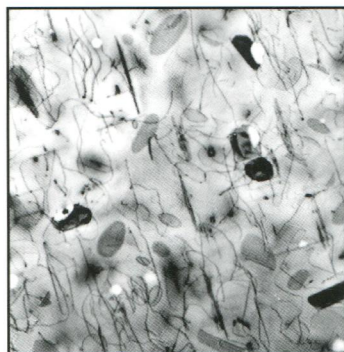


# М материалов и технологий

Гэри С. Вас

Основы радиационного  
материаловедения.  
Металлы и сплавы



ТЕХНОСФЕРА



# **М И Р** **материалов и технологий**

Гэри С. Вас

## **Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы**

Перевод с английского А.Г. Ланина  
под редакцией Н.М. Власова,  
О.И. Челябиной

ТЕХНОСФЕРА  
Москва  
2014

Издано при финансовой поддержке Федерального агентства по печати  
и массовым коммуникациям в рамках Федеральной целевой программы  
«Культура России (2012-2018 годы)»

УДК 621.039+669.019

ББК 31.4+34.2

В19

В19 Вас Гэри С.

**Основы радиационного материаловедения. Металлы и сплавы**  
Москва: ТЕХНОСФЕРА, 2014. – 992 с. ISBN 978-5-94836-400-1

В монографии изложены основы радиационной теории и механизмов влияния облучения на металлы и сплавы. Текст разделен на три части, каждая из которых включает отдельные главы, представляющие объединенную картину влияния облучения на изменение структуры и свойств металлических материалов.

Часть I монографии посвящена физическим процессам радиационного повреждения металлов и сплавов при облучении. Логическим продолжением первой части является исследование влияния облучения на физические характеристики металлов и сплавов в широком смысле этого слова. И, наконец, третья часть монографии достаточно подробно затрагивает влияние радиационных повреждений на механические и прочностные свойства металлов.

Книга представляет несомненный интерес для специалистов в области радиационного материаловедения, преподавателей, студентов и аспирантов профильных вузов.

УДК 621.039+669.019

ББК 31.4+34.2

Перевод с английского:

*Fundamentals of Radiation Materials Science*  
by Gary S. Was

Copyright © Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007

Springer Berlin Heidelberg is a part of Springer

Science+Business Media

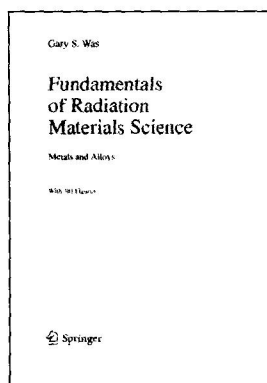
All Rights Reserved

© 2014, ФГУП НИИ НПО «Луч»,

перевод на русский язык

© 2014, ЗАО «РИЦ «ТЕХНОСФЕРА»,

оригинал-макет, оформление



ISBN 978-5-94836-400-1

ISBN 978-3-540-49471-3 (англ.)

# Содержание

Предисловие редактора перевода	13
Литература	17
Предисловие	18
Введение	20

## Глава 1

<b>Процессы радиационных повреждений</b>	<b>26</b>
1.1. Взаимодействия нейтронов с атомными ядрами	28
1.1.1. Упругое рассеяние	28
1.1.2. Неупругое рассеяние	36
1.1.3. Реакции $(n, 2n)$	38
1.1.4. Реакции $(n, \gamma)$	40
1.2. Взаимодействие между ионами и атомами	42
1.2.1. Межатомные потенциалы	42
1.2.2. Кинематика столкновений	50
1.3. Ионизация при столкновениях	72
1.3.1. Теория потери энергии	72
1.3.2. Диапазон вычислений	86
Обзор главы	93
Обозначения	94
Задачи	97
Литература	102

