Открытое акционерное общество «Институт реакторных материалов»

(ОАО «ИРМ»)

На правах рукописи УДК 539.2:[669.14.018.8: 621.039.531]

05201150439

Козлов Александр Владимирович

ЭВОЛЮЦИЯ РАДИАЦИОННЫХ ДЕФЕКТОВ В АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЯХ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Специальность 05.16.01 - Металловедение и термическая обработка металлов

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук

Екатеринбург-Заречный-2010

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ

1 Эволюция каскадных, областей и образование комплексов радиационных дефектов в аустенитных сталях при нейтронном\* облучении в различных температурных диапазонах

1:1^Механизм образования дефектов при действии нейтронного облучения на металлы

1.2 Действие нейтронного облучения при различных температурах

2 Действие криогенного нейтронного облучения на аустенитные стали

Обзор,имеющихся представлений

21Г Эволюция радиационных, дефектов в аустенитных сталях при криогенном нейтронном облучении

2.1.1 Материал и методики исследований

2.1.2 Изменение размеров образцов из стали 03Х20Н16АГ6 при нагревании после криогенного нейтронного облучения

2.1.3 Электронно-микроскопические исследования радиационных кластеров в стали 03X16H15M3T1 после криогенного нейтронного облучения

2.2 Модель эволюции криогенных кластеров в аустенитной стали при облучении и нагреве до температуры 110 К

2.2.1 Образование кластеров при перекрытии каскадных областей

2.2.2 Оценка скорости генерации кластеров по результатам электронной микроскопии

2.2.3 Размерные изменения, происходящие при рекомбинации и выходе точечных дефектов на стоки

2.2.4 Определение энергии миграции междоузлий

2.2.5 Расчет миграции междоузлий в ядро «своего» кластера

2.2.6 Анализ размерных изменений аустенитной стали при нагреве

образца до 110 К после криогенного нейтронного облучения- 58

2.3 Миграция междоузлий в облученной при 77 К аустенитной^ стали 03Х20Н 16АГ6 при нагреве до комнатной температуры 66

2.3.1 Вероятностный метод нахождения среднего диффузионного • времени достижения точечными дефектами определенного вида стоков 67

2.3.2 Уход междоузлий на поверхность тела 69

2.3:3 Уход междоузлий на границы зерен 69

2.3.4 Уход междоузлий на дислокации 70

2.3.5 Рекомбинация в кристаллической матрице 71

2.3.6 Рекомбинация в кластерах 71

2.3.7 Миграция междоузлий на все стоки 71

Заключение к главе 2 77

3 Образование и. эволюция радиационных дефектов в аустенитных сталях при низкотемпературном нейтронном- облучении 80

Обзор имеющихсятредставлений 80

311 Экспериментальные исследования радиационных дефектов, образующихся в аустенитной стали ЭИ-844 и модельных ГЦК материалах при низкотемпературном низкодозном нейтронном облучении 89

3.2 Модель эволюции радиационных дефектов в ГЦК материалах при низкотемпературномнейтронном облучении 101

3.2.1 Рекомбинация междоузлий в кластере 103

3.2.2 Рекомбинация междоузлий и накопление вакансий в 106 кристаллической матрице

3.2.3 Накопление вакансионных кластеров 107

3.2.4 Образование межузельных дислокационных петель 108

3.2.5 Расчет характеристик дефектов, накапливающихся в стали

при низкотемпературном нейтронном облучении 111

3.3 Анализ экспериментальных данных с использованием

модели эволюции радиационных дефектов в ГЦК материалах при низкотемпературном нейтронном облучении

122

124

126

137

142

166

181

188

191\*

198

202

206

208

217

Заключение к главе 3 4 Эволюция радиационных дефектов, образующихся в аустенитных сгаляхприсреднетемпературномвысокодозном облучении

Обзор имеющихся представлений

4.1 Исследования радиационного распухания аустенитных сталей при высокодозном нейтронном облучении в реакторах на быстрых нейтронах

4.1.1 Исследования\* стали ЧС68 после облучения в реакторе БН-6001

4.1.2 Исследования стали ЭП-150 после облучения в реакторе' БН-600\*

4.2 Модель образования и эволюции, радиационных дефектов^ при среднетемпературном нейтронном облучении стали

4.2.1 Расчет стационарных концентраций вакансий и междоузлий в стали ЧС68 на инкубационной стадии распухания

4.2.2 Зависимость критического диаметра зародыша пор в аустенитной стали ЧС68 от температуры нейтронного облучения

4.2.3 Модель коалесценции пор

4.2.4 Анализ экспериментальных результатов изменения характеристик пористости-стали ЧС68

4.2.5 Расчет скорости распухания аустенитных сталей на установившейся стадии

4.3 Эмпирическая зависимость распухания стали ЧС68 от повреяедающей дозы.

