томас и Бауэр¹⁷ наблюдали образование блистеров и отшелушивание с помощью сканирующего электронного микроскопа, подключенного непосредственно к ионному ускорителю, в процессе облучения титановой мишени ионами гелия с энергией 300 кэВ. Они обнаружили, что образование блистеров более инерционно и происходит в результате роста пузырей за время ~ 1 с (после достижения критической дозы $\Phi_{кр}$), в то время как отшелушивание слоя происходит в течение $\leq 0,016$ с (после достижения $\Phi_{кр}$).

Толщина крышек блистеров и отшелушенного слоя t определяется глубиной проникновения ионов (рис. 9). При большой энергии ионов

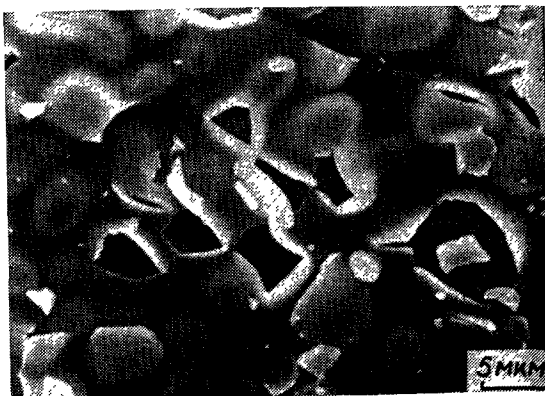


Рис. 7. Топография поверхности стали ОХ16Н15МЗБ после облучения ионами He^+ с энергией 40 кэВ ($0,3T_{пл} < T_{обл} < 0,4T_{пл}$). Доза облучения 10^{18} см^{-2} .

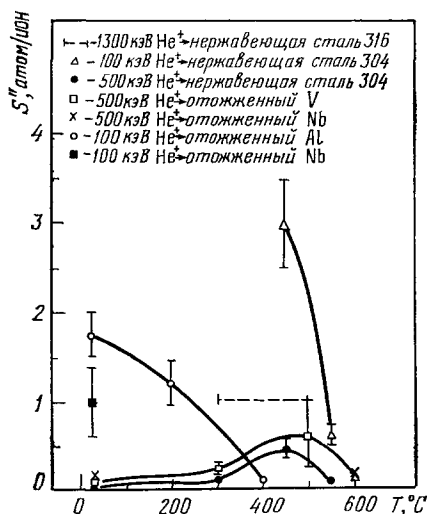


Рис. 8. Зависимость скорости эрозии от температуры в процессе облучения ионами He^+ различных материалов⁴².

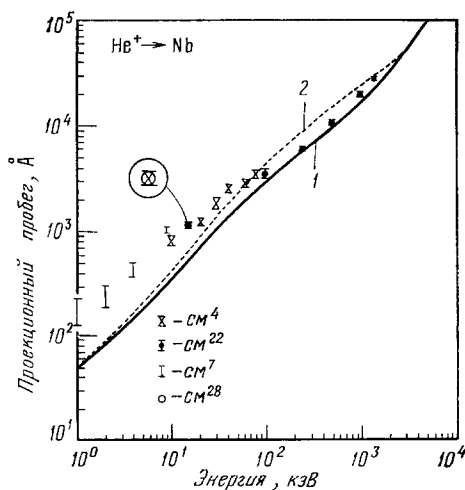


Рис. 9. Зависимость толщины крышек блистеров t для ниобия от энергии ионов гелия⁴.

Приведены экспериментальные данные разных авторов и теоретические расчеты среднего проекционного пробега ионов R_p : 1 — расчет Брайса⁴⁶, 2 — расчет по методу Линдхарда — Шарфа — Шютта²⁰.

($E > 40-50$ кэВ) толщина t совпадает со средней глубиной проникновения ионов R_p , а при меньших энергиях ионов в несколько раз превышает

глубину проникновения ионов R_p ⁷. Этот факт получил теоретическое объяснение, которое будет дано в следующем разделе.

Как мы уже говорили, при отшелушивании не существует определенных размеров удаленных кусков поверхностного слоя. Размеры отшелушенных кусков определяются, по-видимому, расстояниями между несовершенствами кристалла и составляют обычно 10—100 мкм. В противоположность отшелушиванию распределение блистеров по размеру достаточно узкое. Разброс диаметров блистеров d около среднего значения \bar{d} , как правило, не превышает \bar{d} . Типичные распределения размеров блистеров даны на рис. 10.

Средний диаметр блистеров связан с толщиной крышек блистеров соотношением

$$d \propto t^\nu. \quad (2)$$

Значение показателя степени ν близко к $\nu = 3/2$ ²¹, хотя возможны меньшие показатели $\nu = 1,15 - 1,25$ ²², $\nu = 0,9 - 1$ ²³; при этом ν зависит от механических свойств материала мишени. В низкотемпературной области блистеринга ($T_{обл} < T_1$) размеры блистеров не зависят от температуры, а в высокотемпературном интервале ($T_2 < T_{обл} < T_3$) размеры блистеров уменьшаются с ростом температуры (см. рис. 10). Объяснение этим фактам будет дано в теоретическом разделе. Поверхностная плотность блистеров, т. е. количество блистеров на единицу поверхности, растет с ростом

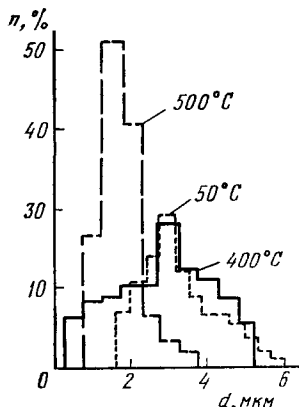


Рис. 10. Распределение блистеров по диаметрам при различных температурах.

дозы, причем тем быстрее, чем больше плотность тока ионов, достигая такой плотности, при которой расстояния между блистерами приблизительно равны размеру блистеров. Поэтому плотность блистеров при малых энергиях больше, чем при больших энергиях. Исследования^{24, 25} блистеринга при наклонном падении ионов гелия показали уменьшение эрозии поверхности при увеличении угла падения ионов. Закономерности гелиевого блистеринга при наклонном падении, наряду с некоторыми общими чертами, отличаются от закономерностей блистеринга, вызванного нормально падающими ионами меньшей энергии (с глубиной проникновения, равной глубине проникновения наклонно падающих ионов). Так, толщина крышек блистеров t с хорошей точностью определяется зависимостью

$$t \propto \cos \theta,$$

где θ — угол падения ионов, а размеры блистеров (в температурном интервале $T_{обл} < T_1$) приблизительно следуют закону

$$d \propto \cos^{3/2} \theta.$$

В то же время критическая доза образования блистеров $\Phi_{кр}$ не зависит от угла падения вплоть до $\theta \approx 75^\circ$, что является следствием компенсации зависимости от θ различных факторов, определяющих $\Phi_{кр}$, а при больших θ $\Phi_{кр}$ резко возрастает, вследствие увеличения коэффициента отражения ионов (см. рис. 14). При увеличении угла падения уменьшается температурный интервал $T_1 < T_{обл} < T_2$, где наблюдается отшелушивание, причем в основном за счет уменьшения температуры T_2 . Этот эффект сильнее проявляется для ионов малой энергии. Так, при $E = 40$ кэВ и $\theta = 75^\circ$ отшелушивание практически отсутствует ($T_1 \approx T_2$).

