

539.3
П34



Г.С. Писаренко, В.А. Стрижало

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ
В МЕХАНИКЕ
ДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА**



НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНЫ
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ ПРОЧНОСТИ им. Г. С ПИСАРЕНКО

Г. С. Писаренко, В. А. Стрижало

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ
МЕТОДЫ
В МЕХАНИКЕ
ДЕФОРМИРУЕМОГО
ТВЕРДОГО ТЕЛА**

*ПРОЕКТ
«НАУКОВА КНИГА»*

КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 2018

УДК 521 + 620.1.05

Первое издание монографии увидело свет в 1986 г. За прошедшие годы в области механики деформируемого твердого тела достигнуты значительные успехи. В данной монографии рассмотрены методы экспериментального исследования прочности, деформирования и разрушения твердых тел в характерных для современной техники условиях. Описаны образцы и оборудование для испытаний материалов в условиях линейного, плоского и объемного напряженных состояний при статическом, динамическом и циклическом нагружениях. Приведены типовые схемы экспериментальных установок с замкнутым контуром регулирования. Рассмотрены методы измерений и структурные схемы автоматизированных систем измерения и управления. Описаны конструкции камер, печей и криостатов для проведения испытаний в рабочих средах с заданными параметрами.

Для специалистов в области экспериментальных методов механики деформируемого твердого тела, а также для преподавателей, аспирантов и студентов вузов.

Перше видання монографії вийшло друком у 1986 р. За минулі роки у галузі механіки деформівного твердого тіла досягнуто значних успіхів. У цій монографії розглянуто методи експериментального дослідження міцності, деформування і руйнування твердих тіл за характерних для сучасної техніки умов. Описано зразки та обладнання для випробування матеріалів за умов лінійного, плоского та об'ємного напружених станів при статичному, динамічному і циклічному навантаженнях. Наведено типові схеми експериментальних установок із замкнутим контуром регулювання. Розглянуто методи вимірювання і структурні схеми автоматизованих систем вимірювання і керування. Описано конструкції камер, печей і криостатів для проведення випробувань у робочих середовищах із заданими параметрами.

Для фахівців у галузі експериментальних методів механіки деформівного твердого тіла, а також для викладачів, аспірантів і студентів вишів.

Р е ц е н з е н т ы :

доктор технических наук, профессор *А. Е. Бабенко*
доктор физико-математических наук, профессор *В. Г. Карнаухов*

*Рекомендовано к печати ученым советом
Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины
(протокол № 5 от 05.07.2016 г.)*

*Видання здійснено за кошти Цільової комплексної програми
« Створення та розвиток науково-видавничого комплексу
НАН України »*

Научно-издательский отдел физико-математической
и технической литературы

Редактор *В. В. Вероцкая*

© Г. С. Писаренко, В. А. Стрижало, 2018

© НПП «Видавництво «Наукова думка»
НАН України», дизайн, 2018

ISBN 978-966-00-1606-4

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ 1986 г.....	3
ПРЕДИСЛОВИЕ К ИЗДАНИЮ 2018 г.....	4
Г л а в а 1	
ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ МЕТОДОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ И РАЗРУШЕНИЯ ТВЕРДЫХ ТЕЛ	5
1.1. Макроэксперимент.....	5
1.2. Классификация экспериментальных методов	11
1.3. Планирование эксперимента.....	14
1.4. Системы с замкнутым контуром регулирования	19
1.5. Испытания на растяжение.....	21
1.6. Испытания на сжатие	40
1.7. Испытания на изгиб.....	44
1.8. Испытания на кручение.....	45
1.9. Определение ударной вязкости при изгибе	54
1.10. Испытания на ползучесть	57
1.11. Испытания на длительную прочность	62
1.12. Испытания на усталость (выносливость)	65
1.13. Определение характеристик упругости	81
1.14. Испытания при сложном напряженном состоянии	91
1.15. Определение характеристик трещиностойкости	105
1.16. Развитие трещин усталости.....	126
Г л а в а 2	
СИСТЕМЫ СИЛОНАГРУЖЕНИЯ УСТАНОВОК ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ	128
2.1. Классификация систем силонагружения.....	128
2.2. Машины для статических испытаний на кратковременную прочность	134
2.3. Системы замыкания с механическим и гидравлическим возбу- ждением нагрузок	135

