

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ СЛОЖНЫХ  
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ  
ИССЛЕДОВАНИЯ  
СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ СЛОЖНЫХ  
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ  
ВОЗДЕЙСТВИЯХ**



МОСКВА  
ФИЗМАТЛИТ®  
2012

УДК 620.1  
ББК 22.251  
Э41

Авторский коллектив:  
Вильдеман В.Э., Третьяков М.П., Третьякова Т.В.,  
Бульбович Р.В., Словиков С.В., Бабушкин А.В.,  
Ильиных А.В., Лобанов Д.С., Ипатова А.В.

**Экспериментальные исследования свойств материалов при сложных термомеханических воздействиях** / Под ред. В.Э. Вильдемана. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012. — 204 с. — ISBN 978-5-9221-1374-8.

В монографии рассматриваются вопросы исследования механического поведения материалов с использованием современных электромеханических, электродинамических и сервогидравлических испытательных систем, средств контроля и измерений, цифровой оптической системы анализа полей деформаций. Представлены результаты исследований за критической стадии деформирования с построением полных равновесных диаграмм, масштабных эффектов разупрочнения и зависимостей условий макроразрушения от свойств нагружающих систем, механического поведения материалов в условиях квазистатического нагружения и дополнительных воздействий. Анализируются вопросы исследования характеристик циклической трещиностойкости и усталостной долговечности, а также динамического поведения вязкоупругих материалов.

Для научных сотрудников, инженеров, аспирантов и магистров, специализирующихся в области экспериментальной механики конструкционных материалов.

Подготовлено при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 гг.». Государственный контракт № 02.518.11.7135.

Р е ц е н з е н т ы:

Акад. РАН В.П. Матвеевко, член-корр. РАН Р.В. Гольдштейн.

ISBN 978-5-9221-1374-8

© ФИЗМАТЛИТ, 2012

© Коллектив авторов, 2012

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие . . . . .	6
<b>Глава 1. Испытательные системы для исследования деформационных и прочностных свойств материалов при квазистатических, динамических, циклических и сложных режимах нагружений в широком температурном диапазоне. . . . .</b>	<b>9</b>
1.1. Электромеханические и сервогидравлические испытательные системы . . . . .	9
1.2. Средства измерений усилий и перемещений. Бесконтактные оптические системы регистрации деформаций. . . . .	16
1.3. Исследования механического поведения материалов при термомеханических воздействиях . . . . .	23
1.4. Возможности современных испытательных систем и направления исследований свойств материалов . . . . .	32
<b>Глава 2. Анализ неоднородных полей перемещений и деформаций с использованием цифровой оптической системы . . . . .</b>	<b>35</b>
2.1. Оптический метод анализа полей деформаций . . . . .	35
2.2. Состав и принцип работы цифровой оптической системы . . . . .	36
2.3. Исследование полей перемещений и деформаций в областях концентрации напряжений и определение условий разрушения. . . . .	39
2.4. Использование цифровой оптической системы для исследования процессов развития зон повреждений . . . . .	42
<b>Глава 3. Закрытая стадия деформирования материалов и нелокальность условий разрушения . . . . .</b>	<b>47</b>
3.1. Исследование закрытой стадии деформирования с построением полных равновесных диаграмм и уточненный прочностный анализ ответственных конструкций. . . . .	47
3.2. Нелокальность критерия предельного состояния как условия потери устойчивости деформирования на стадии разупрочнения. Зависимость условий разрушения от свойств нагружающей системы . . . . .	50