В отличие от флекинга, при котором сразу происходит отрыв поверхностного слоя, блистеры при дозах, немного превышающих критическую $\Phi_{кр}$, имеют неразрушенные купола (см. рис. 1). Однако при увеличении дозы облучения в 1—2 раза происходит разрушение куполов блистеров. По характеру разрушенных куполов их можно разделить на две группы: с периферийными (см. рис. 2) и центральными (рис. 12) разрывами¹⁶. Вид разрушения определяется рядом факторов: температурой, плотностью тока и т. п., но основную роль, по-видимому, играет пластичность материала. Для более пластичных материалов характерны купола с центральным разрывом, для более хрупких — периферийный разрыв. При периферийном разрыве крышки блистеров, как правило, удаляются. При центральном разрыве необходимо еще некоторое увеличение дозы для удаления крышек блистеров, которое происходит за счет «скручивания» крышек, и поверхность после удаления крышек напоминает поверхность после флекинга. Это является результатом не только дополнительного внедрения газа в крышку блистера, но и следствием разогрева

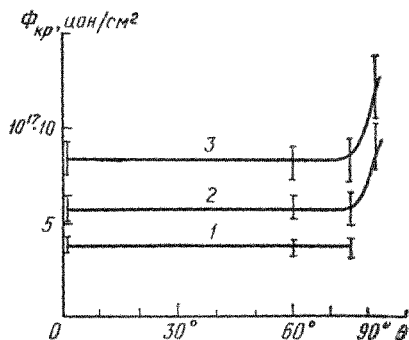


Рис. 11. Зависимость критической дозы образования гелиевых блистеров на стали от угла падения для различной энергии ионов ²⁵:

1 — 20 кэВ, 2 — 40 кэВ, 3 — 80 кэВ.

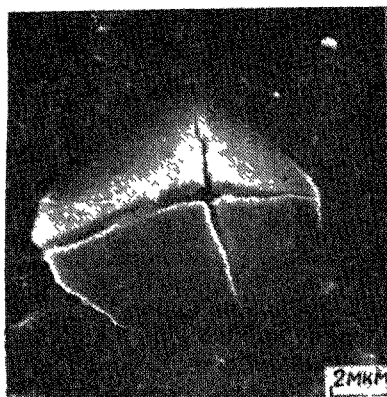


Рис. 12. Блистеры с центральными разрывами крышек.

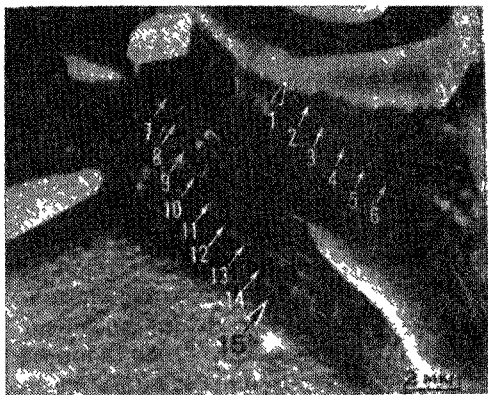


Рис. 13. Отшелушивание 15 слоев ниобия, облученного ионами He^+ с энергией 100 кэВ ²⁶.

ионным пучком крышки, имеющей плохой тепловой контакт с основной массой образца.

После отрыва крышек блистеров и отшелушивания части поверхностного слоя возможно образование следующего поколения блистеров или отшелушивания. Дас и Каминский ^{26, 27} зафиксировали отшелушивание более 3 слоев ниобия ($T_{обл} = 400^\circ\text{C}$) толщиной 0,3 мкм каждый и 15 слоев (см. рис. 13) толщиной 0,55 мкм каждый нержавеющей стали ($T_{обл} = 450^\circ\text{C}$) при бомбардировке ионами гелия с энергией 100 кэВ при дозе облучения $1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ и не обнаружили никакого намека на прекращение отшелушивания. Такие эксперименты наводили на мысль,

что отшелушивание и блистеринг будут повторяться без конца, хотя, по данным²⁸, при той же энергии ионов He^+ , но при плотности тока 1 мА/см^2 на поверхности ниобия при дозе $1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^2$ появляются поры и поверхность не подвержена блистерообразованию. При бомбардировке ниобия ионами He^+ значительно меньших энергий 5, 10 и 15 кэВ²⁹ наблюдаться всего одно поколение блистеров, и после распыления слоя толщиной, равной толщине крышек блистеров, блистеринг прекращался. В работе²⁸ были проведены исследования зависимости топографии поверхности от дозы облучения ионами с энергиями 50 и 100 кэВ. Авторы²⁸

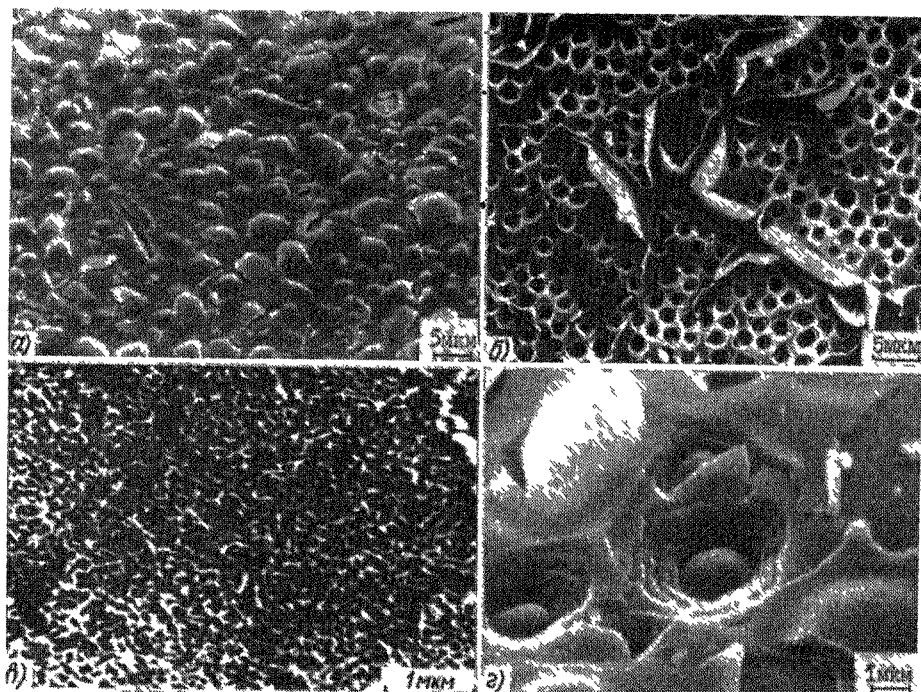


Рис 14 Изменение структуры поверхности хромо-никелевого сплава, облученного ионами He^+ с энергией 40 кэВ при увеличении дозы облучения Φ

Φ (см^2) — $3 \cdot 10^{18}$ (а) $6 \cdot 10^{18}$ (б) $6 \cdot 10^{19}$ (в) $6 \cdot 10^{20}$ (г), 100 кэВ

обнаружили при дозах облучения $1,2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-2}$ образование пористой поверхности, которая весьма напоминала поверхность после облучения при высокой температуре ($T_{\text{обт}} > T_i$); в дальнейшем она уже не была подвержена блистерингу. Проведенные исследования зависимости блистеринга от дозы ионов при больших дозах и относительно небольшой плотности тока (30 мкА/см^2)³⁰ позволили выявить следующие особенности. После отрыва крышек блистеров, образованных в результате имплантации ионов He^+ с энергией $E = 40 \text{ кэВ}$, образуются блистеры следующего поколения, но только на поверхности, не прикрытой остатками верхнего слоя, т.е. блистеры последующих поколений оказываются как бы «вложенными» в кратеры, оставшиеся от блистеров предыдущего поколения (рис 14). Диаметры блистеров уменьшаются от поколения к поколению, причем разность диаметров двух последующих поколений блистеров приблизительно равна удвоенному боковому разбросу пробега ионов $\sqrt{V \Delta R_L^2}$

$$d_{i+1} - d_n = 2 \sqrt{V \Delta R_L^2} \quad (3)$$

Уменьшение диаметра блистеров от поколения к поколению было объяснено ³⁰ краевым эффектом облучения ионами вблизи границы области, прикрытой сверху остатками слоя предыдущего поколения. К тому же существует и минимальный возможный (для ионов данной энергии) диаметр блистеров d_{\min} ³⁰. Отсюда следует, что для каждой энергии ионов существует конечное и определенное число поколений блистеров, равное

