

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«Оренбургский государственный университет»

**Л.В. Шашкова**

**ФРАКТАЛЬНО-СИНЕРГЕТИЧЕСКИЕ  
АСПЕКТЫ МИКРОПОВРЕЖДАЕМОСТИ,  
РАЗРУШЕНИЯ И ОПТИМИЗАЦИИ  
СТРУКТУРЫ СТАЛИ В УСЛОВИЯХ  
ВОДОРОДНОЙ ХРУПКОСТИ И  
СЕРОВОДОРОДНОГО КОРРОЗИОННОГО  
РАСТРЕСКИВАНИЯ**

Монография

Рекомендовано к изданию Ученым советом федерального государственного  
бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального  
образования «Оренбургский государственный университет»

Оренбург  
2013

УДК 538. 951. – 405

ББК

Ш

Рецензенты

профессор, доктор технических наук Каныгина О. Н.

профессор, доктор физико-математических наук Манаков Н. А.

**Шашкова, Л. В.**

Ш

Фрактально-синергетические аспекты микроповреждаемости, разрушения и оптимизации структуры стали в условиях водородной хрупкости и сероводородного растрескивания: монография / Л. В. Шашкова; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург: ОГУ, 2013. – 305 с.

ISBN

Книга посвящена исследованиям поведения металлов в условиях активного наводороживания и одновременного действия полей напряжений. Термодинамический анализ неравновесной системы металл-водород и обобщение экспериментальных результатов позволили сформулировать синергетический закон водородной повреждаемости. Физический анализ закона с позиций современных теорий физики пластической деформации и разрушения твердых тел: дилатонно-фрустронной модели прочности, теории кооперативных эффектов при сильных возмущениях и структурной дислокационной теории микроскопа показал правомерность этих подходов. Исследованы синергетические эффекты, наблюдаемые в неравновесных системах металл-водород, а также возможности практического применения закона: вопросы долговечности, аттестации стали на склонность к ВХ, выбора метода оптимального упрочнения стали и другие. По материалам собственных исследований предложены некоторые нетрадиционные, но эффективные методологические подходы и методики и их применение для решения поставленных открытых вопросов по проблемам водородной хрупкости стали.

УДК 538. 951. – 405

ББК

ISBN

© Шашкова Л.В., 2013

© ОГУ, 2013

## Содержание

	Введение.....	7
1	Водородная хрупкость металлов и сплавов.....	24
1.1	Феноменология водородной хрупкости металлов и сплавов. Особенности и трудности решения проблемы водородной хрупкости .....	24
1.2	Механизмы и теории водородной хрупкости.....	32
1.3	Концепции прочности и разрушения твердых тел. О необходимости учета синергизма систем металл-водород .....	44
	Список использованных источников к разделу 1.....	49
2	Кинетика развития повреждаемости и структурных изменений стали в связи с превращениями абсорбированного водорода.....	62
2.1	Стадийность развития повреждаемости стали и превращений водорода при наводороживании.....	62
2.1.1	Кинетика превращений водорода при электролитическом наводороживании .....	64
2.1.2	Трехстадийная кинетика изменения сопротивления отрыву с учетом состояний водорода в стали.....	71
2.2	Кинетика структурных превращений стали в процессе наводороживания.....	76
2.2.1	Структурные особенности рельефа микропластической деформации поверхности образцов, подвергнутых кручению на различных стадиях развития водородной хрупкости.....	77
2.2.2	Структурные особенности деформации и разрушения сталей при изгибе на стадии обратимого охрупчивания. Влияние структурного фактора.....	82

2.2.3	Электронно-фрактографическое исследование изломов на трех стадиях развития водородной хрупкости.....	89
	Список использованных источников к разделу 2.....	97
3	Синергетический закон повреждаемости стали диффузионно-подвижным водородом.....	104
3.1	Термодинамика локальной повреждаемости открытой системы металл-водород. Феноменологический закон водородной повреждаемости.....	104
3.2	Экспериментальное обоснование синергетического закона и параметра водородной повреждаемости.....	113
3.3	Параметр повреждаемости и критическая концентрация (активность) водорода.....	119
3.4	Закон повреждаемости в связи с результатами известных теорий водородной хрупкости.....	126
	Список использованных источников к разделу 3.....	131
4	Синергетические эффекты в открытых неравновесных системах металл-водород.....	136
4.1	Стохастические релаксационные колебания характеристик тонкой структуры «in situ» при непрерывном наводороживании.....	136
4.2	Оценка величины концентрационных водородных микронапряжений....	153
4.3	Металл-водородные состояния и образование диссипативных структур при нелинейной диффузии водорода в стали.....	159
4.4	Фрактальность микрорельефа пластической деформации стали в процессе наводороживания.....	174
4.5	Синергетический эффект сверхупругости металл-водородной системы при нестационарной диффузии и индентировании.....	181

	Список использованных источников к разделу 4.....	190
5	Физика повреждаемости стали водородом.....	197
5.1	Атомные механизмы пластической деформации и разрушения твердых тел при наводороживании.....	197
5.1.1	Модель микроскола и параметр повреждаемости при водородном охрупчивании стали.....	198
5.1.2	Кинетическая теория повреждаемости мигрирующим водородом с позиций реализации дилатонно-фрустронного механизма и теории кооперативных эффектов при сильных возмущениях.....	204
5.2	Кластерный механизм водородной хрупкости стали.....	215
5.3	Водородное зондирование фрактального спектра энергий разрушения структур.....	223
	Список использованных источников к разделу 5.....	228
6	Практическое применение синергетического закона и параметра водородной повреждаемости конструкционной стали.....	233
6.1	Зависимость параметра повреждаемости от свойств поверхностного слоя. Оценка водородоповреждаемости через деформацию поверхности.	233
6.2	Определение коэффициента трещиностойкости высокопрочной стали в сероводородсодержащей среде.....	236
6.3	Оценка стали на склонность к сероводородному коррозионному растрескиванию по параметру водородоповреждаемости.....	241
6.4	Ускоренные методы оценки пороговых напряжений сероводородного коррозионного растрескивания .....	245
6.5	Оценка долговечности стали в условиях наводороживания.....	254
6.6	Выбор типа упрочнения стали.....	258

	Список использованных источников к разделу 6.....	261
7	Взрывотермическая обработка стали.....	265
7.1	Взрывотермическая обработка как перспективный метод повышения сероводородной стойкости стали.....	265
7.2	Влияние взрывотермической обработки на микроструктуру и свойства стали.....	269
7.3	Эволюция субструктуры и карбидной фазы при взрывотермическом упрочнении.....	279
7.4	Влияние взрывотермической обработки на коррозионную стойкость стали.....	289
	Список использованных источников к разделу 7.....	298