




В.В. САГАРАДЗЕ
А.И. УВАРОВ

*У*ПРОЧНЕНИЕ
И СВОЙСТВА
АУСТЕНИТНЫХ
СТАЛЕЙ



РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК
УРАЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ МЕТАЛЛОВ

В.В. Сагарадзе, А.И. Уваров

УПРОЧНЕНИЕ И СВОЙСТВА АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ

ЕКАТЕРИНБУРГ
2013

УДК 669.15.194;539.4.:538.13.:620.178.193

ББК 22.251:34.2:30.37:30.68

С 13

Научный редактор академик РАН **В.М. Счастливец**

Рецензент д.т.н. **Л.Г. Коршунов**

Сагарадзе В.В., Уваров А.И.

С 13 Упрочнение и свойства аустенитных сталей. Екатеринбург: РИО УрО РАН, 2013. – 720 с.

ISBN 978-5-7691-2334-4

Рассмотрены методы воздействия на структуру, фазовые превращения и физико-механические свойства аустенитных сталей, включающие сильную пластическую деформацию, высокие давления, коррозионную среду, тепловые поля и облучение высокоэнергетическими частицами, в целях создания высокопрочных неферромагнитных материалов с улучшенными функциональными характеристиками. Анализируются аустенитные стали с твердорастворным, карбидным, нитридным, интерметаллидным и оксидным упрочнением. Изучены упрочнение ударными волнами, равноканальным угловым прессованием, фазовым наклепом, термоциклированием, комбинированными обработками, а также упрочнение аустенита при магнитном упорядочении и поверхностном легировании элементами внедрения. Определены усталостная прочность и износостойкость метастабильных аустенитных сталей. Большое внимание уделено исследованию аномальных диффузионных превращений (атомное перераспределение легирующих элементов, растворение карбидов, интерметаллидов и оксидов в аустените и др.), развивающихся при наноструктурировании аустенитных сталей при холодной мегадеформации в результате образования и миграции большого количества точечных дефектов деформационного происхождения. Предложены нетрадиционные подходы к сдерживанию радиационного распухания аустенитных реакторных сталей при нейтронном облучении за счет увеличения прямых и косвенных стоков точечных дефектов в виде межфазных границ «тонкопластинчатый аустенит/мартенсит» и «интерметаллид/аустенит». Предложены составы интеллектуальных аустенитных сталей с эффектом памяти формы и регулируемым коэффициентом термического расширения. Книга является итогом многолетней деятельности авторов и сотрудников ИФМ УрО РАН в области создания аустенитных сталей и методов их упрочнения.

Монография предназначена для металлургов, металлофизиков и инженеров, занимающихся фазовыми превращениями, разработкой и использованием аустенитных сталей.

УДК 669.15.194;539.4.:538.13.:620.178.193

ББК 22.251:34.2:30.37:30.68



ISBN 978-5-7691-2334-4

© ИФМ УрО РАН, 2013 г.

