

Михасёв Р. Н., Белов М. М., Иваницкий К. В.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НИЗКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ КРИПТОНА НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРАХ СИСТЕМЫ V-Nb-Ta-Ti

Белорусский государственный университет, Минск, Беларусь

Исследовано влияние облучения ионами Krypton на структурно-фазовое состояние многокомпонентного твердого раствора на основе системы V-Nb-Ta-Ti. Показано, что сплав VNbTaTi является высокоэнтропийным и обнаруживает большее значение деформации кристаллической решетки после облучения по сравнению с чистым ванадием. Предложен возможный механизм радиационной стойкости высокоэнтропийных сплавов.

Развитие атомной энергетики по всему миру повышает требования к материалам, используемым в конструкциях, а также к технологиям их производства и контролю за работоспособностью. Под действием такие материалы могут подвергаться структурно-фазовым превращениям, которые негативно влияют на их механические свойства. Для решения этой проблемы перспективным является использование высокоэнтропийных сплавов (ВЭС), которые состоят из однофазного твердого раствора и большого числа основных элементов в эквимольных или почти эквимольных отношениях. Считается, что максимизация конфигурационной энтропии ВЭС способствует формированию однофазного разупорядоченного твердого раствора, что уменьшает риск выпадения сложных интерметаллидных или вторых фаз. Это позволяет получить сплав с простой микроструктурой, которая имеет улучшенные свойства по сравнению с традиционными сплавами. Многочисленные исследования показали, что ВЭС обладают высоким пределом упругости, усталостной прочностью, термической и коррозионной стойкостью, сопротивлением ползучести, радиационной стойкостью, которые связываются с четырьмя основными эффектами: высокой энтропией, большой деформацией решетки, многоэлементностью состава и замедленной диффузией. [1,2]

Многокомпонентные твердые растворы на основе системы V-Ti-Nb-Ta были синтезированы с использованием металлов высокой чистоты (>99,9%) методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией. Далее проводился отжиг на протяжении 24 ч и 72 ч при температуре 1150 °C с промежуточной холодной прокаткой до 85 % сокращения толщины. Образцы облучались при комнатной температуре ионами Krypton с энергией 280 кэВ и флюенсом 1×10^{16} см⁻².

Фазовый состав образца изучался методом рентгеноструктурного анализа (РСА) на дифрактометре Rigaku Ultima IV с использованием медного излучения ($\lambda = 0,15418$ нм). Для исследования воздействия имплантированного гелия на приповерхностный слой, съемка образцов производилась при малом фиксированном угле падения рентгеновских лучей (1°).

Расчет энергетических потерь был проведен в программе SRIM 2013. На рисунке 1 представлены профили распределения имплантированных ионов Krypton и результаты моделирования радиационного повреждения (измеряемого в смещении на атом, сна). Максимальный пробег ионов криптона составляет 175–200 нм, при этом слой с максимальным повреждением находится на глубине 50–75 нм для ванадия, а для сплава VNbTaTi – 30–50 нм. Наибольшее значение повреждающей дозы составляет 55–105 сна, в зависимости от образцов, так ванадий имеет минимальную повреждающую дозу, а сплав VNbTa максимальную. Концентрация имплантированных ионов Krypton не превышает 1,7–2%.

На рисунке 2 представлены дифрактограммы исходных и облученных образцов, полученные методом РСА. Из представленных дифрактограмм можно сделать вывод, что сплавы имеют высокую степень кристалличности. Для всех многокомпонентных твердых растворов на основе системы V-Nb-Ta-Ti формируется однофазный твердый раствор с ОЦК-решеткой.