3.3. Реализация закритической стадии деформирования при испытаниях образцов различной длины. Обработка экспериментальных данных в условиях локализации деформаций на стадиях упругопластического и закритического деформирования . . . . .	56
3.4. Экспериментальное исследование зависимости предельных состояний от жесткости нагружающей системы . . . . .	69
3.5. Исследование процессов закритического деформирования при пропорциональном деформировании в условиях растяжения и кручения	76
3.6. Анализ условий разрушения как потери устойчивости закритического деформирования в рабочей зоне образца специальной усложненной конфигурации . . . . .	78
3.7. Исследование закритической стадии деформирования с использованием образцов специальной усложненной конфигурации . . . . .	86
<b>Глава 4. Масштабный эффект разупрочнения материалов . . . . .</b>	<b>96</b>
4.1. Математические модели процессов деформирования и разрушения структурно-неоднородных тел . . . . .	96
4.2. Масштабный эффект разупрочнения структурно-неоднородных сред	97
4.3. Экспериментальная проверка гипотезы о существовании масштабного эффекта на стадии разупрочнения материалов . . . . .	107
<b>Глава 5. Механическое поведение материалов в условиях квазистатического нагружения и дополнительных воздействий . . . . .</b>	<b>112</b>
5.1. Исследование закономерностей деформирования материалов при сложном напряженном состоянии и сложном нагружении . . . . .	112
5.2. Реализация сложных нестационарных режимов нагружения с использованием специализированной испытательной двухосевой системы . . . . .	114
5.3. Влияние дополнительных вибрационных воздействий на реализацию ресурса пластического деформирования при двухосном нагружении . . . . .	117
5.4. Влияние предварительного циклического нагружения на реализацию ресурса пластического деформирования . . . . .	126
5.5. Реализация динамических воздействий в процессе квазистатических испытаний . . . . .	133
<b>Глава 6. Определение характеристик циклической трещиностойкости и усталостной долговечности . . . . .</b>	<b>145</b>
6.1. Экспериментальные данные о механизмах развития трещин при сложных режимах нагружения . . . . .	145
6.2. Характеристики малоциклового усталости при переменных параметрах цикла . . . . .	154
6.3. Экспериментальное определение характеристик циклической трещиностойкости . . . . .	161

---

6.4. Анализ закономерностей и критерии разрушения при циклических нагружениях с постоянными и переменными параметрами цикла . . .	167
<b>Глава 7. Исследование динамического поведения вязкоупругих материалов . . . . .</b>	<b>170</b>
7.1. Вопросы исследования вязкоупругих свойств материалов . . . . .	170
7.2. Проведение динамических испытаний с использованием электродинамической испытательной машины . . . . .	172
7.3. Методика определения динамических свойств вязкоупругих материалов и их представление в форме комплексных операторов . . . . .	174
7.4. Влияние параметров нагружения на динамическое поведение вязкоупругих материалов . . . . .	184
7.5. Методика идентификации динамических характеристик вязкоупругих материалов в форме комплексных операторов . . . . .	189
Список литературы . . . . .	198

## Предисловие

В монографии представлены результаты исследований, направленных на развитие методологии комплексных экспериментов с использованием современных испытательных и измерительных систем, создание научных основ решения проблем прочности и конструкционной безопасности в результате получения новых знаний о закономерностях процессов неупругого деформирования и формирования условий макроразрушения при сложных механических воздействиях, исследования возможностей обеспечения условий устойчивости закритического деформирования и реализации деформационных резервов материалов.

Приведено описание и анализ возможностей современных электромеханических, электродинамических и сервогидравлических испытательных систем, средств контроля и измерений, дополнительного оборудования для термомеханического нагружения. Проанализированы некоторые актуальные направления исследований свойств конструкционных материалов.

Описаны основы оптического метода анализа полей деформаций — метода корреляции цифровых изображений, состав и принцип работы цифровой оптической системы. Представлены результаты, иллюстрирующие закономерности эволюции неоднородных полей деформаций, эстафетный механизм деформирования на стадии формирования зуба текучести, а также явления локализации деформаций и упругой разгрузки на стадии закритического деформирования, экспериментальные данные по построению полей перемещений и деформаций для тел с различной конфигурацией концентраторов в условиях плоского напряженного состояния.

Получены новые экспериментальные данные о закритической стадии деформирования материалов, включающие полные диаграммы деформирования при активном квазистатическом нагружении и разгрузке. Дано теоретическое и экспериментальное обоснование нелокального критерия предельного состояния материала как условия потери устойчивости закритического деформирования, связанного со свойствами нагружающих систем. В результате экспериментальных исследований, выполненных с использованием образцов различной геометрии, продемонстрировано влияние жесткости нагружающей системы на предельное состояние материала.

