

УДК 539.12.04:621.039.616

Изучение блистеринга в ниобии при внедрении ионов гелия энергией, ожидаемой в термоядерном реакторе

ДАС С., КАМИНСКИЙ М. (США), ГУСЕВ В. М., ГУСЕВА М. И., КРАСУЛИН Ю. Л., МАРТЫНЕНКО Ю. В. (СССР)

Согласно современным представлениям, первая стенка термоядерного реактора (ТЯР) будет подвергаться бомбардировке ионами гелия с широким спектром энергий, что приведет к эрозии стенки за счет эффектов распыления и блистеринга. До последнего времени радиационный блистеринг изучали при облучении металлов моноэнергетическими ионами гелия. Эрозия вследствие блистеринга существенно зависит от распределения по глубине внедренных ионов и дефектов. Ранее [1] пучок с широким спектром энергии моделировали путем последовательного облучения мишени моноэнергетическими пучками ионов гелия энергией от 3 до 500 кэВ. В первом приближении осуществлялось однородное распределение атомов гелия по глубине мишени. В качестве мишени был выбран ниобий, проникаемость гелия в котором мала, и, следовательно, распределение внедренных ионов гелия не могло заметно меняться за время между последовательными облучениями. Было показано, что при одной и той же дозе облучения ниобия моно- и полиэнергетическими ионами He^+ наблюдается существенное различие в закономерностях блистерообразования.

В настоящей работе моделируется воздействие на ниобиевую мишень ионов He^+ со спектром энергии, которую можно ожидать в ТЯР, и ионной температурой 20 кэВ внутри плазменного шнура и 1 кэВ в наружном слое.

В ТЯР спектр энергии частиц дейтерия и трития, попадающих на первую стенку, можно аппроксимировать [2] выражением

$$f = \frac{2\sqrt{E}}{\sqrt{\pi}(T_1^{3/2} + \alpha T_2^{3/2})} \left[\exp\left(-\frac{E}{T_1}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right) \right], \quad (1)$$

где T_1 — средняя температура более холодного поверхностного слоя плазмы; T_2 — средняя температура внутренних горячих слоев плазмы; α — доля горячих частиц, выпадающих на стенку. Согласно [2], $\alpha \approx 10^{-3}$.

Энергия α -частиц, рождающихся при D — T реакции, составляет 3,5 мэВ. Однако можно полагать [3], что часть этих частиц «термализуется» и будет иметь спектр (1), другая полу-

чит энергию, близкую к E_α , а оставшаяся часть α -частиц равномерно распределится по энергиям. Поэтому в качестве грубого приближения можно принять (рис. 1)

$$f_\alpha = A\delta(E - E_\alpha) + B\sqrt{E} \left[\exp\left(-\frac{E}{T_1}\right) + \alpha \exp\left(-\frac{E}{T_2}\right) \right] + C. \quad (2)$$

Относительные величины констант A , B , C можно выбрать из следующих условий. На основе результатов работы [3] можно считать, что число α -частиц энергией E_α составит $\sim 10\%$, а если предположить, что доля «термализованных» частиц будет такая же, как в работе [3], то

$$C \approx \frac{10^{-1}B}{E_\alpha} (T_1^{3/2} + \alpha T_2^{3/2}). \quad (3)$$

В реальном ТЯР спектр ионов He^+ может быть несколько другой. По-видимому, следует учесть также распределение ионов по углам падения. Но пока нет сведений об этих распределениях, целесообразно провести моделирование воздействия спектра (2) на ниобиевую мишень (см. рис. 1).

Эксперимент. Интервалы энергии выбирали так, чтобы распределения внедренных ионов от двух последовательных облучений достаточно хорошо перекрывались, а минимальная энергия $E_1 < T_1$. В соответствии с этими требованиями ниобиевые мишени последовательно облучали ионами He^+ энергией 0,5, 1, 2, 3,5, 5, 8, 13, 20, 45, 65, 90, 150, 200, 250, 300, 500, 1000,

