

ПОВЕРХНОСТИ И СТРУКТУРА ЦИРКОНИЯ ПРИ ИМПЛАНТАЦИИ ИОНОВ НЕОНА И АРГОНА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ

Гольцев М.В.¹⁾, Гольцев В.П.²⁾, Гусакова С.В.²⁾, Хофман Анж.³⁾

¹⁾Белорусский государственный медицинский университет, Беларусь, 220116, г. Минск, пр. Дзержинского 83, тел. + 375172787672, e-mail: mgoltsev@mail.ru

²⁾Белорусский государственный университет, Беларусь, 220050, г. Минск, пр. Ф. Скорины, 4, тел. + 375172208893

³⁾Объединенный институт ядерных исследований, Россия 141980, г. Дубна, Московская область, тел. + 7962164741

Введение

Имплантация ионов и избирательная эрозия при распылении приводят к серьезным изменениям поверхностной морфологии, структуры и как следствие, к изменению физико-механических свойств. Причем принято считать, что при имплантации тяжелых ионов топография поверхности обусловлена эрозией, а в случае легких ионов – их накоплением, что ведет к блистиренгу, флекингу и шелушению поверхности [1]. В самом общем виде, распыление (эрозию) следует рассматривать как результат каскадных процессов упругих столкновений.

В настоящее время использование пучков тяжелых ионов считается одним из перспективным направлений в физике твердого тела, области радиационной модификации структуры и свойств поверхности, а также важным разделом фундаментальных исследований в части физики конденсированного состояний и разработки методов получения управляемых свойств. Установлено, что ОЦК – металлы подвержены меньшему повреждению, например порообразованию, чем ГЦК – металлы, при этом металлы с ГПУ – структурой исследованы в меньшей степени, в то время как они, например, цирконий представляют значительный интерес в части их использования в образцах новой техники. Заметим также, что важное значение имеют радиационные эффекты изменения свойств за счет вклада структурных повреждений и изменения морфологии и за счет изменения состава в результате накопления внедренных (имплантированных) ионов, в связи с чем разделение вклада этих эффектов приобретает научный интерес [2].

Результаты и их обсуждение

Радиационные эффекты исследовались на образцах циркония (чистотой $\leq 99,99\%$), облученных ионами ^{22}Ne и ^{40}Ar с энергиями 230 и 460 МэВ с использованием ускорительного комплекса ОИЯИ. Расчет параметров облучения: сечения образования дефектов σ_d , проективного пробега ионов R_p , концентрации дефектов и др. проводился с использованием модернизированной компьютерной программы TRIM (STRIM). Для разделения эффектов изменения структуры и свойств от появления нарушения и внедрения ионов использовали известный метод формирования пакетов из образцов в виде фольги Zr толщиной порядка $22 \pm 0,25$ мкм суммарной толщиной 110 мкм и 90 мкм, что сравнимо с величиной проективного пробега ^{22}Ne ($R_p \leq 108$ мкм) и ^{40}Ar ($R_p \leq 85$ мкм) (рис. 1). В этом случае первые образцы Zr подвергались облучению на «прострел», а последний – на «накопление». Из рис. 1 следует, что сечение образования дефектов в образцах практически не зависят от величины пробега ионов Ne и Ar. Облучение проводилось флюенсами ионов ^{22}Ne , $\Phi_t = 1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и ионов ^{40}Ar , $\Phi_t = 3,6 \cdot 10^{14} - 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ при средней плотности пучка ионов $\phi \approx 1,2 \cdot 10^{11} \text{ ион/см}^2\text{с}$ при температуре $\sim 325\text{K}$.

Морфологию поверхности образцов изучали с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO-1455VP, элементный состав – с помощью микрорентгеноспектрального анализатора (МРСА) RÖNTEC. Радиационное упрочнение оценивали по изменению предела текучести $\sigma_{0,2}$ при механических испытаниях на разрыв.