Оглавление

2.4. Машины с механическим приводом.....	141
2.5. Машины с гидравлическими преобразователями.....	143
2.6. Машины с гидромеханическим приводом	150
Глава 3	
НАГРУЖАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ, ДЛИТЕЛЬНУЮ ПРОЧНОСТЬ И РЕЛАКСАЦИЮ НАПРЯЖЕНИЙ	152
3.1. Особенности испытаний при длительном статическом нагружении	152
3.2. Устройства для испытаний на ползучесть и длительную прочность.....	155
3.3. Устройства и установки для испытания на релаксацию напряжений	161
Глава 4	
УСТАНОВКИ И КОПРЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ПРИ ОДНОКРАТНОМ ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ	168
4.1. Особенности испытаний при динамическом нагружении	168
4.2. Установки с гидравлическими, пневматическими и магнитоимпульсными преобразователями	172
4.3. Маятниковые, ротационные и вертикальные копры	176
4.4. Пневмопороховые копры.....	184
Глава 5	
СИСТЕМЫ НАГРУЖЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ НА УСТАЛОСТЬ.....	189
5.1. Особенности испытаний на усталость.....	189
5.2. Машины с механическими возбудителями	193
5.3. Машины с инерционными возбудителями	198
5.4. Машины с гидравлическими преобразователями	203
5.5. Установки с пневматическими преобразователями.....	230
5.6. Установки с электромагнитными преобразователями	240
5.7. Установки с электродинамическими преобразователями	245
5.8. Установки с магнитострикционными преобразователями	249
5.9. Установки с пьезоэлектрическими преобразователями	252
Глава 6	
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ И НАПРЯЖЕНИЙ В МАКРОЭКСПЕРИМЕНТЕ.....	255
6.1. Методы измерений	255
6.2. Рентгенографические методы измерения деформаций.....	257
6.3. Поляризационно-оптические методы.....	258
6.4. Метод оптически чувствительных покрытий	264
6.5. Метод хрупких покрытий	269
6.6. Метод гальванических покрытий.....	273
6.7. Метод сеток	277
6.8. Метод линий скольжения.....	283
6.9. Метод муаровых полос	285

Оглавление

6.10. Метод голографической интерферометрии	297
6.11. Метод спекл-интерферометрии	302
6.12. Теневого оптического метода каустик	303
6.13. Метод термографии	304

Глава 7

СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА ПРЕОБРАЗОВАНИИ ДЕФОРМАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ С ПОМОЩЬЮ ТЕНЗОМЕТРОВ И ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ	307
7.1. Тензометры	307
7.1.1. Механические тензометры	307
7.1.2. Оптические тензометры	309
7.1.3. Струнные тензометры	310
7.1.4. Пневматические тензометры	312
7.1.5. Электрические тензометры.....	314
7.1.6. Потенциометрические преобразователи.....	315
7.1.7. Электролитические преобразователи.....	316
7.1.8. Мехатронные преобразователи	316
7.1.9. Тензорезисторы сопротивления	317
7.1.10. Емкостные преобразователи	318
7.1.11. Индуктивные преобразователи	321
7.1.12. Индукционные преобразователи	323
7.1.13. Пьезоэлектрические преобразователи	323
7.1.14. Магнитоупругие преобразователи	326
7.1.15. Трансформаторные преобразователи	327
7.2. Тензорезисторы сопротивления.....	329
7.2.1. Проволочные тензорезисторы	330
7.2.2. Фольговые тензорезисторы.....	337
7.2.3. Полупроводниковые тензорезисторы	338
7.2.4. Клеи и наклейка тензорезисторов	340
7.2.5. Тарировка тензорезисторов	341
7.3. Измерительные схемы	342
7.4. Температурная компенсация	345
7.5. Тензорезисторные преобразователи механических величин.....	348
7.5.1. Преобразователи перемещений	349
7.5.2. Преобразователи сил и крутящих моментов	351
7.5.3. Тензорезисторные преобразователи давления жидкостей и газов	353
7.6. Тензометрическая аппаратура	355

Глава 8

АВТОМАТИЗАЦИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	360
8.1. Автоматизация измерений	360
8.2. Автоматизация управления установками.....	370

Оглавление

Г л а в а 9	
ФОРМИРОВАНИЕ РАБОЧЕЙ СРЕДЫ И ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА В ЗОНЕ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ	377
9.1 Методы испытаний в агрессивных средах.....	377
9.2. Методы нагрева	379
9.2.1. Электрические печи сопротивления	380
9.2.2. Нагрев в отражательных печах	382
9.2.3. Индукционный нагрев	383
9.2.4. Электронно-лучевой нагрев.....	385
9.2.5. Электроконтактный нагрев	386
9.2.6. Плазменный нагрев	387
9.3. Камеры для испытаний при высокиих низких температурах	390
9.3.1. Термокамеры	390
9.3.2. Электрические печи	391
9.3.3. Электрические печи для испытаний в вакууме и среде инертного газа	392
9.3.4. Криокамеры и криостаты	395
9.4. Измерение температуры.....	401
9.4.1. Термоэлектрические преобразователи	401
9.4.2. Термопреобразователи сопротивления	403
9.4.3. Жидкостные термометры	404
9.4.4. Дилатометр	404
9.4.5. Пирометры	405
9.4.6. Приборы	408
Г л а в а 10	
ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА.....	410
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	422