## Глава 2

<b>Смещение атомов</b>	<b>103</b>
2.1. Элементарная теория смещений	103
2.1.1. Вероятность смещений	104
2.1.2. Модель смещений атомов Кинчина и Пизе	106
2.1.3. Энергия смещения	109
2.1.4. Предел потери энергии электронов	115
2.2. Модификация модели смещения Кинчина — Пизе	118
2.2.1. Соображения о компенсации энергии $E_d$	118
2.2.2. Реальные поперечные сечения передачи энергии	118
2.2.3. Потеря энергии при возбуждении электронов	120
2.2.4. Влияние кристаллической структуры	124
2.3. Поперечное сечение смещения	140
2.3.1. Упругое рассеяние	140
2.3.2. Неупругое рассеяние	141
2.3.3. $(n, 2n)$ - и $(n, \gamma)$ -смещения	142

2.3.4. Модификации к модели К-Р и полному поперечному сечению смещения.....	143
2.4. Скорости смещения.....	145
2.5. Изменения свойств от дозы облучения.....	148
2.6. Смещения при облучении заряженными частицами.....	150
Обозначения.....	154
Задачи.....	157
Литература.....	160

### Глава 3

<b>Каскадные повреждения.....</b>	<b>162</b>
3.1. Средний свободный путь смещения.....	162
3.2. Первичный спектр энергий атомов отдачи.....	164
3.3. Каскадная энергия повреждения и объем каскада.....	170
3.4. Компьютерное моделирование радиационных повреждений.....	171
3.4.1. Приближенный метод двойных столкновений (МДС).....	172
3.4.2. Метод молекулярной динамики (MD).....	176
3.4.3. Кинетический метод Монте-Карло (КМС).....	179
3.5. Стадии каскадного развития.....	180
3.6. Поведение дефектов в каскаде.....	184
Обозначения.....	194
Задачи.....	196
Литература.....	196

### Глава 4

<b>Образование точечных дефектов и диффузия.....</b>	<b>198</b>
4.1. Свойства радиационно-индуцированных дефектов.....	198
4.1.1. Межузельные атомы.....	199
4.1.2. Дефекты внедрения межузельных атомов скопления.....	204
4.1.3. Комплексы межузельных атомов с примесями.....	205
4.1.4. Вакансии.....	206
4.1.5. Скопления вакансий.....	207
4.1.6. Кластеры растворенных и примесных атомов.....	207
4.2. Термодинамика формирования точечных дефектов.....	207
4.3. Диффузия точечных дефектов.....	212
4.3.1. Макроскопическое описание диффузии.....	213
4.3.2. Механизмы диффузии.....	214
4.3.3. Микроскопическое описание диффузии.....	217
4.3.4. Частота перескока $\Gamma$ .....	220
4.3.5. Частота перескока $\omega$ .....	221
4.3.6. Уравнения для $D$ .....	222

4.4. Коррелированная диффузия.....	226
4.5. Диффузия в многокомпонентных системах.....	229
4.6. Диффузия вдоль траекторий высокой диффузионной подвижности.....	230
Обозначения.....	234
Задачи.....	236
Литература.....	237

## Глава 5

### Радиационно-ускоренная диффузия и теория скоростей

<b>взаимодействия дефектов.....</b>	<b>239</b>
5.1. Уравнения баланса точечных дефектов.....	240
5.1.1. Случай 1: низкая температура, низкая плотность стоков.....	243
5.1.2. Случай 2: низкая температура, промежуточная плотность стоков.....	246
5.1.3. Случай 3: низкая температура, высокая плотность стоков.....	246
5.1.4. Случай 4: высокая температура.....	249
5.1.5. Свойства точечных дефектов в уравнениях баланса.....	252
5.1.6. Недостатки простой модели баланса точечных дефектов.....	253
5.2. Радиационно-ускоренная диффузия.....	254
5.3. Взаимодействие дефектов.....	258
5.3.1. Образование радиационных дефектов.....	262
5.3.2. Рекомбинация.....	262
5.3.3. Потери на стоках.....	263
5.3.4. Мощность стоков.....	263
5.4. Контролируемые процессы скорости реакции.....	264
5.4.1. Взаимодействие дефектов с порами.....	264
5.4.2. Взаимодействие дислокаций с радиационными дефектами.....	264
5.5. Реакции, ограниченные диффузией.....	265
5.5.1. Взаимодействие дефектов с порами.....	266
5.5.2. Взаимодействие радиационных дефектов с дислокациями.....	269
5.6. Контроль скорости смешивания.....	271
5.7. Взаимодействие радиационных дефектов с границами зерен.....	272
5.8. Когерентные выделения и легирующие элементы (растворенные элементы).....	274
Обозначения.....	276
Задачи.....	278
Литература.....	283