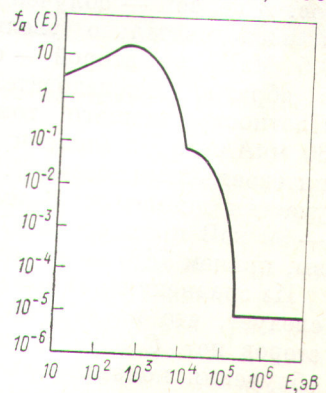
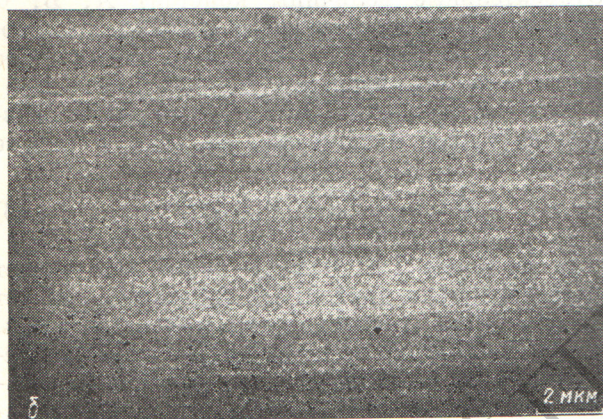
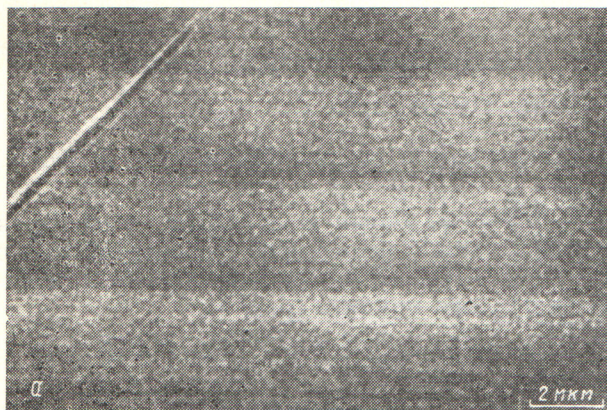


Рис. 1. Энергетический спектр α -частиц

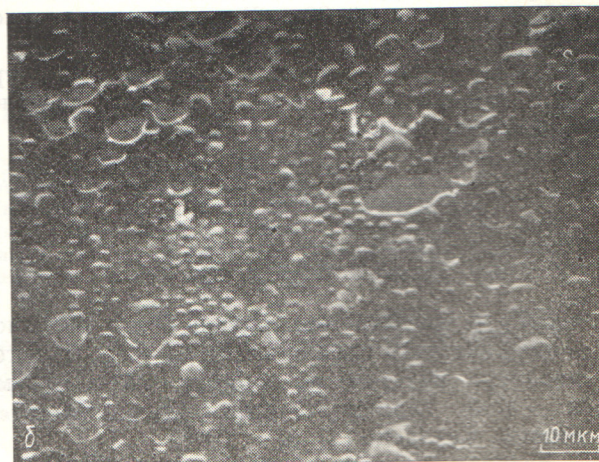
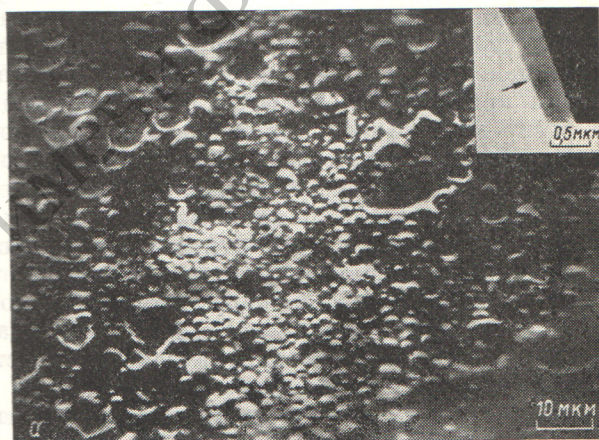


Р и с. 2. Микроструктура поверхности ниобиевой мишени до (а) и после (б) облучения ионами He^+ при интегральной дозе $7,7 \cdot 10^{17}$ ион/см²

1500, 2500, 3000 и 3500 кэВ. Облучение энергией $E_k \leq 90$ кэВ проводили в ИАЭ им. И. В. Курчатова, энергией $E_k \geq 150$ кэВ — в Аргоннской национальной лаборатории (США). Были проведены две серии экспериментов. В первой — облучение начинали с 0,5 кэВ и последовательно увеличивали энергию до 3,5 МэВ, во второй — облучение проводили в обратном последовательности с 3,5 МэВ. Плотность ионного тока составляла 20 — 30 мкА/см². На мишени получали облученные интегральными дозами $7,7 \cdot 10^{17}$ и $7 \cdot 10^{18}$ ион/см² участки диаметром 3 мм. На энергию 0,5 — 90 кэВ приходится 87,7% интегральной дозы, причем 74% — на интервал 0,5 — 3,5 кэВ.