$$n_{\max} = \frac{d_1 - d_{\min}}{2 \sqrt{\Delta R_1^2}}. \quad (4)$$

Действительно, как наблюдалось в работе ³⁰, после образования максимально возможного числа поколений блистеров происходит лишь распыление поверхностной структуры, а новых блистеров не образуется. После того как распылится слой толщиной, равной глубине блистеров последнего поколения, образуется пористая поверхность, которая и наблюдалась ²⁹ впервые при облучении ионами гелия малой энергии, где возможно всего одно поколение блистеров. В работе ²⁸ рассчитаны дозы, необходимые для распыления слоя ниобия, равного толщине оболочек блистеров при бомбардировке ионами He^+ различных энергий. Согласно ³⁰ для ионов гелия с энергией 40 кэВ $n_{\max} = 3$, для ионов гелия с энергией 100 кэВ $n_{\max} = 6$. В соответствии со сказанным выше доза прекращения блистеринга уменьшается с увеличением угла падения ионов θ ²⁵, что связано с уменьшением размеров блистеров, а вследствие увеличения коэффициента распыления при увеличении угла падения уменьшается доза образования пористой поверхности.

В случае отшелушивания кратеры, оставшиеся после отрыва кусков поверхности, также «вкладываются» один в другой, уменьшаясь при этом от поколения к поколению (см. рис. 13), но поскольку при отшелушивании не существует определенного размера отрываемых кусков поверхности, нет и определенного числа возможных поколений отшелушенных слоев. И вследствие больших размеров отшелушиваемых кусков поверхности возможно много поколений флекинга (выплоть до 15 слоев), как это было обнаружено в работах ^{26, 28, 30, 36}. Однако уменьшение размеров отшелушенных кусков поверхности от поколения к поколению показывает, что и в случае флекинга возможно лишь конечное число поколений отшелушенных слоев (см. рис. 14, з). Кроме того, часто наблюдается переход от флекинга к образованию блистеров после нескольких поколений отшелушенных слоев ²¹. После этого число возможных поколений блистеров определяется уже приведенной выше формулой.

Таким образом, блистеринг и отшелушивание — явления преходящие. При достаточно большой дозе образуется равновесная пористая поверхность, не подверженная блистерингу.

Описанные выше закономерности блистеринга и отшелушивания имеют в большой степени универсальный характер для различных материалов при облучении ионами гелия в широком диапазоне значений энергии и плотности тока ионов He . Однако от материала мишени и его обработки зависят такие характеристики, как критическая доза образования блистеров $\Phi_{\text{кр}}$, температуры переходов (T_1 , T_2 , T_3) блистеринг — флекинг — блистеринг — поры. Критическая доза $\Phi_{\text{кр}}$ для отожженных материалов несколько больше, чем для холоднокатанных, но в то же время отожженные образцы имеют больший температурный интервал, в котором наблюдается отшелушивание в основном за счет уменьшения температуры перехода T_1 ¹⁷.

Температуры переходов T_1 , T_2 и T_3 , а также размеры отшелушенной площади при флекинге зависят от материала мишени. Например, с увели-

чением содержания Ni в пержавающей стали увеличиваются температурный интервал, где наблюдается флэкинг, и процент отшелушенной поверхности. Следует отметить, что в некоторых случаях даже небольшой процент легирующей примеси может существенно изменить характер эрозии. Например, добавка всего 3% Ti в ванадий смещает температуры перехода от блистеринга к отшелушиванию T_1 и от отшелушивания к блистерингу T_2 на 300 °C³¹. Эксперименты³² показали уменьшение блистеринга стали 0X16H15M3Б после ее легирования ионами марганца, никеля, углерода, бора. В то же время легирование ионами хрома увеличивает эрозию поверхности при блистеринге.

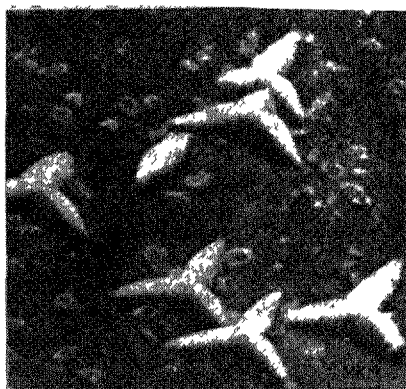


Рис. 15. Блистеры на поверхности монокристалла ниобия (грань $\langle 111 \rangle$), облученного ионами He^+ с энергией 500 кэВ дозой $6 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ³⁴.

На характер эрозии влияет также кристаллографическая ориентация. При облучении монокристаллов, как уже отмечалось, результаты зависят от условий каналирования. При выполнении условий каналирования возрастает глубина проникновения ионов, толщина крышек блистеров и, в соответствии с теоретическими представлениями (см. следующий раздел), отмечается³³ предпочтительное образование блистеров вместо отшелушивания. Помимо этого, вследствие анизотропии свойств блистеры на монокристаллах имеют специфическую для данной грани форму

(рис. 15)^{11, 34, 35}. Кроме того, дальнейший характер эрозии различных граней при неориентированном облучении может быть совершенно различен. Так, например³⁶, для ванадия, облучаемого ионами He^+ с энергией

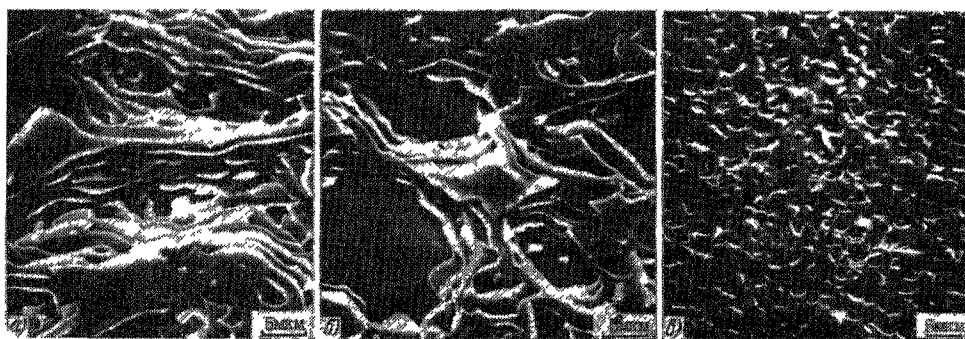


Рис. 16. Микроструктура поверхности монокристаллического ванадия после облучения ионами He^+ с энергией 40 кэВ дозой $3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ ($T_{\text{обл}} = 200 \text{ °C}$)³⁶.

(а) Грань $\langle 110 \rangle$, б) грань $\langle 100 \rangle$, в) грань $\langle 111 \rangle$

40 кэВ дозой $\Phi = 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$, на грани $\langle 110 \rangle$, наблюдалось многослойное шелушение десяти слоев (рис. 16, а) и скорость эрозии составила $S = 10$ атом/ион, в то время как на грани $\langle 111 \rangle$ при тех же условиях облучения было зафиксировано образование блистеров трех поколений (рис. 16, в) и скорость эрозии составила $S = 0,2$ атом/ион.

На одной из граней поликристаллического ниобия, облученного ионами гелия с широким спектром энергий дозой $\Phi = 10^{19} \text{ см}^{-2}$, наблюдался флекинг, а на другой — в том же эксперименте — блистеринг.