© РИО УрО РАН, 2013 г.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Аустенитные стали с твердорастворным упрочнением	5
1.1. Механические свойства никелевых сталей	6
1.2. Механические свойства марганцевых сталей	12
1.3. Азотсодержащие аустенитные стали	20
1.3.1. Физико-механические свойства при комнатной температуре	20
1.3.2. Физико-механические свойства при низких температурах	22
1.3.3. Комплексное упрочнение азотсодержащей толстолистовой аустенитной стали 04X20H6Г11АМ2БФ	50
Список литературы	66
Глава 2. Аустенитные стали, упрочняемые наноразмерными частицами	72
2.1. Интерметаллидное упрочнение	73
2.1.1. Структура и физические свойства сталей	73
2.1.2. Фрактография и механические свойства сталей при растяжении	79
2.1.3. Изменение ударной вязкости	85
2.1.4. Механические свойства фазонаклепанного аустенита	87
2.1.5. Нейтронографический и электронно-микроскопический анализ микронапряжений, возникающих при интерметаллидном старении	90
2.2. Карбидное упрочнение	101
2.2.1. Структура никелевых сталей	102
2.2.2. Механические свойства никелевых сталей	103
2.2.3. Структура марганцевых сталей	109
2.2.4. Фрактография и механические свойства стареющих марганцевых сталей	112
2.2.5. Механические свойства стареющих марганцевых сталей с двухфазной ($\gamma\epsilon$)-структурой	115
2.2.6. Возникновение микронапряжений при карбидном старении	120
2.3. Карбонитридное упрочнение	133
2.4. Карбидно-интерметаллидное упрочнение	135
2.5. Упрочнение нанокислами	143
2.5.1. О технологии получения дисперсно-упрочненных оксидами сталей	144
2.5.2. Формирование аустенитных ДУО-сталей с использованием механического легирования в смеси порошков Fe_2O_3 -Fe-35Ni-3Ti(Zr)	146
Список литературы	155
Глава 3. Бездиффузионные фазовые превращения и упрочнение аустенитных сталей при холодной деформации	160
3.1. О деформационном упрочнении стабильных и метастабильных аустенитных сталей	160
3.2. Свойства аустенитной стали X18H10T, деформированной прокаткой и равноканальным угловым прессованием	162
3.2.1. Структура и свойства стали после РКУ-прессования	163
3.2.2. Структура и свойства стали после холодной деформации прокаткой	165
3.2.3. Причины повышенной пластичности стали после РКУ-прессования	168

3.3. Образование ферромагнитного мартенсита в относительно стабильных аустенитных сталях при холодной деформации	169
3.3.1. Образование ферромагнитных фаз (мартенсита и карбидов) при холодной деформации стали Гадфильда	169
3.3.2. Мартенситное превращение при холодной деформации в высоколегированной азотсодержащей стали 10X18AГ18	171
3.3.3. Мартенситные превращения и изменение магнитных свойств стали 04X20H6Г11АМ2БФ при холодной деформации	176
3.3.4. Образование мартенсита и феррита в аустенитной стали 40Г17Ю3 при деформации и термообработке	181
3.4. Текстурные, концентрационные и структурные изменения при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в деформированном сплаве Н32	196
3.4.1. Структурные изменения	196
3.4.2. Концентрационные изменения	198
3.4.3. Текстурные изменения	202
Список литературы	206
Глава 4. Аномальные диффузионные фазовые превращения при холодной деформации и изменение свойств аустенитных сталей	210
4.1. Диффузионное перераспределение легирующих элементов и образование сегрегаций Ni при холодной деформации в Cr–Ni-аустенитных сталях	211
4.1.1. Изменение магнитных свойств в стабильных Cr–Ni-аустенитных сталях при холодной деформации	211
4.1.2. Диффузионное перераспределение никеля в Cr–Ni-аустенитных сталях при холодной деформации	216
4.1.3. Влияние температуры деформации на перераспределение легирующих элементов в аустенитных Cr–Ni-сталях	220
4.1.4. Упорядочение обогащенных никелем кластеров, формирующихся в аустенитных Cr–Ni-сталях при холодной деформации	225
4.1.5. Теоретическое описание деформационно-индуцированных сегрегаций	229
4.2. Растворение интерметаллидов в аустенитной матрице при холодной деформации	234
4.2.1. Низкотемпературное деформационно-индуцированное образование твердых растворов при растворении интерметаллидов разного размера	235
4.2.2. Деформационное растворение интерметаллидов с разным знаком параметров несоответствия ГЦК-решеток частиц и матрицы	239
4.2.3. Влияние температуры деформации на растворение вторых фаз	240
4.2.4. Влияние скорости холодной деформации на растворение интерметаллидов	241
4.2.5. О механизме низкотемпературной диффузии при холодной деформации	243
4.3. Деформационно-индуцированное низкотемпературное растворение углерода, карбидов и нитридов в аустените	244
4.3.1. Сплавы и методика исследования деформационного растворения углеродсодержащих частиц	246
4.3.2. Деформационное растворение частиц сажи в Fe–Ni-аустените	249
4.3.3. Деформационное растворение карбидов Fe ₃ C в аустенитном сплаве Н36	252
4.3.4. Деформационное растворение карбидов Fe ₃ C в ГЦК-сплаве Ni–1% ⁵⁷ Fe	253
4.3.5. Деформационное растворение специальных карбидов VC в аустенитном сплаве Н36	254
4.3.6. Образование азотистого аустенита при растворении нитридов в сплавах железа при холодной деформации	256
4.4. Растворение оксидов в сталях при холодной деформации	257
4.4.1. Мессбауэровский анализ процесса растворения оксидов в железе при холодной деформации	257
4.4.2. Сравнительный анализ кинетики деформационного растворения оксидов Y ₂ O ₃ и Fe ₂ O ₃ в сталях	260