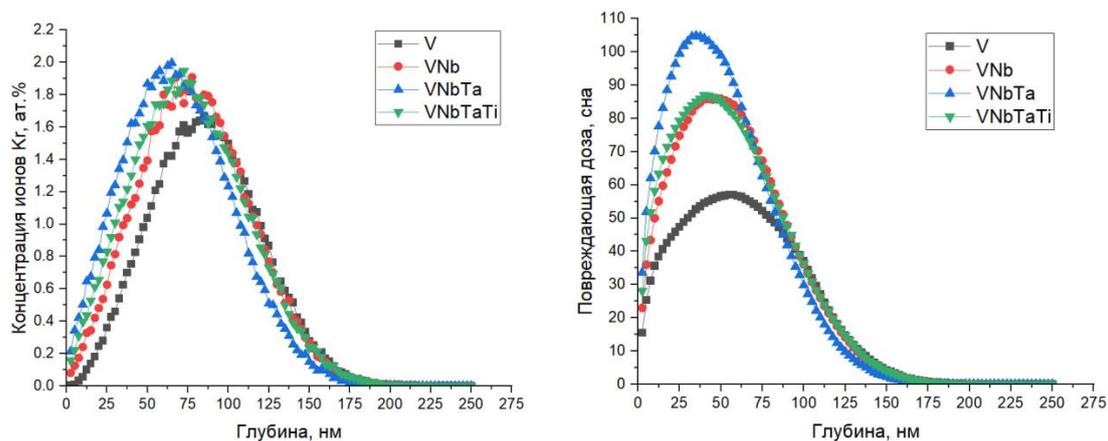


Рисунок 1 – Профили распределения ионов Kr и повреждающей дозы в образцах V, VNb, VNbTa и VNbTaTi по глубине

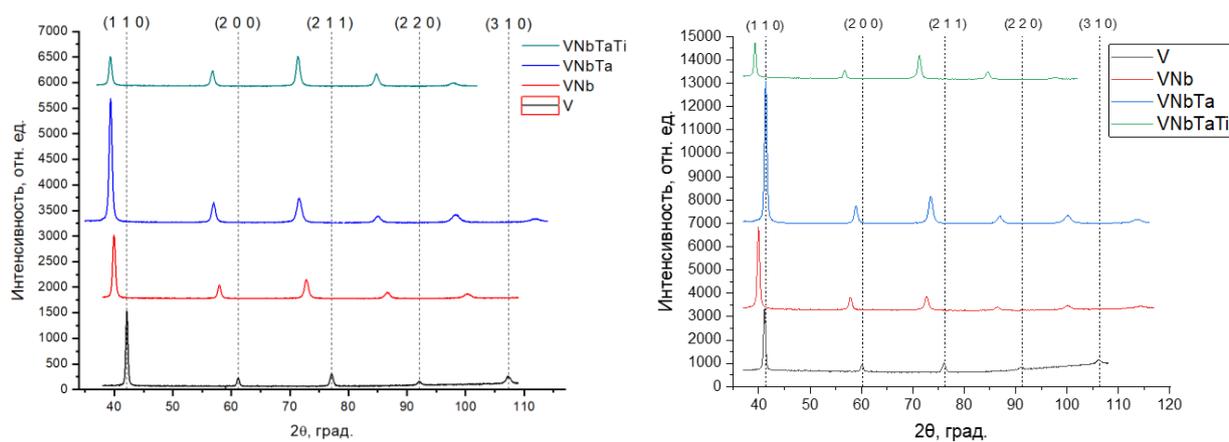


Рисунок 2 – Рентгеновские дифрактограммы исходных и облученных образцов системы V-Nb-Ta-Ti

Параметр решетки для образцов V, VNb, VNbTa, VNbTaTi составил 0,3027 нм, 0,3177 нм, 0,3227 нм и 0,3234 нм соответственно, что согласуется с увеличением среднего атомного радиуса твердых растворов. На дифрактограммах образцов, облученных ионами гелия с энергией 280 кэВ и флюенсом $1 \times 10^{16} \text{ см}^{-2}$, фазовый состав системы сохранился, однако наблюдается более выраженная асимметрия пиков и их смещение в сторону меньших углов, что указывает на деформацию кристаллической решетки, вызванную облучением.

Для количественной оценки влияния радиационных повреждений на образцы были произведены расчеты остаточных макро- и микронапряжений. На рисунке 3 представлены значения этих напряжений для исходных и облученных образцов. Во всех исходных образцах преобладали сжимающие напряжения. Добавление ниобия и тантала в образцы VNb и VNbTa приводило к еще большему уровню сжимающих напряжений из-за большего атомного радиуса этих элементов по сравнению с ванадием. В сплаве VNbTaTi, благодаря наличию Ti с меньшим атомным радиусом и более низким модулем упругости, наблюдался более низкий уровень сжимающих напряжений.

Облучение ионами криптона приводило к снижению макронапряжений, что может объясняться несколькими причинами. Вероятно, разница в атомном размере между элементами приводит к уменьшению средней длины свободного пробега электронов и фононов, что влияет на энергию образования и барьеры миграции дефектов в материале [3]. Искажение кристаллической решетки может уменьшить подвижность дефектов, поэтому многие межзеренные кластеры оставались в области образования дефектов, что приводило к увеличению скорости рекомбинации дефектов [4,5]. В результате образовалось большое количество межзеренных кластеров малого размера, что вызвало растягивающие напряжения и привело к снижению общего уровня сжимающих напряжений [6]. В микронапряжениях, напротив, наблюдалось увеличение сжимающих напряжений, что может быть связано с радиационно-

стимулированной диффузией более легких элементов к границе области когерентного рассеяния [7].

