

О. Ю. Елагина, С. И. Думанский, К. В. Наконечная

ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

**ОХРУПЧИВАНИЕ, ЗАРОЖДЕНИЕ
И РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН**

О. Ю. Елагина, С. И. Думанский, К. В. Наконечная

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА
РАЗРУШЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ**

ОХРУПЧИВАНИЕ, ЗАРОЖДЕНИЕ И РАЗВИТИЕ ТРЕЩИН

Учебное пособие

Москва Вологда
«Инфра-Инженерия»
2025

УДК 620.193
ББК 34.437
Е47

Рецензенты:

заведующий лабораторией, д. т. н., проф. *Куксенова Лидия Ивановна*
(Институт машиноведения им. А. А. Благонравова Российской академии наук
(ИМАШ РАН));

заведующий кафедрой «Материаловедение», к. т. н., доцент
Плохих Андрей Иванович (МГТУ им. Н. Э. Баумана)

Елагина, О. Ю.

Е47 Физико-химическая механика разрушения материалов. Охрупчивание, зарождение и развитие трещин : учебное пособие / О. Ю. Елагина, С. И. Думанский, К. В. Наконечная. — Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2025. — 168 с. : ил., табл.
ISBN 978-5-9729-2374-8

Рассмотрены теоретические основы возникновения и развития трещин. Приведены существующие подходы к оценке процесса накопления повреждений в кристаллической решетке металлов, предшествующих зарождению трещин, а также рассмотрены механизмы их развития под действием приложенных напряжений. Рассмотрен вклад неметаллических включений в снижение трещиностойкости сталей, показано влияние сварочных технологий и операций отпуска на зарождение трещин разного типа. Представлены различные эксплуатационные факторы, вызывающие растрескивание сталей. Рассмотрены основные особенности морфологии изломов и механизмы разрушения, вызывающие их формирование. Включен многочисленный фотографический материал, собранный авторами при выполнении различных экспертиз. В конце каждого раздела приведен список контрольных вопросов и практических заданий, которые могут быть полезны при чтении курсов дисциплин, связанных с изучением разрушений материалов и конструкций.

Для магистрантов, обучающихся по программам подготовки направлений «Машиностроение» и «Технологические машины и оборудование», а также для специалистов, работающих в области технических расследований аварий и инцидентов нефтегазовой и смежных отраслей промышленности.

УДК 620.193
ББК 34.437

ISBN 978-5-9729-2374-8

© Елагина О. Ю., Думанский С. И., Наконечная К. В., 2025
© Издательство «Инфра-Инженерия», 2025
© Оформление. Издательство «Инфра-Инженерия», 2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОСНОВЫ МЕХАНИКИ ЗАРОЖДЕНИЯ	
И РАЗВИТИЯ ТРЕЩИН.....	7
Контрольные вопросы по разделу	16
Задания для практических работ по разделу	16
2. ПРИЧИНЫ ЗАРОЖДЕНИЯ ТРЕЩИН В СТАЛЯХ,	
СВЯЗАННЫЕ С ИЗГОТОВЛЕНИЕМ ОБОРУДОВАНИЯ	
И КОНСТРУКЦИЙ	17
2.1. Неметаллические включения	17
2.2. Оксидные включения	22
2.3. Силикаты и алюмосиликаты	25
2.4. Сульфиды	29
2.5. Нитриды	31
2.6. Критические размеры неметаллических включений	33
Контрольные вопросы по разделу	34
Задания для практических работ по разделу	34
3. ВЛИЯНИЕ ПРОЦЕССА СВАРКИ	
НА ЗАРОЖДЕНИЕ РАЗРУШЕНИЙ	35
3.1. Образование горячих трещин	35
3.2. Структурно-фазовые изменения в металле сварного соединения	41
3.3. Формирование негативных структур в сварном соединении	
при медленном охлаждении	45
3.4. Формирование нежелательных структур в сварном соединении	
при быстром охлаждении после сварки	55
3.5. Холодные трещины при сварке	62
3.6. Слоистые трещины	67
3.7. Разупрочнение в процессе сварки	68
3.8. Отпускная хрупкость (трещины повторного нагрева)	70
Контрольные вопросы по разделу	73
Задания для практических работ по разделу	73
4. ПРИЧИНЫ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ СТАЛЕЙ	
ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОБОРУДОВАНИЯ И КОНСТРУКЦИЙ	74
4.1. Низкотемпературная хрупкость (хладноломкость)	74
4.2. Тепловая хрупкость при эксплуатации в условиях	
повышенных температур	83
4.3. Разупрочнение при работе в условиях повышенных температур	85
4.4. Наклеп и аморфизация поверхности	98
4.5. Деформационное старение	104
4.6. Водородное охрупчивание и коррозионное растрескивание	113
4.7. Усталостное охрупчивание при циклическом нагружении	123

5. ФРАКТОГРАФИЯ ИЗЛОМОВ И АНАЛИЗ РАЗВИТИЯ	
ПРОЦЕССА РАЗРУШЕНИЯ.....	128
5.1. Анализ характера изломов по механизму разрушения	128
5.2. Морфология изломов	133
5.2.1. Особенности морфологии поверхности излома	
на микроуровне	134
5.2.2. Особенности морфологии поверхности излома	
на макроуровне.....	139
5.3. Фрактография изломов.....	146
5.4. Особенности развития разрушения трубопроводов	
и оборудования, работающего под давлением.....	153
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	159