Рассмотрены вопросы экспериментальных исследований условий реализации закритической стадии деформирования материалов с учетом свойств нагружающих систем, управление которыми осуществляется за счет использования плоских опытных образцов специальной усложненной геометрии. Получены условия устойчивости закритического деформирования, анализ которых позволяет прогнозировать момент разрушения при частичной реализации закритической стадии деформирования в рабочей зоне образца. С использованием цифровой оптической системы получены результаты экспериментальных исследований закритической стадии деформирования на плоских образцах специальной усложненной конфигурации.

Получены результаты математического моделирования процессов закритического деформирования и экспериментальные данные, согласующиеся с гипотезой существования масштабного эффекта на стадии разупрочнения.

Представлены результаты исследования влияния предварительного циклического нагружения, дополнительных вибрационных, а также динамических и сложных нестационарных воздействий на реализацию ресурса пластического деформирования в ходе квазистатических испытаний. Продемонстрировано, что дополнительные вибрационные воздействия в ходе квазистатических испытаний в отдельных случаях могут оказывать стабилизирующее влияние на рост трещин, а также при определенной их интенсивности приводить к существенным изменениям в механизмах роста трещины и снижению максимальных усилий и предельных перемещений при разрушении образца.

Анализируются вопросы проведения испытаний материалов при циклических воздействиях в условиях нормальных и высоких температур с целью изучения характеристик сопротивления малоциклового усталости и усталостной трещиностойкости, получения данных и обоснования критериев разрушения при режимах нагружения с переменными параметрами.

Проанализированы методики и представлены результаты экспериментальных исследований динамических деформационных свойств вязкоупругих полимерных материалов и решения задач идентификации параметров математических моделей.

В монографии отражены результаты работ, проведенных в Центре экспериментальной механики Пермского национального исследовательского политехнического университета в рамках выполнения проекта по ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007–2012 годы» (государственный контракт № 02.518.11.7135). Авторы выражают благодарность Министерству образования и науки Российской Федерации за финансовую поддержку работы.

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность профессорам В.Ю. Петрову и А.А. Ташкинову, сыгравшим определяющую роль в создании Центра экспериментальной механики, профессорам Ю.В. Соколкину за неизменную поддержку работы и М.Ш. Нихамкину за плодотворное сотрудничество.

Авторы высоко ценят поддержку академика РАН В.П. Матвеевко и члена-корреспондента РАН Р.В. Гольдштейна и выражают им свою искреннюю благодарность.

Авторы также благодарят представителей компаний «Instron» Б. Рендлеса и «Новатест» В.В. Герова, П.В. Меркулова и Ю.В. Исайченко за многократные консультации и помощь в обеспечении работы испытательного оборудования.

**ИСПЫТАТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ  
ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФОРМАЦИОННЫХ  
И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКИХ, ДИНАМИЧЕСКИХ,  
ЦИКЛИЧЕСКИХ И СЛОЖНЫХ РЕЖИМАХ  
НАГРУЖЕНИЙ В ШИРОКОМ ТЕМПЕРАТУРНОМ  
ДИАПАЗОНЕ**

**1.1. Электромеханические и сервогидравлические  
испытательные системы**

Электромеханические и сервогидравлические испытательные системы позволяют проводить экспериментальные исследования закономерностей процессов деформирования и разрушения различных конструкционных и функциональных материалов в широком диапазоне скоростей нагружения, в условиях реализации сложных нестационарных режимов температурно-силового нагружения.

На рис. 1.1 представлен состав универсальной электромеханической испытательной системы Instron 5882. Данная установка предназначена для квазистатических испытаний при растяжении, сжатии, изгибе с нагрузкой до 100 кН и скоростью нагружения от 0,001 до 500 мм/мин; допустимы ограниченные циклические испытания с частотой до 10 Гц. Наличие климатической камеры делает возможным проведение термомеханических испытаний при нормальных, повышенных (до +350 °С) и пониженных (до –100 °С) температурах. Также данная испытательная система может быть оснащена бесконтактным видео-экстензометром AVE.