Заключение к главе 4

5. Влияние радиационных, дефектов, образующихся при\* нейтронном облучении, на физико-механические свойства

220

222

226

226

234

247

247

263'

281

284¬

291

294

297

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вдиссертационнойработеопределенызакономерностиобразованияиэволюциирадиационныхдефектовваустенитныхсталяхпринейтронномоблученииприразныхфлюенсахвширокомдиапазонетемпературоткриогенныхдосреднихиоцененовлияниеэтихдефектовнафизикомеханическиесвойствасталей

Полученыследующиенаиболееважныерезультаты

• Наоснованииэкспериментальныхрезультатовиразработанныхтеоретическихмоделейопределеныхарактеристикирадиационныхкластеровобразующихсяваустенитныхсталяхприкриогенноминизкотемпературномнейтронныхоблученияхразмерыколичествоиконцентрациясодержащихсявнихточечныхдефектовкаскаднаяэффективностьэнергиямиграциивакансийимеждоузлий

• ЭкспериментальноопределеноисиспользованиемразработанныхмоделейрассчитаноиупрочнениеиизменениемодуляЮнгааустенитныхсталейприкриогенномнейтронномоблученииОбоснованвыборсталиХНАГвкачествематериаласиловыхэлементовсверхпроводящеймагнитнойсистемытермоядерныхреакторовработающейвусловияхкриогенногонейтронногооблучения

• НапримереисследованийрадиационнойпористостисталиЧСпосленейтронногооблученияпритемпературахотдоКдоповреждающихдозотдоснаустановленомультимодальноераспределениепорпоразмерамкотороеможетбытьпредставленоввидесуммыунимодальныхраспределенийпоротличающихсявременемначалаихобразованияНаначальнойстадиираспуханияпорыобразуютсяпреимущественнонадислокацияхНаболеепозднихстадияхбольшинствопорсвязанысвыделениямифазы

• УстановленочтосувеличениемраспуханиясталиЧСдонаступаетстадиянакоторойувеличениеинтегральнойплощадиповерхностипорзасчетихобразованияиростакомпенсируетсяее

уменьшениемиззакоалесценцииПриэтоминтегральнаяплощадьповерхностипорперестаетменятьсяидостигаетсястадиямстационарногораспухания         

• РассчитанызначенияустановившейсяскоростираспуханиясталиЧСприоблучениивіреактореБНкоторыевдиапазонетемпературоблученияютдоДсоставляютотдосна

• ПолученоэмпирическоеуравнениезависимостираспуханиясталиЧСотповреждающейдозысиспользованиемкоторогорассчитанытемпературныезависимостираспуханияприоблучениивреактореБНдоразличныхповреждающихдоз

• ПолученыаналитическиевыражениясвязывающиеотносительныеизменениямодуляЮнгаиэлектросопротивленияаустенитныхсталейсраспуханиемкоторыеможнопрактическииспользоватьдляоценкираспуханиявнутрикорпусныхэлементовреакторовпорезультатамдистанционныхизмеренийфизикомеханическихсвойствматериаловэтихэлементов 

• ОпределеныкратковременныемеханическиесвойствасталщЧСпр№температурахотдоКпослеоблучениявреактореБНпритемпературахотдоКдоразличныхповреждающихдозвплотьдосна  ■

РазработанаперколяционнаямодельразрушениявкоторойнизкотемпературноеохрупчиваниесвязываетсясослучайнымвыстраиваниемпорвдольповерхностейпокоторымреализуютсяусловияразрушенияПриэтомучтеновлияниенареализациюусловийразрушениядругихструктурныхизмененийНаличиеучастковразрушенияпоповерхностямскопленияпорэкспериментальноподтвержденоэлектронномикроскопическимиисследованиями 

• использованиемэкспериментальныхрезультатовисследованийоблученнойсталииразработанныхтеоретическихмоделейувеличенресурсэксплуатациитвэловреактораБНдоэффективныхсутокчто

позволилоповыситьмаксимальноевыгораниетопливадотяжелыхатомовамаксимальнуюповреждающуюдозунаоболочкутвэладосна