Из сравнения микроструктуры (рис. 2, а и б) следует, что на облученной поверхности блистеров нет. Следует также отметить, что дозы облучения ионами гелия энергией 1 и 2 кэВ превышали критические.

Изменение топографии поверхности для интегральной дозы $7 \cdot 10^{18}$ ион/см² иллюстрирует рис. 3. На рис. 3, а показана поврежденная блистерингом поверхность ниобия после облучения ионами He^+ энергией от 0,5 до 90 кэВ при суммарной дозе $6,25 \cdot 10^{18}$ ион/см². Видны блистеры различного размера, причем у некоторых из них отшелушились оболочки. Распределение блистеров по размерам дано на рис. 4. В согласии с энергетическим спектром (см. рис. 1), большинство блистеров порождены ионами He^+ энергией 0,5 — 3,5 кэВ и имеют диаметр < 1 мкм. Максимальный диаметр блистеров (~ 5 мкм) соответствует ионам He^+ энергией 90 кэВ [4]. Хотя таких блистеров мало, но у большинства из них оболочки отшелушились. Толщина оболочки этих блистеров состав-



Р и с. 3. Микроструктура поверхности ниобиевой мишени после облучения ионами He^+ при интегральных дозах $6,25 \times 10^{18}$ в интервале 0,5—90 кэВ (а) и $7 \cdot 10^{18}$ ион/см² в интервале 0,5—3500 кэВ (б)

ляет 0,36 мкм, что хорошо видно при большем увеличении. Рассчитанная по микрофотографии (см. рис. 3, а) скорость эрозии составляет $2,6 \cdot 10^{-2}$ атом/ион. Для сравнения укажем, что, по данным ранних работ Каминского и Даса [5], скорость эрозии отожженного ниобия под воздействием моноэнергетических ионов He^+ энергией 100 кэВ и дозе облучения $3,12 \cdot 10^{18}$ ион/см² составляет 1 атом/ион, т. е. приблизительно в 40 раз больше, чем для ионов He^+ энергией от 0,5 до 90 кэВ при дозе в 2 раза большей.

На рис. 3, б представлена микроструктура поверхности той же мишени после дополнительного облучения ионами He^+ энергией 150 — 3500 кэВ при дозе $7,7 \cdot 10^{17}$ ион/см². Как видно из сравнения с рис. 3, а, имплантация ионов He^+ высоких энергий не оказывает сколько-либо заметного влияния на эффект блистеринга от внедрения ионов меньших энергий.

Если облучение начинали с максимальной энергии 3,5 МэВ и энергию облучения последовательно уменьшали, то после облучения в области энергии 3,5 МэВ — 150 кэВ при дозе $7,7 \cdot 10^{17}$ ион/см² блистеры на поверхности ниобия не были обнаружены. Рис. 5 иллюстрирует картину эрозии поверхности после облучения интегральной дозой $7 \cdot 10^{18}$ ион/см² в интервале от 3,5 МэВ до 0,5 кэВ. Большинство блистеров имеет неповрежденную оболочку. Размеры блистеров меньше, чем при облучении в последовательности от 0,5 кэВ до 3,5 МэВ той же дозой (см. рис. 4). Максимальный диаметр блистеров не превышает 0,9 мкм. Согласно работе [6], такого размера блистеры образуются ионами энергией 20 кэВ. После отшелушения оболочек этих наиболее крупных блистеров на дне кратеров можно видеть мелкие блистеры диаметром 0,05 — 0,2 мкм, порожденные ионами He^+ энергией 1—5 кэВ (см. стрелку на рис. 5). Как следует из рис. 4, этому диапазону энергии соответствуют максимальные дозы облучения при исследуемом энергетическом спектре. Площадь, занятая такими кратерами, не превышает 2%. Учитывая также, что толщина оболочки блистеров, образуемых ионами He^+ энергией 20 кэВ, приблизительно в три раза меньше [7], чем при внедрении ионов энергией 90 кэВ, можно сделать вывод, что скорость эрозии при последовательном уменьшении энергии бомбардирующих ионов He^+ от 3,5 МэВ до 0,5 кэВ приблизительно на порядок меньше, чем при облучении в обратной последовательности.