Для хрупких материалов, таких как некоторые сорта графита, характер эрозии при внедрении ионов плохо растворимых газов может существенно отличаться от блистеринга и отшелушивания, характерных для металлов. В этом случае под действием возникающего давления происходит хрупкое разрушение поверхности (рис. 17)³⁷. На рис. 18 представлена топография поверхности различных сортов графита, облученных ионами He^+ . Картина эрозии поверхности особо чистого графита свидетельствует о том, что для хрупких материалов поверхностный слой не отрывается по трещине, проходящей параллельно поверхности, а происходит отрыв не регулярных кусков материала и на поверхности образуются ямки и трещины. В случае пиролитического графита, имеющего анизотропную

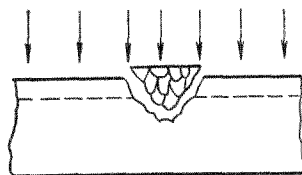


Рис. 17. Схема разрушения хрупкого материала³⁷.

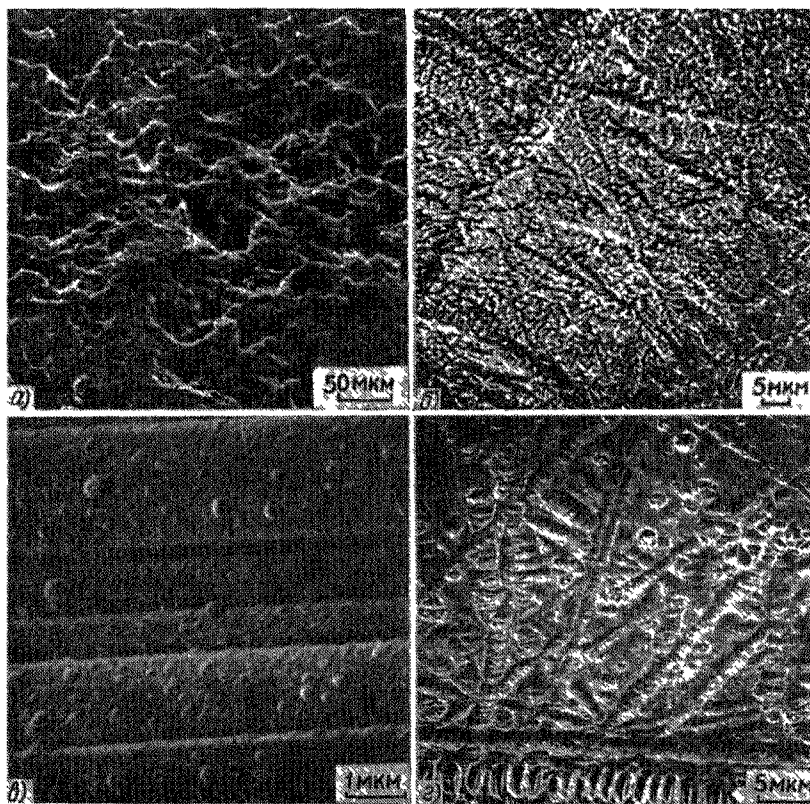


Рис. 18. Эрозия поверхности различных сортов графита, облученного ионами He^+ с энергией 20 кэВ (доза 10^{18} см^{-2}).

а) Особо чистый графит, б) пиролитический γ , в) графитовая ткань WCA, г) стеклографит

структуру, разрушение поверхности также анизотропно (рис. 18, б)³⁷. После облучения ионами He^+ с энергией 100 кэВ при дозах 10^{18} — $5 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ было обнаружено шелушение предварительно полиро-

важной поверхности пиролитического графита³⁸. В то же время на некоторых хрупких материалах, например, карбиде тантала (рис. 19), карбиде ниобия при облучении ионами гелия закономерности блистерообразования такие же, как на металлических поверхностях³⁹.

Зависимость блистеринга от плотности тока ионов⁴ при используемых обычно плотностях тока $j = 1-10^3$ мкА сравнительно слабая: с ростом j несколько уменьшается критическая доза образования блистеров, увеличивается размер блистеров и их плотность, а также интервал температур, где наблюдается отшелушивание. Однако это влияние связывают иногда⁴⁰ с дополнительным разогревом поверхности ионным током.

До сих пор, описывая закономерности блистеринга и отшелушивания, мы в основном имели в виду гелиевый блистеринг. Вследствие большей

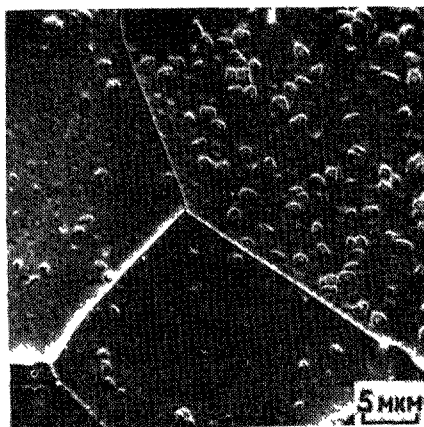


Рис. 19. Микроструктура поверхности TaC после облучения ионами He⁺ с энергией 40 кэВ при температуре 500 °С (доза $3 \cdot 10^{18}$ см⁻²).

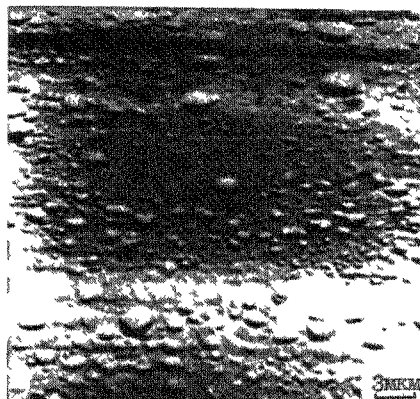


Рис. 20. Водородный блистеринг на поверхности алюминия после имплантации ионов H⁺ с энергией 20 кэВ (доза $D = 10^{18}$ см⁻²)³⁶.

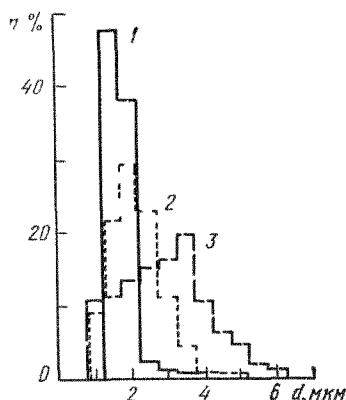
растворимости водорода и большей скорости его диффузии в металлах по сравнению с гелием блистеринг при облучении ионами водорода выражен значительно слабее. Критическая доза $\Phi_{кр}$ образования водородного блистеринга значительно больше, чем для гелиевого блистеринга, и составляет обычно величину $10^{18}-10^{19}$ ион/см² (ср. с рис. 4, где приведены значения $\Phi_{кр}$ для гелиевого блистеринга). При этом водородный блистеринг наблюдается в основном для металлов, плохо растворяющих водород (Al, Mo, Ni, нержавеющая сталь и др.^{37, 40-41}). На металлах, хорошо растворяющих водород, как правило, водородный блистеринг не наблюдается. Вместе с тем в работах^{37, 43} был зафиксирован водородный блистеринг в ванадии. Отшелушивания при облучении водородом не происходит, образуются лишь блистеры, причем в большинстве случаев не происходит вскрытия водородных блистеров (рис. 20)⁴⁴.