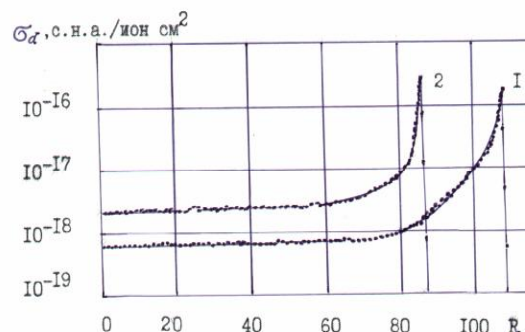


Рис.1. Профиль радиационного повреждения пакета образцов Zr при облучении ионами ^{22}Ne – (1) и ^{40}Ar – (2)

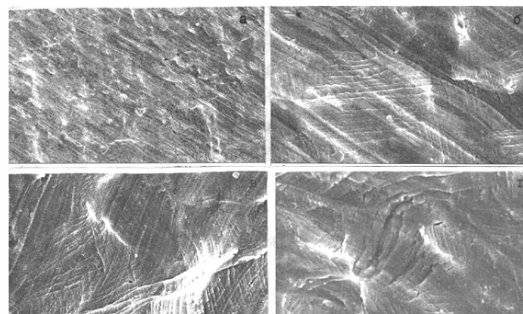


Рис. 2. Топология поверхности образцов Zr, облученных ионами ^{22}Ne на «прострел» - (а, б, в), зоны и на «накопление» - (г)

При воздействии пучков тяжелых ионов на материал всегда протекают процессы изменения рельефа в результате распыления [1]. Изменение морфологии при этом проявляется в виде впадин и выступов, ямок травления, гребней и фасеток (рис.2 и 3). Причем, показано, что их возникновение связано с различными коэффициентами распыления зерен различной ориентировки, а зарождение пор и впадин определяется наличием дефектов существующих в материале, либо образовавшихся при облучении.

На рис. 2 приведены типичные структуры, образовавшиеся в образцах циркония при облучении ионами ^{22}Ne с энергией 230МэВ. Видно, что при облучении на «прострел» (рис.2-а) образуется волнистая структура в виде гребней, в дальнейшем – ступенчатая структура (рис. 2 – б, в). При накоплении внедренных ионов (рис.2-г) на отдельных участках появляются поперечные трещины, что можно связать с объединением газозаполненных пор и развитием при деформации разрывов. На представленном рис. 3 структура облученного Zr ионами ^{40}Ar с энергией 460МэВ качественно подобна предыдущей картине, однако она более заглублена. Волнистость поверхности, характеризующая структурные нарушения приводит к вязко-хрупкому излому (рис.3-б). В дальнейшем при увеличении структурных повреждений (рис.3-в) и, в особенности, при облучении на «накопление» (рис.3-г) наблюдается фасеточная структура с отдельными, но периодическими разрушениями поверхности. Известно, что в ГПУ-металлах при облучении ионами инертных газов образуются полиэдрические поры, ограниченные плоскостями (0001), (01 $\bar{1}$ 0) и (01 $\bar{1}$ 1) [2]. При этом, в них образуется слоистая структура, в которой чередуются плоскости содержащие поры и без них. При повышенных напряжениях между ними образуются надрывы, что приводит к схрупчеванию облученного циркония. Действительно пластичность при испытаниях подобных образцов составляла не более 3%.

Для оценки вклада радиационных повреждений и внедренных ионов исследовалось упрочнение циркония по результатам изменения предела текучести $\sigma_{0,2}$ (рис.4). Дозы повреждения D в единицах с.н.а., оцененные с использованием программы TRIM согласно выражению $D = \sigma_d \Phi_t$ дают следующие значения: для флюенса ^{22}Ne $1 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ D

находится в пределах $8,7 \cdot 10^{-4} - 1,8 \cdot 10^{-3}$ с.н.а., для флюенса ^{40}Ar $3,6 \cdot 10^{14} - 1,6 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ D имеет значения в пределах $5,8 \cdot 10^{-3} - 2,5 \cdot 10^{-2}$ с.н.а.