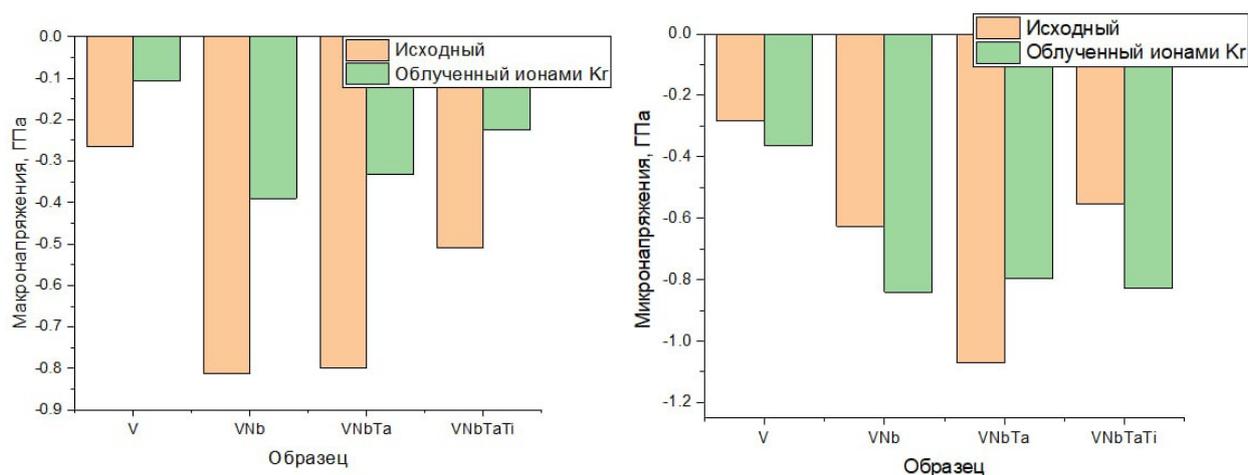


Рисунок 3 – Значения макро- и микронапряжений в исходных и облученных ионами Kr с энергией 280 кэВ образцах системы V-Nb-Ta-Ti

Таким образом, методом дуговой плавки с последующей гомогенизацией были получены эквиатомные многокомпонентные твердые растворы на основе системы V-Nb-Ta-Ti с ОЦК-решеткой. В исходных материалах были обнаружены сжимающие напряжения, причем добавление Nb и Ta в сплав приводит к увеличению уровня сжимающих напряжений, а добавление Ti приводит к их уменьшению. Облучение ионами криптона приводит к образованию сжимающих напряжений первого рода. В многокомпонентных твердых растворах наблюдается увеличение микронапряжений, которое может быть связано с радиационно-стимулированной диффузией более легких элементов к границам области когерентного рассеяния, что приводит к увеличению микронапряжений за счет размерного фактора.

Список литературы

1. High-Entropy Alloys: A Critical Review / Tsai MH, Yeh JW // Mater Res Lett / - 2014. – Vol. 2 – P. 107-123.
2. Microstructures and properties of high-entropy alloys / Zhang, Y., Zuo, T. T., Tang, Z., Gao, et al. // Progress in Materials Science / - 2014. – Vol. 61 – P. 1-93.
3. Influence of chemical disorder on energy dissipation and defect evolution in concentrated solid solution alloys / Zhang, Y., et al. // Nat Commun / - 2015. – Vol. 6.
4. Effect of solute atoms on swelling in Ni alloys and pure Ni under He+ ion irradiation / Wakai E, Ezawa J, et al. // J. Nucl. Mater. / - 2002. -Vol. 307–311 – P. 367–373.
5. Enhancing radiation tolerance by controlling defect mobility and migration pathways in multicomponent single-phase alloys / Lu C, et al. // Nat Commun / - 2016. – Vol. 7.
6. Evolution of irradiation-induced strain in an equiatomic NiFe alloy / Ullah MW, Zhang Y, Sellami N, Debelle A, Bei H, Weber WJ // Scr. Mater. - 2017. -Vol 140 - P. 35–39.
7. Microstructural stability and mechanical behavior of FeNiMnCr high entropy alloy under ion irradiation. / Leonard KJ, et al. // Acta Mater. / - 2016. -Vol 113 - P. 230-244.