**Глава 6**

<b>Радиационно-индуцированные сегрегации</b>	<b>284</b>
6.1. RIS в концентрированных бинарных сплавах	287
6.1.1. Решение системы дифференциальных уравнений в частных производных	293
6.1.2. Связи межузельных атомов	294
6.1.3. Влияние размера растворенных атомов	296
6.1.4. Влияние температуры	299
6.1.5. Влияние скорости дозы	301
6.2. Радиационно-индуцированные сегрегации в тройных сплавах	302
6.3. Влияние локальных изменений состава на RIS	307
6.4. Влияние растворенных элементов на СОС	312
6.5. Примеры СОС в аустенитных сплавах	316
6.6. RIS в ферритных сплавах	318
Обозначения	322
Задачи	324
Литература	325

**Глава 7**

<b>Микроструктура дислокаций</b>	<b>327</b>
7.1. Дислокационные линии	327
7.1.1. Движение дислокации	332
7.1.2. Описание дислокаций	335
7.1.3. Перемещения, деформации и напряжения	338
7.1.4. Энергия дислокации	341
7.1.5. Натяжение линии дислокации	343
7.1.6. Силы, действующие на дислокацию	347
7.1.7. Взаимодействие между дислокациями	352
7.1.8. Расщепленные дислокации	355
7.1.9. Перегибы и ступеньки	357
7.2. Дефектные петли и тетраэдры дефектов упаковки	359
7.3. Кластеры дефектов	362
7.3.1. Доля дефектов, формирующих кластеры	362
7.3.2. Типы кластеров	365
7.3.3. Подвижность кластеров	369
7.4. Разнесенные радиационные дефекты	373
7.5. Эффективность образования радиационных дефектов	377
7.6. Зарождение и рост дислокационных петель	380
7.6.2. Теория образования кластеров	387
7.6.3. Предпочтение при зарождении кластеров	390

7.7. Рост дислокационной петли.....	395
7.8. Возврат.....	400
7.9. Эволюция микроструктуры межузельных петель.....	403
Обозначения.....	407
Задачи.....	410
Литература.....	413

## Глава 8

<b>Радиационно-индуцированные поры и пузыри.....</b>	<b>416</b>
8.1. Зарождение пор.....	417
8.1.1. Равновесное распределение пор по размерам.....	418
8.1.2. Скорость образования пор.....	421
8.1.3. Влияние инертного газа.....	431
8.1.4. Предпочтительное зарождение пор.....	438
8.2. Рост пор.....	441
8.2.1. Скорости поглощения радиационных дефектов и концентрации на поверхностях стока.....	443
8.2.2. Балансы точечных дефектов.....	448
8.3. Уравнение роста поры.....	449
8.3.1. Температурная зависимость.....	455
8.3.2. Зависимость от дозы.....	459
8.3.3. Роль дислокаций в качестве предпочтительных стоков.....	463
8.3.4. Зависимость от скорости дозы.....	466
8.3.5. Сдвиги переменных при облучении.....	467
8.3.6. Зависимость от напряжений.....	473
8.3.7. Эффект RIS.....	478
8.3.8. Влияние предпочтения при образовании дефектов.....	481
8.3.9. Решетки пор.....	485
8.3.10. Влияние микроструктуры и состава.....	487
8.3.11. Влияние эксплуатационных параметров облучения в реакторе.....	494
8.4. Рост пузырей.....	498
8.4.1. Механика пузырей.....	499
8.4.2. Закон роста.....	502
8.4.3. Рост пузырей вследствие испускания дислокационных петель.....	506
8.4.4. Решетки пузырей.....	507
8.4.5. Образование гелия.....	508
Обозначения.....	509
Задачи.....	513
Литература.....	516