4.4.3. Причины низкотемпературного деформационного растворения оксидов	270
4.5. Перспективы использования деформационно-индуцированных диффузионных процессов для улучшения свойств сталей	272
Список литературы	273
Глава 5. Упрочнение аустенитных сталей пластической деформацией и старением ..	279
5.1. Влияние стабильности аустенита на структуру, характер разрушения и механические свойства стареющих никелевых сталей	279
5.1.1. Структура упрочненных никелевых сталей	279
5.1.2. Фрактография стареющих аустенитных сталей разной стабильности ..	283
5.1.3. Механические свойства никелевых сталей	285
5.2. Влияние стабильности аустенита на структуру и механические свойства марганцевых сталей	296
5.2.1. Структура марганцевых сталей	296
5.2.2. Механические свойства марганцевых сталей	297
5.3. Фрактография и механические свойства аустенитных сталей при низких температурах	300
5.4. Влияние холодной деформации на структуру и механические свойства аустенитной стали с карбидно-интерметаллидным упрочнением	307
5.5. Упрочнение крупногабаритных изделий из аустенитных сталей	309
5.5.1. Упрочнение бандажных колец электродвигателей и турбогенераторов при старении	310
5.5.2. Упрочнение бандажных колец с применением пластической деформации	311
Список литературы	313
Глава 6. Упрочнение аустенитных сталей ударными волнами	316
6.1. Структура и механические свойства закаленной аустенитной стали 55X4Г18Ф после ударно-волнового нагружения	316
6.2. Структура и механические свойства стареющих аустенитных сталей 40X4Г18Ф и 60X3Г8Н8Ф	320
6.2.1. Упрочнение ударными волнами	320
6.2.2. Упрочнение комбинированной обработкой	326
6.2.3. Структура и механические свойства шарового образца стали 60X3Г8Н8Ф, упрочненной с помощью сферических волн напряжений ..	334
6.3. Структура и механические свойства азотсодержащей стали типа X18АГ18 после ударно-волнового нагружения	345
6.3.1. Нагружение азотсодержащей стали со структурой прерывистого распада	345
6.3.2. Изменение твердости при непрерывном и прерывистом распадах	353
6.3.3. Влияние амплитуды ударно-волнового нагружения на развитие прерывистого распада	359
Список литературы	367
Глава 7. Упрочнение аустенитных сталей в результате прямого и обратного мартенситных превращений, стабилизация и рекристаллизация аустенита ..	370
7.1. Возникновение новых дислокаций при обратном $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в процессе нагрева	370
7.1.1. Структурный механизм ОЦК \rightarrow ГЦК-превращения в ферритно-аустенитной стали X28Н9М2	371
7.1.2. Повышение плотности дислокаций при сдвиговом ОЦК \rightarrow ГЦК-превращении при нагреве	375
7.2. О наследовании дислокаций при обратном α - γ -превращении	377
7.2.1. Получение дислокационной субзеренной структуры в исходной ОЦК-фазе	378