Обсуждение результатов. Таким образом, экспериментально показано, что при последовательном облучении мишени ионами He^+ разной

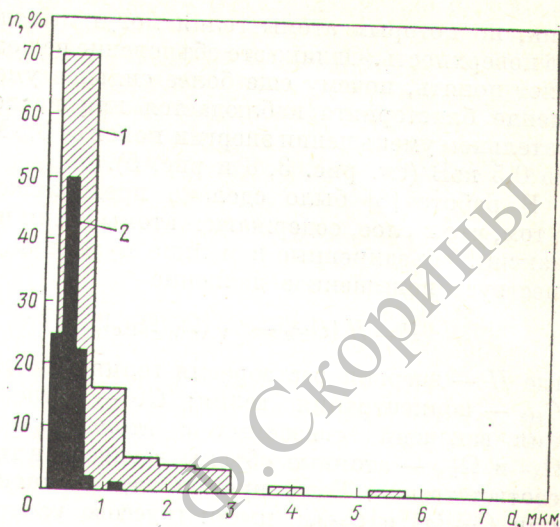


Рис. 4. Распределение блистеров по диаметрам при облучении дозой $7 \cdot 10^{18}$ ион/см² в интервале от 0,5 до 3500 кэВ (1) и в обратной последовательности (2)

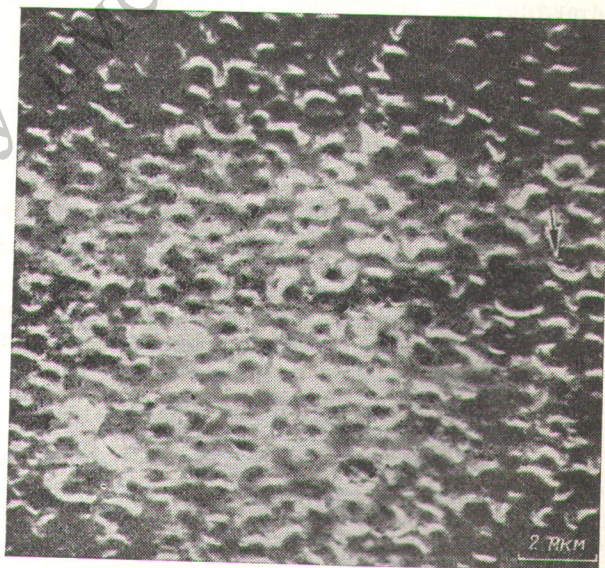


Рис. 5. Микроструктура поверхности ниобиевой мишени после облучения ионами He^+ в последовательности от 3,5 МэВ до 0,5 кэВ

энергии блистеринг значительно меньше, чем при моноэнергетическом облучении [1]. Подобные результаты были получены также в работах с однородным распределением имплантированных атомов гелия по глубине мишени [6, 7]. В работе [6] подавление блистеринга при предварительном облучении ионами меньшей энергии объяснялось тем, что такая «предбомбардировка» создает вблизи поверхности поврежде-

ния, по которым атомы гелия могут выходить на поверхность. Однако это объяснение не позволяет понять, почему еще более сильное уменьшение блистеринга наблюдается при последовательном уменьшении энергии ионов от 3,5 МэВ до 0,5 кэВ (см. рис. 3, б и рис. 5).

В работе [8] было сделано предположение о том, что в слое, содержащем атомы гелия и вакансии, объединенные в мелкие пузырьки, существует повышенное давление

$$P = H [C_{\text{He}} - C_V (\Omega_V / \Omega_{\text{He}})], \quad (4)$$

где H — энергия растворения гелия в металле; C_{He} — концентрация гелия; C_V — концентрация вакансий, связанных с атомами гелия; Ω_V и Ω_{He} — атомные объемы вакансии и гелия соответственно. Если примем, что концентрации $C_{\text{He}}(x)$ и $C_V(x)$ имеют гауссово распределение по глубине [отклонение от гауссова распределения более существенно слева максимумов $C_V(x)$ и $C_{\text{He}}(x)$, а для нас интерес представляет вид распределения справа от максимумов], то

$$C_{\text{He}}(x) = \frac{D}{\Delta R \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{R})^2}{\Delta R^2} \right];$$

$$C_V(x) = \frac{D_V}{\Delta R_d \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(x - \bar{R}_d)^2}{\Delta R_d^2} \right]. \quad (5)$$