Управление испытательной системой осуществляется специализированным программным обеспечением, на основе которого производится настройка параметров испытания, сбор и анализ данных испытаний.

На рис. 1.2 представлена электродинамическая испытательная система ElectroPuls E3000, предназначенная для изучения эффектов динамического поведения материалов, обеспечивающих высокие скорости нагружения и большие частоты. В ее основе находится бесщеточный

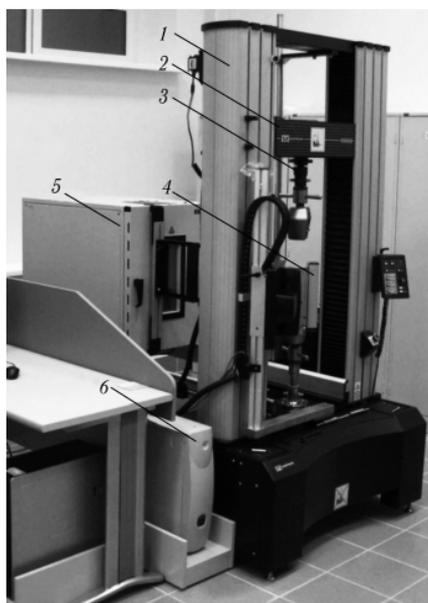


Рис. 1.1. Электромеханическая испытательная система Instron 5882: 1 — двухколонная нагружающая рама 100 кН; 2 — подвижная траверса; 3 — датчик нагрузки; 4 — видео-экстензометр AVE; 5 — климатическая камера Instron 3119-406 с контроллером Eurotherm 2408; 6 — контроллер сбора и обработки экспериментальных данных FastTrack 8800

линейный электропривод для создания нагрузок с высокими скоростями. Исполнительный механизм использует магнитную и электромагнитную силу для приложения нагрузки и перемещения к образцу. В состав системы входит двухколонная силовая рама E3000 с датчиком силы, датчиком положения и контроллера сбора и обработки экспериментальных данных.

Испытательная система ElectroPuls E3000 позволяет проводить статические испытания на растяжение, сжатие и изгиб с нагрузкой до 2,1 кН и динамические испытания с максимальной нагрузкой 3 кН в широком диапазоне скоростей нагружения (от 0,05 мм/мин до 200 мм/с); усталостные испытания с различной формой волны с частотой до 200 Гц; испытания с произвольно заданным законом кинематического или силового нагружения, смешанным режимом нагружения.

Статические малоскоростные (со скоростью до 500 мм/мин) испытания проводятся под управлением программного обеспечения Bluehill 2



Рис. 1.2. Универсальная электродинамическая испытательная система ElectroPuls E3000

(рис. 1.3). Динамические испытания могут проводиться с использованием программного обеспечения WaveMatrix (рис. 1.4).

Сервогидравлическая испытательная система Instron 8801 ориентирована на проведение статических испытаний на растяжение, сжатие и изгиб с максимальной нагрузкой 100 кН, усталостных испытаний с различной формой волны с частотой до 30 Гц, испытаний с произвольно заданным законом кинематического, силового или смешанного режима нагружения. Данная установка позволяет имитировать реальные режимы эксплуатации материалов. На рис. 1.5 представлен состав испытательной системы Instron 8801.

Контроллер FastTrack 8800 обладает автоматической электронной системой защиты образца и оператора, оснащен платами управления и сбора данных для датчиков нагрузки и перемещения, обладает возможностями управления формой волны для циклических испытаний.



Рис. 1.3. Диалоговое окно программного обеспечения Bluehill 2



Рис. 1.4. Диалоговое окно программного комплекса WaveMatrix

Управляющий 32-битный контроллер обладает частотой одновременного сбора данных 40 кГц и обработки данных по всем каналам 5 кГц. Система адаптивного контроля для постоянной автоматической настройки PID-параметров с частотой 1 кГц автоматически компенсирует потери жесткости образца в процессе испытания.

