

ТЕПЛОВЫЕ ЭФФЕКТЫ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ЭКВИАТОМНЫХ СПЛАВАХ НА ОСНОВЕ Ni ПРИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОМ ОБЛУЧЕНИИ ИОНАМИ Kr*И.В. Сафронов¹, В.В. Углов^{1,2}, А.О. Стречко¹, С.В. Злоцкий¹, Дж. Ке³, Г.Е. Ремнев⁴¹ Белорусский государственный университет, г. Минск, Республика Беларусь² Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», г. Москва, Россия³ Пекинский технологический институт, г. Пекин, Китай⁴ Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск, Россия

Сегодня концепция однофазных концентрированных твердых растворов предлагает иную стратегию повышения радиационной стойкости материалов, а именно многоэлементного состава с эквивалентными или почти эквивалентными концентрациями. Понимание взаимосвязи между химической сложностью сплавов и тепловыми эффектами, сопутствующими облучению, крайне желательно для повышения радиационной стойкости таких материалов. Приведен анализ радиационного нагрева, термоупругих напряжений и плотности дислокаций роста в семействе эквивалентных сплавов на основе Ni: NiCo – NiFe – NiCoFe – NiCoCr – NiCoFeCr – NiCoFeMnCr, подвергнутых высокоэнергетическому облучению ионами Kr с энергией 145 МэВ методом численного моделирования. Результаты обнаруживают, что усложнение композиционного состава сплавов особенно для NiCoFeMnCr благоприятствует радиационному отжигу дефектов, уменьшению уровня опасных термоупругих напряжений по отношению к пределу прочности и уменьшению плотности дислокаций роста по сравнению с Ni.

Ключевые слова: радиационный нагрев, термоупругие напряжения, дислокации, концентрированные твердые растворы, ионное облучение.

Введение

В настоящее время однофазные сплавы на основе нескольких основных элементов или концентрированные твердые растворы привлекают все большее внимание благодаря их возможности уникальных комбинаций различных свойств, например, высокого сопротивления ползучести, термической стойкости, коррозионной стойкости, радиационной стойкости и др. [1]. В отличие от традиционных сплавов, в концентрированных твердых растворах элементы содержатся в равных (многокомпонентные эквивалентные сплавы) или почти равных атомных концентрациях [2, 3].

Для изучения радиационных повреждений материалов осколками деления часто используют быстрые тяжелые ионы с энергией примерно от 100 МэВ до нескольких ГэВ. В этом случае высокая скорость и плотность выделенной энергии, которая почти целиком переходит электронной подсистеме, вызывает ряд таких эффектов, как локальное плавление, генерация волн давления, аморфизация и т.д. [4]. Молекулярно-динамическое моделирование в рамках двухтемпературной модели радиационного отклика Ni и NiFe-, NiCo-сплавов на воздействие иона Bi с энергией 1.542 ГэВ показало замедление диссипации тепловой энергии в сплавах, что привело к наличию в них расплавленной цилиндрической области вдоль траектории иона, однако в Ni такого не наблюдалось [5]. Сопровождающий данное моделирование эксперимент с обработкой данных сканирующей просвечивающей электронной микроскопией облученных Ni- и NiFe-образцов (1.542 ГэВ Bi⁺, $2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, 300 K) показал более высокий уровень радиационных повреждений (межузельные дислокационные петли и тетраэдры дефектов упаковки) в NiFe-сплаве [5]. В то время как в случае облучения Ni-содержащих сплавов ионами Ni с энергией 1.5 МэВ ($1 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, 300 K) результаты показали уменьшение радиационных повреждений от Ni, NiCo, NiFe/NiCoFe к NiCoFeCr/NiCoCr, что коррелирует с уменьшением их теплопроводности [6]. Ранее была высказана идея о том, что одним из факторов замедленного накопления дефектов в концентрированных твердых растворах при облучении при комнатной температуре является пониженная теплопроводность [7]. Это приводит к замедлению диссипации тепловой энергии и, таким образом удлинению стадий тепловых пиков и рекомбинации радиационных дефектов [8]. Тем не менее, как видно из двух вышеприведенных экспериментальных результатов, влияние теплопроводности не является доминирующим в простых случаях (Ni, NiFe). Исследование эволюции дефектов в Ni-содержащих сплавах (Ni, NiCo, NiFe, NiCoFe, NiCoCr) при низкоэнергетическом молекулярно-динамическом моделировании кас-

* Работа выполнена при частичной поддержке гранта БРФФИ № Т20ПТИ-009 (BITBLR2020019). При проведении численного моделирования использовалось ПО высокопроизводительного вычислительного кластера НИ ТПУ.

Уважаемые читатели!

Доступ к полнотекстовой версии журнала
«Известия высших учебных заведений. Физика»
осуществляется на платформе
Научной электронной библиотеки eLIBRARY.RU
на платной основе:

<https://elibrary.ru/contents.asp?titleid=7725>