7.2.2. Наследование и перемещение дислокаций в процессе ОЦК→ГЦК-превращения при нагреве	379
7.2.3. Теоретический анализ дислокационных изменений в процессе наследования дислокаций при мартенситных превращениях $\gamma \leftrightarrow \alpha$, ϵ	382
7.3. Кристаллографические особенности обратного $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения	387
7.3.1. Теоретический анализ кристаллогеометрии обратного мартенситного превращения	387
7.3.2. Плоскости габитуса γ -фазы	390
7.3.3. Ограничение числа ориентации γ -фазы при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении	392
7.3.4. О степени обратимости сдвиговых процессов при $\gamma \rightarrow \alpha$ - и $\alpha \rightarrow \gamma$ -мартенситных превращениях	393
7.3.5. Упорядочение аустенита сплава Fe-32%Ni по типу L1 ₀ и выявление соотношений Хэдди-Брукса при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении	398
7.3.6. Образование промежуточной ϵ -фазы при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в Fe-Ni-сплавах	404
7.3.7. Разориентации γ -кристаллов после $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращения и циклических превращений $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$	408
7.3.8. Формоизменение при $\alpha \rightarrow \gamma$ -превращении в Fe-Ni-сплавах	412
7.4. Структурные формы γ -фазы, нанокристаллический аустенит и фазовый наклеп в результате γ - α - γ -превращений	424
7.4.1. Крупнопластинчатая γ -фаза и фазовый наклеп аустенита	424
7.4.2. Нанокристаллический аустенит и упрочнение α -мартенсита кристаллами γ -фазы (закалка «вверх»)	426
7.4.3. Глобулярный аустенит	429
7.5. Фазовый наклеп аустенита в результате γ - ϵ - γ -превращений	430
7.6. Стабилизация аустенита	434
7.6.1. Стабилизация Fe-Ni-аустенита в результате $\gamma \rightarrow \alpha \rightarrow \gamma$ -превращений	436
7.6.2. Стабилизация Fe-Ni-Ti-аустенита	437
7.7. Кристаллографические особенности рекристаллизации фазонаклепанного аустенита	442
7.7.1. Рекристаллизация преимущественно восстановленного Fe-Ni-Ti-аустенита	443
7.7.2. Рекристаллизация невосстановленной нанокристаллической γ -фазы в сплаве H26XT1	445
7.7.3. Рекристаллизация Fe-Ni-аустенита при медленном нагреве	447
7.7.4. Влияние легирующих элементов на рекристаллизацию фазонаклепанного аустенита	447
7.8. Изменение функциональных свойств сталей при образовании нанокристаллического аустенита	449
7.9. Аустенитные стали, упрочняемые фазовым наклепом	451
Список литературы	453
Глава 8. Влияние термоциклирования на изменение структуры и свойств марганцевых и хромоникелевых аустенитных сталей	460
8.1. Изменение физико-механических свойств аустенитных сталей Г40 и Х12Н40 при термоциклировании	460
8.2. Эволюция структуры при термоциклировании	462
8.3. Причины структурных изменений при термоциклировании	465
Список литературы	469
Глава 9. Магнитодисперсионное твердение инварных аустенитных сталей	470
9.1. Эффект инварного упрочнения	470
9.2. Магнитодисперсионное твердение сталей на Fe-Ni-основе	472
9.2.1. Упрочнение различных однофазных аустенитных сплавов на Fe-Ni-основе при магнитном упорядочении	472