Из рис. 4 следует, что изменение предела текучести образцов Zr, облученных на «прострел» составляет от 14 до 30%, а облученных на «накопление» - от 40 до 50%. При этом большие значения соответствуют более тяжелым ионам ^{40}Ar и большей энергии их (460МэВ). Таким образом, степень упрочнения достаточно точно указывает на разделение вклада эффекта повреждения структуры и внедрения ионов.

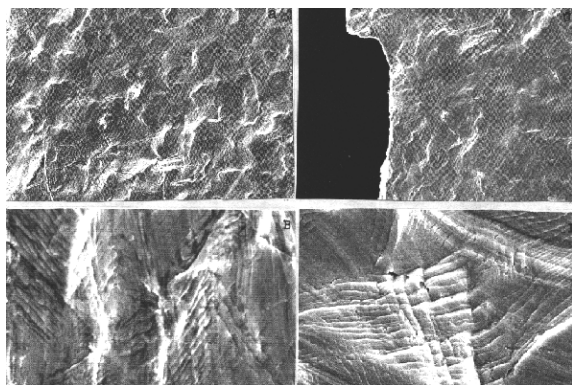


Рис. 3. Топография поверхности образцов Zr, облученных ионами ^{40}Ar на «прострел»- (а), зоны разрушения – (б, в) и на «накопление» - (г)

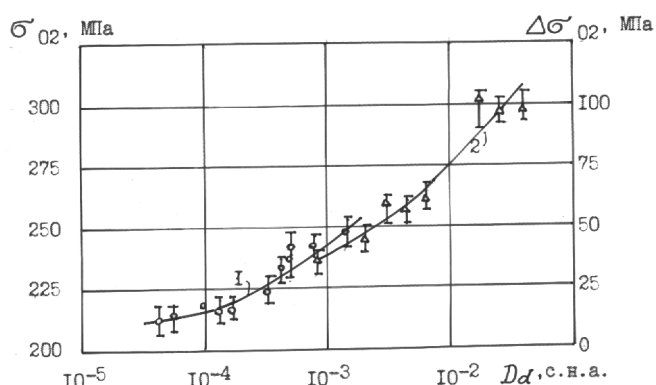


Рис.4. Зависимость предела текучести $\sigma_{0,2}$ и $\Delta\sigma_{0,2}$ циркония при облучении ионами ^{22}Ne - (1) и ^{40}Ar - (2)

При относительно низких дозах облучения, порядка $10^{-4} - 10^{-2}$ с.н.а., эффект упрочнения удовлетворительно описывается выражением в рамках механизма барьерного упрочнения [3]: $\Delta\sigma_{0,2} = A (1 - \exp(-BD))^{1/2}$, где $D = \sigma_d \cdot \Phi_t$, $A = 25,97 \text{ МПа}$ и 70 МПа для ионов Ne и Ar; $B = 6, 28 \cdot 10^3 \text{ с.н.а.}^{-1}$ и $0,33 \cdot 10^3 \text{ с.н.а.}^{-1}$ для ионов Ne и Ar.

Обнаруженная разница в уровнях упрочнения образцов циркония облученных ионами на «прострел» и на «накопление» внедренных ионов, может быть связана с нарушениями и изменением состава. Как видно, наибольший эффект упрочнения следует приписать накоплению в объеме ионов и образованию пористости.

Литература

- [1] Распыление твердых тел ионной бомбардировкой. Вып. II / под ред. Р.Бериша. – М.: Мир, (1986).
- [2] В.Ф. Зеленский, И.М. Неклюдов, Т.П. Черняева. Радиационные дефекты и набухание металлов. – Киев.: Наукова думка. (1988).
- [3] М.В. Гольцев, А. Хофман, Г.К. Ильич / Взаимодействие излучения с твердым телом. – Мн.: БГУ, 120. (2003).