Поскольку в термоядерных реакторах материалы будут подвержены одновременному облучению и ионами гелия и ионами дейтерия и трития, исследования блистеринга при одновременном облучении ионами D⁺ и He⁺ представляют особый интерес. Уже первые опыты⁴⁵ по одновременному облучению никеля ионами D⁺ и He⁺ выявили уменьшение критической дозы образования блистеров по сравнению с чисто гелиевым блистерингом. Более подробные исследования⁴⁶ блистеринга при одновременном и последовательном облучении нержавеющей стали ионами D⁺ и He⁺

(D^+ -доза $6 \cdot 10^{18}$, $E = 20$ кэВ, He^+ — 10^{18} см $^{-2}$, $E = 40$ кэВ, при таком выборе энергии профили распределения D и He по глубине практически совпадали) показали, что основную роль в развитии блистеринга играет

Рис 21 Распределение блистеров по диаметрам при различных условиях облучения в режиме $\Phi_{D^+} = 6 \cdot 10^{18}$ см $^{-2}$, $E_{D^+} = 20$ кэВ, $\Phi_{He^+} = 10^{18}$ см $^{-2}$, $E_{He^+} = 40$ кэВ

1 — последовательное облучение вначале ионами D^+ затем He^+
2 — одновременное облучение ионами D^+ и He^+ 3 — облучение ионами гелия



гелия, а дейтерий вызывает лишь сопутствующие эффекты (несмотря на то, что доза дейтерия была в 6 раз больше), что обусловлено худшей растворимостью гелия. В то же время внедрение дейтерия существенно

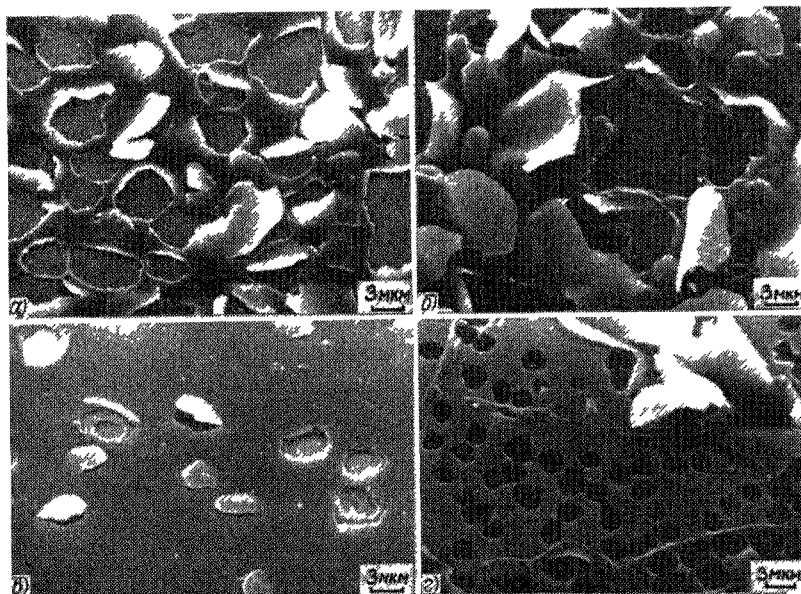


Рис 22 Микроструктура поверхности нержавеющей стали ОХ16Н15МЗБ после облучения ионами He (а), одновременно ионами D^+ и He^+ (б), последовательно вначале D^+ , а затем He^+ (в), последовательно вначале He^+ а затем D^+ (г) ⁴⁶
 $T_{обл} = 200^\circ C$ $\Phi_D = 6 \cdot 10^{18}$ $E_D = 20$ кэВ, $\Phi(He^+) = 10^{18}$ $E(He^+) = 40$ кэВ

меняло картину эрозии. При температурах, характерных для блистеринга ($T_2 < T_{обл} < T_3$), внедрение дейтерия (рис 21) уменьшало размеры блистеров, причем если внедрение дейтерия и гелия проводилось одно временно, то число блистеров на единицу поверхности возрастало в $\sim 3,5$ раза по сравнению с гелиевым блистерингом, а если дейтерий внед-

рялся предварительно, то плотность блистеров возрастала несущественно. При температурах, характерных для отшелушивания ($T_1 < T_{\text{обл}} < T_2$), одновременное внедрение D^+ и He^+ приводит к резкому увеличению эрозии (рис. 22): вместо одного отшелушенного слоя — при гелиевом облучении, отшелушивается три слоя. В то же время при последовательном облучении D^+ и He^+ вместо отшелушивания образуются блистеры двух поколений. При обратной последовательности облучения He^+ и D^+ образуется один отшелушенный слой, а затем блистеры двух поколений. Эти эксперименты наглядно продемонстрировали различие блистеринга при одновременном и последовательном облучении, показали, насколько сложны происходящие процессы, как сильно они зависят от режимов облучения, и насколько трудно прогнозировать эффекты при неисследованных условиях облучения.

3. ТЕОРИЯ

При разработке теории блистеринга и отшелушивания вначале основное внимание уделялось механизму выпучивания поверхностного слоя мишени, после того как под этим слоем образовалась трещина (рис. 23). Было предложено два механизма выпучивания поверхностного слоя.

Первый механизм⁴⁷⁻⁴⁹ предполагает, что выпучивание происходит под действием давления газа в полости трещины. Согласно Эвансу⁴⁸,

для того чтобы давление газа могло действительно произвести пластическую деформацию (именно такая деформация наблюдается экспериментально) крышки блистера, необходимо выделение $\sim 10\%$ газа, внедренного в мишень при облучении ее критической дозой.

В соответствии со вторым механизмом^{40, 50} давление газа играет роль лишь небольшой затравочной силы и может быть мало, а вспучивание

происходит в основном за счет внутреннего бокового напряжения в поверхностном слое, т. е. в крышке блистера. Это напряжение возникает в результате внедрения плохорастворимых газов. В работах^{40, 50} был использован факт, известный из теории пластин, что величина отклонения центра круглой пластины равна

$$w = \frac{w_0}{1 - \alpha}, \quad \alpha = \frac{Sd^2}{kN}, \quad (5)$$

где w_0 — отклонение в отсутствие внутреннего бокового напряжения (при $S = 0$), d — диаметр пластины, $N = Et^3/12(1 - \nu^2)$ — жесткость пластины, t — толщина пластины, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона, k — коэффициент, зависящий от краевых условий ($k = 5,6$ для опертого края, $k = 19,6$ для закрепленного края); интегральное напряжение

$$S = \int_0^t \sigma_{rr}(z) dz, \quad (6)$$

$\sigma_{rr}(z)$ — радиальное (боковое) напряжение на глубине z . Из (5) видно, что даже при малом w_0 появляется неустойчивость пластины и переход к пластической деформации, когда знаменатель (5) стремится к нулю. Отсюда следует, что при постоянном S диаметр блистера и его толщина

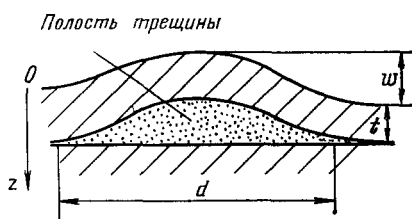


Рис. 23. Схема выпучивания поверхностного слоя мишени.

связаны соотношением

$$d \propto t^{3/2}, \quad (7)$$

которое, как отмечалось выше, наблюдалось экспериментально ²¹. Отсюда был сделан вывод, что за образование блистеров с определенным диаметром ответствен механизм бокового напряжения.

При отсутствии бокового напряжения ($S = 0$) газ, попадающий в полость трещины, создает на границе трещины изгибающий верхний слой боковой момент, равный ⁴⁰

$$M_r = \sqrt{n_a R T N}, \quad (8)$$

где R — газовая постоянная, T — температура, N — жесткость верхнего слоя, n_a — число атомов газа, выделившееся в полость трещины на единицу поверхности. Как видно из (8), момент M_r не зависит от размеров блистера d , т. е. процесс отрыва поверхностного слоя, возникнув, будет распространяться без конца, что похоже на процесс отшелушивания с отрывом больших кусков поверхностного слоя. Поэтому авторы работы ⁴⁰ предположили, что отшелушивание происходит в результате отрыва поверхностного слоя давлением газа в полости трещины.

Однако в описанных выше работах не рассматривался процесс образования трещины, который должен предшествовать выпучиванию крышек блистеров и отшелушиванию. Не было ясно также, при каких условиях преобладает механизм бокового напряжения, а при каких — механизм отрыва поверхностного слоя давлением газа в полости трещины.

Образование трещины в результате разрыва материала между мелкими ($\sim 10 \div 100 \text{ \AA}$) пузырьками газа с большим давлением было впервые рассмотрено Эвансом ⁴⁸, а затем более подробно Мартыненко ^{51, 52}. В ⁵² были найдены также условия, при которых преобладает первый или второй механизм выпучивания и отрыва верхнего слоя.