9.2.2. Причины инварного упрочнения. Магнитодисперсионное твердение . . .	475
9.2.3. Влияние магнитодисперсионного твердения на упрочнение стареющих Ni–Ti-аустенитных сталей	481
9.2.4. Влияние магнитодисперсионного твердения на ударную вязкость	484
9.2.5. Влияние магнитодисперсионного твердения на пластичность	487
9.2.6. Влияние магнитодисперсионного твердения на износостойкость	492
9.2.7. Влияние магнитодисперсионного твердения на стабилизацию состаренного Fe–Ni–Ti-аустенита	495
9.3. Магнитодисперсионное твердение антиферромагнитных аустенитных сталей на Fe–Mn-основе	495
Список литературы	503
Глава 10. Усталостная прочность метастабильных аустенитных сталей	507
10.1. Влияние масштабного фактора и поверхностной обработки	507
10.2. Размер зерна и усталостная прочность аустенита	508
10.3. Влияние стабильности аустенита	510
10.4. Воздействие дестабилизирующего интерметаллидного и карбидного старения	511
10.5. Фазовый наклеп и выносливость деталей из аустенитных сталей	513
Список литературы	517
Глава 11. Поверхностное упрочнение и повышение износостойкости аустенитных сталей	518
11.1. Поверхностное упрочнение метастабильных аустенитных сталей с помощью контролируемого мартенситного превращения	518
11.1.1. Метод упрочнения	518
11.1.2. Износостойкость метастабильной стали H26T4	522
11.2. Поверхностное упрочнение при азотировании	525
11.3. Цементация специально легированных аустенитных сталей	527
11.3.1. Влияние углерода на структуру и свойства стареющих Mn–V–Mo-аустенитных сталей	528
11.3.2. Износостойкость состаренных Mn–V–Mo-аустенитных сталей с высоким содержанием углерода	533
11.4. Поверхностное упрочнение высокохромистых аустенитно-ферритных нержавеющей сталей в результате образования σ -фазы	536
11.4.1. Фазовые превращения в аустенитно-ферритных сталях	537
11.4.2. Поверхностное упрочнение стали 70X28H8M2 и износостойкость σ -содержащих сталей	540
11.5. Влияние мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения при трении на износостойкость метастабильных аустенитных сталей	542
11.6. Влияние ϵ -мартенсита на снижение коэффициента трения и повышение износостойкости марганцевых аустенитных сталей	544
11.7. Влияние легирования азотом на износостойкость Cr–Mn-аустенитных сталей	548
11.7.1. Исходная структура азотсодержащих аустенитных сталей	550
11.7.2. Абразивная износостойкость сталей	551
11.7.3. Износостойкость сталей при сухом трении скольжения	552
Список литературы	554
Глава 12. Упрочнение Fe–Ni-инваров и регулирование коэффициента термического расширения	558
12.1. Высокопрочные стареющие аустенитные инвары	558
12.1.1. Структура и физико-механические свойства Fe–Ni–Co–Ti-инвара с метастабильным аустенитом	558
12.1.2. Физико-механические свойства инваров с устойчивым при охлаждении аустенитом	573
	717