Здесь D — доза облучения; V — число вакансий на один атом гелия; \bar{R} и \bar{R}_d — проективный пробег ионов и дефектов; ΔR и ΔR_d — разброс проективных пробегов ионов и дефектов. Максимум давления (4) находится на глубине $x_{\text{макс}}$:

$$x_{\text{макс}} = \frac{\bar{R}_d \Delta R^2 - \bar{R} \Delta R_d^2}{\Delta R^2 - \Delta R_d^2} +$$

$$+ \sqrt{\frac{\left(\frac{\bar{R}_d \Delta R^2 - \bar{R} \Delta R_d^2}{\Delta R^2 - \Delta R_d^2} \right)^2 - \frac{L \Delta R^2 \Delta R_d^2 + \bar{R}^2 \Delta R_d^2 - \bar{R}_d^2 \Delta R^2}{\Delta R^2 - \Delta R_d^2}}{\Delta R^2 - \Delta R_d^2}}, \quad (6)$$

где $L = \ln \left(\frac{\Omega_V}{\Omega_{\text{He}}} \frac{x - \bar{R}_d}{x - \bar{R}} \frac{\Delta R_d^2}{\Delta R^2} \right)$. Обычно $\bar{R} > \bar{R}_d$ и $\Delta R^2 > \Delta R_d^2$. Это приводит к тому, что максимум давления лежит на глубине, превышающей R . Например, если $\Delta R^2 = \Delta R_d^2$ и $\bar{R} > \bar{R}_d$, то

$$x_{\text{макс}} = \frac{\bar{R} + \bar{R}_d}{2} + \frac{\Delta R^2}{\bar{R} - \bar{R}_d} L. \quad (7)$$

Если $\bar{R} = \bar{R}_d$ и $\Delta R^2 > \Delta R_d^2$, то

$$x_{\text{макс}} = \bar{R} + \sqrt{\frac{\Delta R^2 \Delta R_d^2}{\Delta R^2 - \Delta R_d^2}} \sqrt{L}. \quad (8)$$

Естественно предположить, что объединение мелких гелиевых пузырьков в крупные происходит в первую очередь на глубине $x_{\text{макс}}$. Тогда толщина крышек блистеров d будет равна $x_{\text{макс}}$. Формулы (6) — (8) качественно объясняют наблюдаемую экспериментально зависимость d от энергии ионов E . При малых значениях $E \sqrt{\Delta R^2} \gg \bar{R}$ и $x_{\text{макс}}$ существенно больше \bar{R} , а при больших энергиях, когда $\sqrt{\Delta R^2} \ll \bar{R}$, $d \rightarrow \bar{R}$. Для количественного сравнения необходимо знать более точно распределения $C_{\text{He}}(x)$ и $C_V(x)$. Однако качественно очевидно, что при $x < x_{\text{макс}}$ образуются пузырьки с относительно малым содержанием гелия (и малым давлением) и большим числом вакансий, которые закрепляются в металле атомами гелия. Такие пузырьки при достаточно большой дозе могут соприкоснуться и образовывать каналы [6], по которым гелий будет выходить на поверхность. Вследствие этого [6] при предварительном облучении ионами He^+ меньшей энергии (последовательность облучения от 0,5 кэВ до 3,5 МэВ) наблюдается уменьшение блистеринга по сравнению с облучением моноэнергетическими ионами. В случае первоначальной имплантации ионов большей энергии (последовательность облучения от 3,5 МэВ до 0,5 кэВ) механизм подавления блистеринга другой. При последующем облучении ионами гелия меньшей энергии атомы внедряются в область с большим числом вакансий, которые снижают давление в пузырьках и препятствуют образованию блистеров.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что при энергетическом спектре ионов He^+ , близком к ожидаемому в ТЯР, и интегральной дозе $\leq 7 \cdot 10^{18}$ ион/см² на поверхности образуются блистеры диаметром, характерным для ионов низких энергий, и эффективность блистерообразования определяются низкоэнергетическими ионами. При облучении полиэнергетическими ионами эрозия поверхности существенно зависит от последовательности облучения. В целом блистеринг при таком спектре ионов He^+ значительно слабее, чем при моноэнергетическом облучении.

Поступила в Редакцию 5.XII.77

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Guseva M. e.a. «J. Nucl. Mater.», 1976, v. 63, p. 245.
2. Artsimovich L. A. «Nucl. Fusion», 1972, v. 12, p. 215.
3. Berry L. e.a. In: Proc. Intern. Atomic Energy Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research. Tokyo, 11—15 Nov. 1974. CN-38.
4. Das S., Kaminsky M. Radiation Effects on Solid Surfaces. Washington, Amer. Chem. Soc., 1976.
5. Das S., Kaminsky M. «J. Appl. Phys.», 1973, v. 44, p. 25.
6. Wilson K., Haggmark L., Langley R. Sand 76-8688. Sandia Lab., 1976.
7. Roth J., Behrisch R., Scherzer B. «J. Nucl. Mater.», 1975, v. 57, p. 365.
8. Мартыненко Ю. В. «Физика плазмы», 1977, т. 3, с. 6976.