**Глава 9**

<b>Стабильность фаз под облучением</b> .....	<b>519</b>
9.1. Радиационно-стимулированные сегрегации и образование выделений.....	519
9.2. Растворение за счет атомов отдачи.....	522
9.3. Радиационное разупорядочение.....	533
9.4. Образование некогерентных выделений.....	540
9.5. Образование когерентных выделений.....	548
9.6. Метастабильные фазы.....	552
9.6.1. Превращение порядок-беспорядок.....	553
9.6.2. Превращения кристаллической структуры.....	554
9.6.3. Образование квазикристаллов.....	556
9.7. Аморфизация.....	557
9.7.1. Теплота формирования соединений и различия кристаллических структур.....	558
9.7.2. Области растворимости в соединениях и критическая плотность дефектов.....	562
9.7.3. Термодинамика и кинетика аморфизации.....	565
9.8. Фазовая стабильность компонентов сплавов активной зоны реактора.....	577
Обозначения.....	581
Задачи.....	585
Литература.....	587

**Глава 10**

<b>Уникальные эффекты ионного облучения</b> .....	<b>590</b>
10.1. Методы ионного облучения.....	591
10.2. Изменения состава.....	594
10.2.1. Распыление.....	595
10.2.2. Адсорбция Гиббса.....	603
10.2.3. Имплантация атомов отдачи.....	605
10.2.4. Смешивание в каскаде (изотропное смещение).....	608
10.2.5. Комбинация процессов изменения состава поврежденной поверхности.....	621
10.2.6. Перераспределение ионов во время ионной имплантации.....	626
10.3. Другие эффекты ионной имплантации.....	630
10.3.1. Рост зерна.....	630
10.3.2. Текстура.....	632
10.3.3. Дислокационная микроструктура.....	634

10.4. Газовое нагружение большой дозой: блистеринг и отслаивание.....	637
10.5. Твердые фазы и решетка пузырей инертного газа.....	643
Обозначения.....	644
Задачи.....	647
Литература.....	650

## Глава 11

<b>Моделирование влияния нейтронного облучения посредством облучения ионами.....</b>	<b>654</b>
11.1. Мотивация использования ионного облучения взамен нейтронного облучения.....	654
11.2. Обзор аспектов радиационных повреждений, полученных посредством ионного облучения.....	657
11.3. Зависимость RIS от типа частиц.....	661
11.4. Преимущества и недостатки при использовании различных типов частиц.....	669
11.4.1. Электроны.....	672
11.4.2. Тяжелые ионы.....	674
11.4.3. Протоны.....	677
11.5. Радиационные параметры облучения частицами.....	679
11.6. Имитация нейтронного повреждения посредством облучения протонами.....	682
Обозначения.....	689
Задачи.....	690
Литература.....	691

## Глава 12

<b>Радиационное упрочнение и деформация.....</b>	<b>693</b>
12.1. Упругая и пластическая деформация.....	694
12.1.1. Упругость.....	694
12.1.2. Пластичность.....	700
12.1.3. Испытание на растяжение.....	702
12.1.4. Предел текучести.....	707
12.2. Радиационное упрочнение.....	709
12.2.1. Источники упрочнения.....	709
12.2.2. Тормозное упрочнение (упрочнение при трении).....	713
12.2.3. Суперпозиция механизмов упрочнения.....	724
12.2.4. Упрочнение поликристаллов.....	731
12.2.5. Насыщение радиационного упрочнения.....	733

12.2.6. Сравнение расчетных значений упрочнения с данными измерений	737
12.2.7. Радиационное упрочнение при отжиге	742
12.2.8. Корреляция между твердостью и пределом текучести	743
12.3. Деформация облученных металлов	747
12.3.1. Карты механизмов деформации	750
12.3.2. Локализованная деформация	754
Обозначения	759
Задачи	762
Литература	765