12.2. Регулирование коэффициента термического расширения аустенита в сплаве Н32 в результате внутризеренного перераспределения никеля	582
12.3. Использование сталей с регулируемым КТР для создания псевдобиметаллических сенсоров	585
Список литературы	587
Глава 13. Упрочнение и радиационная стойкость аустенитных сталей при нейтронном облучении	589
13.1. Влияние малодозного нейтронного облучения при 77 К и насыщения тритием на структуру и механические свойства аустенитных реакторных сталей ..	589
13.1.1. Методические особенности обработки сталей	590
13.1.2. Упрочнение аустенитной стали Х16Н15М3Т1 при насыщении тритием и низкотемпературном нейтронном облучении	591
13.1.3. Распределение трития и его влияние на упрочнение стали Х16Н15М3Т1	595
13.1.4. Отжиг точечных дефектов и изменение механических свойств	597
13.1.5. Изменение характеристик пластичности	598
13.2. Нетрадиционные подходы к сдерживанию радиационного распухания аустенитных нержавеющей сталей	601
13.2.1. Нержавеющие Cr–Ni–Mo-стали с аустенитно-мартенситной структурой	603
13.2.2. Нержавеющие стали с речной α/γ -структурой и уменьшенной активностью	606
13.2.3. Аустенитные нержавеющей стали с радиационно-индуцируемым интерметаллидным старением	607
13.3. Растворение интерметаллидов в каскадах смещения при нейтронном облучении аустенитной стали Н35Т3	616
13.3.1. Мессбауэровское исследование растворения γ' -частиц	618
13.3.2. Рентгенографическое исследование облученного сплава Н35Т3	622
13.4. Структурные и концентрационные изменения в аустенитных сталях при облучении	623
13.4.1. Расслоение по никелю и старение аустенитных сталей на Fe–Ni-основе при низкотемпературном (393–473 К) электронном облучении	623
13.4.2. Образование приграничных и внутризеренных атомных сегрегаций в аустенитных сталях при высокодозном облучении	628
13.4.3. Формирование нанокристаллической структуры при высокодозном облучении	631
13.4.4. Об аналогии воздействия точечных дефектов радиационного и деформационного происхождения	632
13.5. Длительная прочность и ползучесть реакторных сталей, дисперсно-упрочненных оксидами	633
Список литературы	635
Глава 14. Коррозионное растрескивание аустенитных сталей под напряжением ..	640
14.1. Методика исследования аустенитных сталей на КРН	640
14.2. Коррозионное растрескивание под напряжением Cr–Ni–Ti-аустенитных сталей с интерметаллидным упрочнением	641
14.2.1. Влияние ТМО и старения на упрочнение и сопротивление КРН аустенитной стали Х12Н18Т3	642
14.2.2. Влияние частичного ячеистого распада на КРН	644
14.2.3. Влияние холодной пластической деформации на КРН	646
14.2.4. Влияние стабильности аустенита на КРН	647
14.2.5. Влияние водорода на охрупчивание и КРН аустенитных Cr–Ni-сталей	649
14.3. Коррозионное растрескивание под напряжением высокопрочных марганцевых аустенитных сталей, упрочняемых карбидным старением	650
14.3.1. Коррозионное растрескивание стареющих марганцевых аустенитных сталей типа Г20Ф2М3 с разным содержанием углерода и различной стабильностью аустенита	651

14.3.2. Влияние ВТМО на КРН стареющих марганцевых аустенитных сталей	653
14.3.3. Влияние деформационного двойникования на КРН аустенитных сталей типа 40X4Г18Ф	656
14.3.4. Влияние перестаривания на сопротивление КРН марганцевых аустенитных сталей	660
14.3.5. Влияние легирования молибденом стали Г20Ф2М на сопротивление КРН	666
14.3.6. Катастрофическое коррозионное растрескивание стареющих Cr–Mn–V-аустенитных сталей	670
14.4. Коррозионное растрескивание под напряжением азотистых аустенитных сталей	677
14.4.1. Коррозионно-механическая стойкость аустенитных Cr–Mn-сталей с нитридным упрочнением	677
14.4.2. КРН Cr–Mn-нержавеющих сталей с повышенным содержанием азота	680
Список литературы	682
Глава 15. Высокопрочные дисперсионно-твердеющие аустенитные стали с эффектом памяти формы	686
15.1. Об обратимой деформации в марганцевых аустенитных сталях с мартенситным $\gamma \rightarrow \epsilon$ -превращением	686
15.2. Структурные изменения в сталях (0,2–0,4)C–18Mn–2Si–2V при старении ...	688
15.3. Изменения величины ЭПФ в сталях при стабилизирующем и дестабилизирующем старении	690
15.4. Механические свойства ЭПФ-сталей с 0,4 и 0,2% C	694
15.5. Причины различной величины ЭПФ в сталях с 0,01–1,0% углерода	695
15.6. Упрочнение марганцевых ЭПФ-сталей с 0,2–1,0% C в результате карбидного старения	700
15.7. Упрочнение стареющих ЭПФ-сталей с помощью тепловой деформации	702
15.8. Измельчение зерна ЭПФ-сталей в результате быстрой кристаллизации из расплава	704
15.9. Нержавеющие ЭПФ-стали с карбидным упрочнением	707
15.10. Эффект памяти формы с использованием деформационного двойникования ϵ -мартенсита	707
Список литературы	711