Предполагалось ^{51, 52}, что за счет объединения атомов газа *) и вакансий, созданных при облучении мишени ионами, образуются пузырьки размером $10\text{--}100 \text{ \AA}$. Такие пузырьки действительно наблюдались ⁵³ при электронно-микроскопическом исследовании материала, облученного дозой несколько меньшей, чем критическая доза образования блистеров. Позднее было получено ⁵⁴ даже распределение таких пузырьков по глубине.

Вследствие плохой растворимости газа давление в пузырьке может достигать значений $p \approx 0,1 \text{ E} \approx 0,1 \text{ эВ/\AA}^3$ (E — модуль Юнга). Согласно расчетам по макроскопической модели ⁵² для сравнительно крупных пузырьков на каждую вакансию в пузырьке может приходиться 3—4 атома гелия. Расчеты на ЭВМ ⁵⁵ мелких пузырьков (≤ 4 вакансии) показали, что на каждую вакансию может приходиться до 6 атомов гелия. Такие давления в пузырьке сдерживаются за счет напряжений деформации вокруг пузырька и создают напряжение в облученном слое. Полученное в упрощенном виде ⁵¹ распределение напряжения σ по глубине z имеет вид

$$\sigma_1^1(z) = H \left(C_{\text{He}}(z) - C_v(z) \frac{\Omega}{\Omega_{\text{He}}} \right), \quad (9)$$

где H — энергия растворения атомов газа (для определенности — He), $C_{\text{He}}(z)$ и $C_v(z)$ — концентрации внедрения атомов гелия и созданных ими вакансий, которые попали в пузырьки, $\Omega/\Omega_{\text{He}}$ — параметр, который

*) При водородном блистеринге атомы водорода, попадая в пузырек, образуют молекулу H_2 . При растворении водорода из пузырька в матрице металла помимо энергии растворения атомарного водорода надо затратить еще энергию диссоциации.

имеет смысл отношения объемов вакансии Ω и атома гелия Ω_{He} (рис. 24). Позднее ⁵² было получено более точное выражение для $\sigma(z)$, не содержащее подгоночных параметров, однако мы не приводим это выражение, во-первых, ввиду его громоздкости, а, во-вторых, поскольку (9) позволяет более наглядно объяснить наблюдаемые закономерности.

Переход от микроскопической картины пузырьков газа во внедренном слое к макроскопическим эффектам блистеринга и отшелушивания получается путем следующих естественных предположений. Предполагается, что разрыв материала (в промежутках между пузырьками) и образование трещины происходит на той глубине $z = t$, где $\sigma(z)$ максимально, и при такой дозе, когда $\sigma_{\text{max}} = \sigma(t)$ станет равной пределу прочности

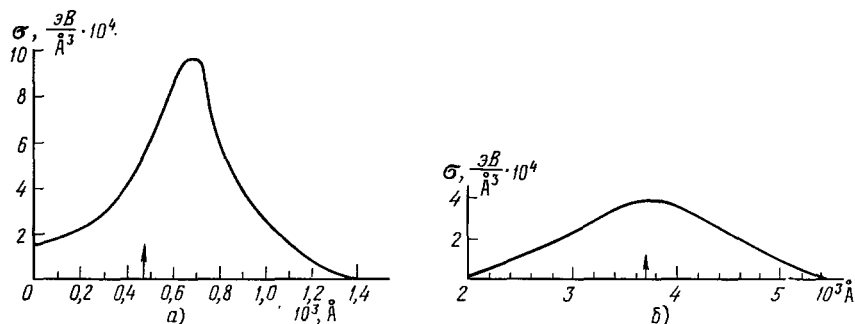


Рис. 24. Профили напряжения $\sigma(z)$ в ниобии, рассчитанные ⁵³ для случаев облучения ионами He^+ с энергией 10 кэВ (а) и 80 кэВ (б).

Стрелками указаны положения максимумов распределений внедренных ионов He . Толщина крышек блистеров, предполагается, совпадает с положением максимума $\sigma(z)$.

материала σ_f . Отсюда получается критическая доза $\Phi_{\text{кр}}$ образования блистеров и отшелушивания (см. рис. 4), где дано сравнение теоретического расчета с экспериментом. Положение максимума $\sigma(z)$ определяет глубину трещины или толщину крышек блистеров t . Поскольку, как известно ⁵⁶, распределение вакансий $C_v(z)$, создаваемых ионами, сдвинуто к поверхности по отношению к распределению внедренных ионов $C_{\text{He}}(z)$, максимум распределения $\sigma(z)$ лежит глубже, чем максимум $C_{\text{He}}(z)$. Другими словами, на малых глубинах ($z < t$) находится большое количество пузырьков, но давление в них меньше (отношение C_v/C_{He} — больше), чем на больших глубинах ($z > t$). Поэтому толщина крышек блистеров t оказывается больше средней глубины проникновения ионов R_p . Причем, как показано в ⁵², это проявляется сильнее при малых энергиях ионов.

Зная распределение напряжения $\sigma(z)$ по глубине, мы можем рассчитать интегральное напряжение S , а также диаметр блистеров по формуле (5) и тем самым найти условия, при которых крышки блистеров могут выпучиваться за счет механизма внутреннего напряжения.

Для оценки роли давления газа в полости трещины необходимо определить количество газа, выделяющегося из материала в объем трещины. Это количество газа было оценено ⁵² в предположении, что газ выделяется в трещину из слоя, примыкающего к трещине, в котором при достижении критической дозы $\Phi_{\text{кр}}$ напряжение превышает предел текучести.

Численные оценки показывают ⁵² принципиальную возможность вспучивания поверхностного слоя, как вследствие давления газа в полости трещины, так и в результате возникшего бокового напряжения в этом слое; точность расчетов, однако, не может ответить на вопрос, когда

какой механизм преобладает, т. е. когда образуются блистеры определенного размера, а когда происходит отшелушивание. Теория гораздо лучше предсказывает функциональные зависимости. Например, из оценок бокового напряжения S и доли газа, выделившегося в полость трещины, следует, что отшелушивание более вероятно при больших энергиях, а блистеринг — при малых энергиях ионов. Кроме того, поскольку S слабо растет с ростом толщин крышки блистеров t , становится понятно, почему диаметр блистеров, равный, согласно (5),

$$d = \sqrt{\frac{kN(t)}{S}} = \sqrt{\frac{kEt^3}{12(1-\nu^2)S}}, \quad (10)$$

пропорционален $d \propto t^\nu$, где ν — несколько меньше, чем $\nu = 3/2$.

Другой важный параметр, который определяет вид эрозии поверхности — это температура мишени^{12, 13, 18}. При увеличении температуры мишени происходит, во-первых, уменьшение предела текучести σ_T , а, во-вторых, вследствие диффузии атомов газа и вакансий — расширение профиля $\sigma(z)$. Это приводит к уменьшению интегрального напряжения S и увеличению доли газа, выделяющегося в полость трещины n_a с ростом температуры. В результате при некоторой температуре $T = T_1$ механизм бокового напряжения уступает место механизму давления газа, и наблюдается переход от блистеринга к отшелушиванию. Дальнейшее возрастание температуры приводит к еще большему расширению профиля $\sigma(z)$ и увеличению области пластической деформации. Когда область пластической деформации станет сравнима с толщиной крышек блистеров t , резко уменьшается жесткость поверхностного слоя N .