### Глава 13

<b>Разрушение и охрупчивание</b>	<b>769</b>
13.1. Виды разрушения	770
13.2. Когезионная прочность металлов	770
13.3. Механика разрушения	774
13.4. Испытания в механике разрушения	781
13.5. Механика упруго-пластичного разрушения	783
13.6. Хрупкое разрушение	786
13.7. Радиационно-индуцированное охрупчивание ферритных сталей	794
13.7.1. Ударные испытания надрезанных образцов	794
13.7.2. ДВТТ и снижение энергии верхней полки	798
13.7.3. Метод образований кривой	800
13.7.4. Факторы, влияющие на охрупчивание	805
13.7.5. Хрупкость ферритно-мартенситных сталей	811
13.7.6. Отжиг и повторное облучение	813
13.7.7. Усталость	815
13.8. Разрушение и усталость аустенитных сплавов при низких и промежуточных температурах	820
13.8.1. Влияние облучения на вязкость разрушения	820
13.8.2. Влияние облучения на усталость	824
13.9. Высокотемпературное охрупчивание	826
13.9.1. Поры по границам зерен и пузыри	828
13.9.2. Скольжение по границам зерен	833
13.9.3. Рост трещин по границам зерен	836
13.9.4. Карты механизмов разрушения	839
Обозначения	840
Задачи	842
Литература	845

**Глава 14**

<b>Радиационная ползучесть и рост</b> .....	<b>848</b>
14.1. Тепловая ползучесть.....	849
14.1.1. Дислокационная ползучесть.....	854
14.1.2. Диффузионная ползучесть.....	862
14.2. Радиационная ползучесть.....	865
14.2.1. Стимулированное напряжением предпочтительное зарождение петель (SIPN).....	866
14.2.2. Стимулированное напряжением предпочтительное поглощение (SIPA).....	870
14.2.3. Восхождение и скольжение за счет предпочтительного поглощения (PAG).....	872
14.2.4. Восхождение и скольжение за счет дислокационного предпочтения.....	875
14.2.5. Неустановившаяся ползучесть.....	877
14.2.6. Перестройка петель.....	881
14.2.7. Ползучесть при возврате.....	883
14.2.8. Диффузионная ползучесть: почему отсутствует влияние облучения?.....	884
14.2.9. Сравнение теории с данными по ползучести.....	885
14.2.10. Модифицированная облучением карта механизмов деформации.....	891
14.3. Радиационный рост и ползучесть сплавов циркония.....	892
14.3.1. Микроструктура облученных сплавов циркония.....	894
14.3.2. Радиационный рост.....	896
14.3.3. Радиационная ползучесть.....	900
Обозначения.....	904
Задачи.....	907
Литература.....	910

**Глава 15**

<b>Растрескивание облученных металлов и сплавов в коррозионной среде</b> .....	<b>913</b>
15.1. Коррозионное растрескивание под напряжением: обучающая программа.....	916
15.1.1. Испытания SCC.....	919
15.1.2. Процессы SCC.....	922
15.1.3. Металлургические условия.....	924
15.1.4. Возникновение и распространение трещины.....	926
15.1.5. Механизмы коррозионного растрескивания под напряжением.....	934
15.1.6. Модель распространения трещины.....	938

15.1.7. Механические модели разрушения.....	941
15.1.8. Коррозионная усталость.....	942
15.1.9. Водородное охрупчивание.....	943
15.2. Влияние облучения на химию воды.....	945
15.2.1. Радиолиз и его влияние на потенциал коррозии.....	945
15.2.2. Влияние потенциала коррозии на IASCC.....	948
15.3. Эксплуатационные и лабораторные наблюдения за влиянием облучения на SCC.....	951
15.3.1. Аустенитные сплавы.....	951
15.3.2. Ферритные сплавы.....	958
15.4. Механизмы IASCC.....	961
15.4.1. Снижение хрома на границах зерен.....	961
15.4.2. Радиационное упрочнение.....	962
15.4.3. Режим деформации.....	963
15.4.4. Селективное внутреннее окисление.....	965
15.4.5. Радиационно-индуцированная ползучесть.....	966
Обозначения.....	967
Задачи.....	969
Литература.....	969
<b>Предметный указатель.....</b>	<b>974</b>