УДК 539.12.04:621.039.616

Гелиевый блистеринг при больших дозах облучения

АФРИКАНОВ И. Н., ГУСЕВ В. М., ГУСЕВА М. И., МАНСУРОВА А. Н.,
МАРТЫНЕНКО Ю. В., МОРОЗОВ В. Н., ЧЕЛНОВ О. И.

В последнее время большое внимание уделяется исследованию объемных и поверхностных радиационных эффектов в нержавеющих сталях и хромоникелевых сплавах в связи с возможностью их применения в качестве конструкционного материала для изготовления стенки вакуумной камеры термоядерного реактора [1—4]. Одним из основных процессов, ответственных за эрозию поверхности сталей, является радиационный блистеринг. Известно, что при фиксированной энергии бомбардирующих ионов He^+ блистеринг существенно зависит от дозы облучения [5—8] и температуры мишени [2, 6]. В работах [6—8] исследовалась зависимость скорости эрозии стали 304 при температуре 450 °С от дозы облучения ионами He^+ энергией 500 и 100 кэВ. Было установлено усиление эрозии поверхности стали с ростом дозы облучения, при дозе $1,2 \cdot 10^{20}$ ион/см² ($E = 100$ кэВ) происходит отшелушение 15 слоев. Для ионов H^+ и He^+ энергией 20 кэВ [3, 4] (когда на поверхности стали или сплава образуется одно поколение блистеров) был обнаружен (как и ранее на ниобии [9]) эффект подавления блистеринга при дозах, необходимых для распыления оболочки блистеров бомбардирующими ионами.

В настоящей работе исследуется развитие блистеринга в нержавеющей стали 0X16N15M3B и в хромоникелевом сплаве 01X18N40M5 при температуре не более 100 °С и облучении ионами He^+ энергией 40 кэВ.

Эксперимент. Электрохимически полированные образцы аустенитной нержавеющей стали 0X16N15M3B и хромоникелевого сплава 01X18N40M5 одновременно облучали в ускорителе ИЛУ [10] ионами He^+ энергией 40 кэВ. Плотность тока j на мишень составляла 30 мкА/см². Температура образцов в процессе облучения не превышала 100 °С. Для изучения

влияния интенсивности ионного пучка на блистеринг было проведено несколько экспериментов при $j = 100$ мкА/см². Дозы облучения варьировали от $3 \cdot 10^{18}$ до 10^{20} ион/см². Были проведены две серии экспериментов. В первой — 7 мишеней каждого материала размером 1 см² облучали одновременно сканирующим по горизонтали ионным пучком He^+ и по мере набора необходимой дозы ($3 \cdot 10^{18}$; $6 \cdot 10^{18}$; $1,2 \cdot 10^{19}$; $3 \cdot 10^{19}$; $6 \cdot 10^{19}$ и 10^{20} ион/см²) образцы снимали с кассеты. Во второй серии опытов те же самые дозы облучения набирали последовательно на одном и том же образце с перерывами для электронно-микроскопических исследований поверхности облученных мишеней в сканирующем электронном микроскопе «Stereoskan-180».

Результаты эксперимента. На рис. 1 показано, как влияют дозы облучения ионами He^+ на структуру поверхности хромоникелевого сплава. При дозе $3 \cdot 10^{18}$ ион/см² (см. рис. 1, а) на поверхности сплава образуются преимущественно блистеры одного поколения максимальным диаметром 5 мкм. Оболочки большинства блистеров треснули по контуру, шелушение практически отсутствует. Увеличение дозы в 2 раза приводит к резкому усилению эрозии поверхности (см. рис. 1, б). Верхний слой почти полностью отшелушивается, и на обнажившейся поверхности видно большое количество кратеров, образующихся в результате отрыва куполов от блистеров второго и третьего поколений. Характерно уменьшение диаметра кратеров с глубиной. Плотность кратеров составляет $1,25 \cdot 10^7$ ион/см². При увеличении дозы на порядок (см. рис. 1, в) участки мишени между кратерами блистеров распыляются и поверхность приобретает пористую губкообразную структуру. Характерный размер пор на поверхности составляет 1000—2000 Å, а их плотность — $1,6 \cdot 10^9$ ион/см². Дальнейшая бомбардировка ми-