Согласно⁵⁷ для несжимаемого материала с $\nu = 1/2$ жесткость пластины толщиной t , в которой упругая деформация простирается на глубину θ , а в слое толщиной $(t - \theta)$ — деформация пластическая, равна

$$N = \frac{E}{6} \theta \left(t^2 - \frac{\theta^2}{3} \right). \quad (11)$$

Отсюда видно, что при $\theta \rightarrow 0$ $N \rightarrow 0$, а согласно (5) при этом уменьшается α , что приводит к преобладанию механизма бокового напряжения. Другими словами, менее жесткая пластина деформируется меньшим боковым напряжением. Поэтому при некоторой температуре $T = T_2$ опять происходит переход от отшелушивания к блистерингу. При температурах $T \gg T_2$ расширение профиля $\sigma(z)$ происходит за счет диффузии атомов гелия и вакансий, и ширина профиля оказывается пропорциональной $\propto \sqrt{D} = \sqrt{D_0} \exp(-U/2T)$, где D — коэффициент диффузии, T — температура, а U — энергия активации диффузии. Отсюда получается логарифмическая зависимость температуры T_2 от толщины крышки блистеров t или от энергии ионов E , которая подтверждается экспериментально¹²⁻¹⁶. В области $T_2 < T < T_3$ размеры блистеров уменьшаются с ростом температуры в соответствии с (10) вследствие дальнейшего уменьшения жесткости N .

При температуре $T = T_3$, при которой жесткость N обращается в нуль, блистеринг прекращается. Это происходит, когда профиль $\sigma(z)$ имеет столбовидную форму и начинается от поверхности. Здесь трещина, параллельная поверхности, не образуется. Распределение пузырьков газа также имеет столбовидную форму и начинается от поверхности, поэтому при объединении пузырьки газа образуют каналы, выходящие на поверхность, по которым газ может выделиться из мишени. Поверхность приобретает губчатую, пористую структуру. Температура перехода от блистеров к пористой структуре также логарифмически растет с ростом энергии.

Обратим внимание, что такая же пористая структура образуется и при низких температурах, когда реализуются столообразные распределения $C_{He}(z)$ и $C_v(z)$, ср. рис. 5 и 13, в. Это происходит, как уже говорилось в предыдущем разделе, при больших дозах облучения, когда распыляется слой толщиной большей, чем толщина крышек блистеров. Столообразное распределение $C_{He}(z)$ и $C_v(z)$ возможно также при облучении ионами с широким спектром энергий⁸⁻¹⁰.

4. СПОСОБЫ УМЕНЬШЕНИЯ ЭРОЗИИ МАТЕРИАЛОВ ПРИ БЛИСТЕРИНГЕ И ОТШЕЛУШИВАНИИ

Как было показано, блистеринг и отшелушивание — явления переходящие. Однако при температурах, характерных для отшелушивания ($T_1 < T_{обл} < T_2$), эрозия может продолжаться при дозах $> 10^{20} - 10^{21}$ ион/см², существенно ухудшая работу термоядерного реактора. Кроме того, если поверхность возобновляется в процессе работы (например, вследствие осаждения продуктов распыления с других частей поверхности⁵⁸, либо специально для компенсации эрозии), то блистеринг и отшелушивание могут продолжаться без конца. Поэтому необходимо искать пути уменьшения эрозии при блистеринге и отшелушивании.

Один из возможных путей уменьшения эрозии — это выбор рабочей температуры мишени. Предпочтительными с точки зрения блистеринга являются либо высокие температуры, когда блистеринга уже нет ($T_{обл} > T_3$) или образуются мелкие блистеры ($T_2 < T_{обл} < T_3$), либо низкие температуры, когда нет отшелушивания, а есть лишь блистеры определенного диаметра.

Другой путь уменьшения блистеринга будет выполняться автоматически — это облучение ионами с широким спектром энергий. В этом случае также получаются распределение дефектов и внедренных ионов, близкие к столообразному, начинающемуся от поверхности, либо спадающему от поверхности вглубь, а это, как следует из теории и было показано экспериментально^{9, 29, 28, 59}, приводит к образованию пористой поверхности, не подверженной блистерингу.

В работе⁶⁰ в качестве метода уменьшения эрозии при блистеринге предлагалась холодная прокатка материала. Хотя критическая доза образования блистеров для холоднокатаных образцов уменьшается, однако вскрытие блистеров и отрыв их крышек происходит при больших дозах, чем для отожженных образцов. Кроме того, температурный интервал, где наблюдается отшелушивание, для холоднокатаных образцов меньше. В целом холодная прокатка уменьшает скорость эрозии.

Блистеринг может быть существенно уменьшен или полностью подавлен с помощью специальной технологии изготовления материала. Так, если мишень представляет собой пористое вещество, полученное, например, методом спекания порошка, и расстояние между порами меньше минимального диаметра блистеров d_{min} (см. гл. 3), то создаются хорошие условия для выделения газа по порам, и даже если в материале образуется микротрещина, блистеринг образоваться не может и газ по трещине выделится в пору. В действительности на спеченных алюминиевом и бериллиевом порошках блистеринг не наблюдался^{61, 62}. Отметим также, что пористые материалы имеют меньший коэффициент распыления^{63, 64}. Однако их применение может быть ограничено трудностями вакуумной откачки, ухудшением теплопроводности. Кроме того, пористые материалы будут не эффективны для возобновляемой напылением поверхности.

Физически наиболее интересный метод подавления блистеринга — это легирование материала специальными примесями. Если, например,

такие примеси являются ловушками для атомов гелия, причем энергия атома гелия в ловушке существенно меньше, чем в междоузлии, то создается как бы квазирастворимость гелия, уменьшается напряжение в имплантированном ионами гелия слое и подавляется блистеринг. Если же примеси служат ловушками для вакансий и занимают их, уменьшая тем самым число вакансий в гелиевых пузырьках, то давление в слое повышается и блистеринг увеличивается. Эксперименты [32] действительно показали уменьшение блистеринга стали ОХ16Н15МЗБ после ее легирования атомами марганца, никеля, углерода, бора. В тоже время легирование этой же стали ионами хрома увеличивает эрозию, обусловленную блистерингом. Это свидетельствует о том, что путем легирования можно добиться существенного уменьшения, а иногда и полного подавления блистеринга в сплавах [65].

В заключение отметим, что интенсивные исследования закономерностей блистеринга и отшелушивания, проведенные за последние годы, показали, что в термоядерных реакторах эрозия поверхности первой стенки за счет этих радиационных эффектов будет меньше, чем за счет распыления [66, 67], как вследствие того, что потоки атомов гелия существенно меньше, чем атомов дейтерия и трития, так и вследствие неизбежного подавления блистеринга и отшелушивания.

Институт атомной энергии
им. И. В. Курчатова

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Primak W.— J. Appl. Phys., 1963, v. 33, p. 3630.
2. Kaminsky M.— Bull. Am. Phys. Soc., 1963, v. 8, p. 428.
3. Primak W., Luthra J.— J. Appl. Phys., 1966, v. 37, p. 2287.
4. Das S. K., Kaminsky M.— In: Proc. of the Symposium on Radiation Effects on Solid Surface.— Chicago: Adv. Chem. Series, 1975.
5. Гусева М. И., Евмененко М. Е., Иванов С. М., Мартыненко Ю. В.— АЭ, 1981, т. 50, 143.
6. Das S. K., Kaminsky M.— J. Appl. Phys., 1973, v. 44, p. 2520.
7. Roth J., Behrisch R., Scherzer B. M. U.— J. Nucl. Mat., 1974, v. 56, p. 365.
8. Guseva M. I., Gusev V. M., Martynenko Yu. V., Das S. K., Kaminsky M.— Ibid., 1979, v. 85—86, p. 1111.
9. Thomas G. J., Wilson K. L.— ANL Trans., 1977, v. 27, p. 273.
10. Грибанов Ю. А., Зеленский В. Ф., Неклюдов И. М., Рыбалко В. Ф., Толстолуцкая Г. Д., Головня В. Я., Доля Г. П. Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», 1979, вып. 3 (11).
11. Шелякин Л. Б., Шульце Р. Д. Г., Юрасова В. Е.— Физ. плазмы, 1975, т. 1, с. 488.
12. Bauer W.— SAND-78-8634.— 1978, New Mexico, 1978.
13. Гусев В. М., Гусева М. И., Ионова Е. С., Мартыненко Ю. В., Мансурова А. Н.— Препринт ИАЭ-3133.— Москва, 1979.
14. Неклюдов И. М., Пивовар Л. И., Рыбалко В. Ф., Толстолуцкая Г. Д.— Вопросы атомной науки и техники. Сер. «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», 1979, вып. 1 (9), с. 59.
15. Das S. K., Kaminsky M.— J. Nucl. Mat., 1974, v. 53, p. 115.
16. Гуров А. Д., Калинин Б. А., Кириллин Н. М. и др.— АЭ, 1976, т. 40, с. 254.
17. Thomas G. J., Bemer W.— In: Proc. of the 2nd Conference on Surface Effects in Controlled Fusion Devices.— San Francisco, 1976.— P. 280.
18. Kaminsky M., Das S. K., Sinha M. K.— J. Appl. Phys., 1978, v. 49, p. 170.
19. См. 17.— P. 266.
20. Lindhard J., Scharff M., Schiott H. E.— Dan. Vid. Selsk. Mat. Fys. Medd., 1963, v. 33, No. 14.
21. Roth J.— In: Application of Ion Beam to Materials/ Ed. G. Carter, J. S. Colligon, W. A. Grant.— Lnd., 1980 — P. 280.
22. Das S. K., Kaminsky M., Fenske G.— J. Nucl. Mat., 1978, v. 77—78, p. 215.

23. Kaminsky M., Das S. K.— J. Appl. Phys., 1978, v. 49, p. 5673.
24. Risch M. R., Roth J., Scherzer B. M. U.— J. Nucl. Mat., 1979, v. 82, p. 220.
25. Guseva M. I., Ivanov S. M., Martynenko Yu. V.— Ibid., 1981, v. 96, p. 208.
26. Das S. K., Kaminsky M.— Ibid., 1978, v. 76, p. 256.
27. Kaminsky M.— In: Proc. of 7th Intern. Conference on Atomic Collision in Solids.— Moscow, 1977.
28. Behrisch R., Risch M., Roth J., Scherzer B. M. U.— In: 9th Symposium on Fusion Technology.— Garmisch Barkenkirchen, 1976.— P. 531.
29. Martel J. G., Jaques S. T., Veileux G.— J. Nucl. Mat., 1976, v. 53, p. 142.
30. Gusev V. H., Guseva M. I., Martynenko Yu. V., Mansurova A. N., Morosov V. N., Chelnokov O. I.— Rad. Effects, 1979, v. 40, p. 37.
31. Kalletta D.— См. ¹⁷— С. 347.
32. Агапова Н. П. и др.— В кн. Доклады Всесоюзной конференции по инженерным проблемам термоядерных реакторов ТЭЛ.— 1977. С. 264.
33. Kaminsky M., Das S. K.— Appl. Phys. Lett., 1972, v. 21, p. 443.
34. Das S. K., Kaminsky M.— Rad. Effects, 1973, v. 18, p. 245.
35. Kaminsky M.— IEEE Trans. Nucl. Sci., 1971, No. 18, p. 208.
36. Guseva M. I., Zyukova N. H., Ionova E. S. et al.— J. Nucl. Mat., 1978, v. 76—77, p. 224.
37. Гусев В. М., Гусева М. И., Красулин Ю. Л. и др.— Физ. и химия обработки материалов, 1976, т. 1, с. 15.
38. Sone K. et al.— J. Nucl. Mat., 1977, v. 71, p. 82.
39. Гусева М. И., Захаров А. П., Ионов Е. С. и др.— АЭ, 1981, т. 50, с. 25.
40. Risch M., Roth J., Scherzer B. M. U.— In: Proc. of the Intern. Symposium on Plasma Wall Interaction.— 1977.
41. Thomas G., Bauer W.— J. Nucl. Mat., 1974, v. 53, p. 127.
42. Das S. K., Kaminsky M.— Adv. Chem., 1976, v. 158, p. 120.
43. Hultgren P. J., Scott T. E.— J. Appl. Phys., 1976, v. 47, p. 4394.
44. Behrisch R., Kadomtsev B. B.— In: Proc. of IAEA Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion.— 1974.— P. 229.
45. Behrisch R. et al.— J. Nucl. Mat., 1976, v. 60, p. 321.
46. Kaminsky M., Das S. K. et al.— Proc. of Intern. Conference on Low Energy Ion Beams.— Salford, England, 1977.
47. Владимиров Б. Г., Гусева М. И., Ионов Е. С. и др.— АЭ, 1981, т. 50, с. 1981.
48. Evans J. H.— J. Nucl. Mat., 1973, v. 44, p. 25.
49. Evans J. H.— Ibid., 1977, v. 68, p. 129.
50. Ereñts S. K., McCracken G. M.— Rad. Effects, 1973, v. 18, p. 191.
51. Eer Nisse E. P., Picraux S. T.— J. Appl. Phys., 1979, v. 48, p. 9.
52. Мартыненко Ю. В.— Физ. плазмы, 1977, т. 3, с. 697.
53. Martynenko Yu. V.— Rad. Effects, 1979, v. 45, p. 93.
54. Bauer W., Thomas G. J.— In: Proc. of the Intern. Conference on Defects and Defects Clusters in b.c.c. Metals in Their Alloys.— Washington, 1973.— P. 255.
55. Das S. K., Kaminsky M., Fenske G.— J. Nucl. Mat., 1978, v. 76—77, p. 247.
56. Wilson W. D., Baskes H. J., Bisson C. L.— Phys. Rev. Ser. B, 1976, v. 13, p. 2470.
57. Brice D. K.— Ibid. Ser. A, 1972, v. 6, p. 1791.
58. Соколовский В. В. Теория пластичности — М. Л.: Гостехиздат, 1950.
59. Hildenbrandt D. et al.— Preprint 80-4.— ZIE, DDR, 1980.
60. Wilson K. L., Hagmark L. G., Langley R. A.— Preprint SAND 76-8688.
61. Kaminsky M.— Цит. в ²⁷ сб.
62. Das S. K., Kaminsky M.— J. Nucl. Mat., 1976, v. 63, p. 292.
63. Bauer W., Thomas G.— Ibid., p. 299.
64. Мартыненко Т. П.— ЖТФ, 1968, т. 37, с. 759.
65. Мартыненко Т. П., Шелякин Л. Б., Юрасова В. Е.— В кн. Труды III Всесоюзной конференции по взаимодействию атомных частиц с твердым телом.— Киев, 1974.— Т. 3, с. 99.
66. Калинин Б. А. и др.— АЭ, 1980, т. 49, с. 130.
67. Гусева М. И., Ионов Е. С., Мартыненко Ю. В.— АЭ, 1980, т. 48, с. 162.

67. Гусев В. М., Гусева М. И.— В кн. Материалы V Всесоюзной конференции по взаимодействию атомных частиц с твердым телом.— Минск, 1978.
68. Gusev V. M., Guseva M. I., Zyкова N. H., Krasulin Yu. L. et al.— In: Proc. of Intern. Symposium Plasma Wall Interaction.— Julich, F.R.G., 1976.— P. 413.
69. Владимиров Б. Г., Гусева М. И., Ионова Е. С., Мансурова А. Н., Мартыненко Ю. В., Рязанов А. И.— АЭ, 1981, т. 50, с. 25.
70. Roth J., Behrisch R., Scherzer B. M. U.— J. Nucl. Mat., 1974, v. 53, p. 147.
71. Guseva M. I., Gusev V. M., Krasulin Yu. L. et al.— Ibid., 1976, v. 63, p. 245.
72. Das S. K., Kaminsky M.— J. Appl. Phys., 1973, v. 44, p. 25.