Методики проведения экспериментов на одноосное растяжение, чистое кручение, растяжение с кручением при квазистатических и циклических нагружениях с частотой до 30 Гц позволяет реализовать универсальная двухосевая сервогидравлическая испытательная система Instron 8850, представленная на рис. 1.6.

Погрешность регистрируемых данных по нагрузке  $\pm 0,5\%$  отображаемой нагрузки или  $\pm 0,005\%$  диапазона датчика силы (по большему значению). Погрешность по положению (осевому и вращательному)  $\pm 0,5\%$  от полного хода. Установка оборудована линейным исполнительным механизмом, обеспечивающим осевое перемещение привода и поворотным исполнительным механизмом для вращения.

Нагрузка (или перемещения) в осевом направлении и крутящий момент (или угол закручивания) могут задаваться независимо друг от друга. Нагружение может быть задано как в виде простых траекторий, так и в виде сложных законов.



Рис. 1.5. Сервогидравлическая испытательная система Instron 8801: 1 — двухколонная высокоточная рама со встроенными гидравлическими подъемниками верхней траверсы; 2 — электронный датчик нагрузки Dupacell; 3 — 3-зонная высокотемпературная печь SF 1770; 4 — 3-зонный контроллер печи SFL; 5 — контроллер сбора и обработки экспериментальных данных FastTrack 8800

В нижней части силовой рамы на столе установлен двухосевой датчик, позволяющий отслеживать осевые усилия и крутящий момент. Допустимая нагрузка на датчик 160 кН/1000 Нм.

Управление испытательной машиной осуществляется посредством контроллера. Контроллер содержит две платы управления, по одной для каждой оси, модули регистрации и модули обработки данных для каждого датчика испытательной системы. Для использования в системе дополнительных датчиков, например экстензометров, контроллер оборудован дополнительными модулями обработки данных. Контроллер имеет стандартный компьютерный интерфейс и позволяет выполнять полное управление испытательным оборудованием и сопутствующими устройствами и дает возможность регистрации и анализа экспериментальных данных на внешнем компьютере.

Включение испытательной машины, настройка и калибровка датчиков и экстензометров, настройка параметров работы датчиков обратной связи выполняется с помощью компьютера посредством программы Console. Данная программа позволяет устанавливать все основные параметры испытательной системы, необходимые для защиты оборудования, образца и оператора машины, такие как действие машины при нажатии кнопки аварийного останова, ограничения диапазона датчиков, предельное усилие на образце при его установке. Программа

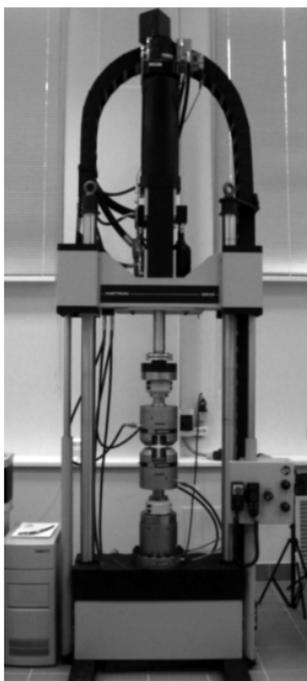


Рис. 1.6. Универсальная двухосевая сервогидравлическая испытательная система Instron 8850

Console позволяет изменять положение захватов и задавать простую форму волны для прогрева рабочей жидкости в испытательной системе, настраивать параметры обратной связи.

Настройка параметров испытания, проведение и отслеживание эксперимента, а также регистрация данных осуществляется посредством программы WaveMatrix. Программное обеспечение WaveMatrix дает пользователю возможность настраивать метод испытания, запускать испытания по заданному методу и собирать данные для широкого ряда динамических и квазистатических испытаний материалов. Программное обеспечение позволяет проводить как простые эксперименты, такие как одноосное растяжение, так и более сложные испытания материалов в условиях сложного напряженного состояния при растяжении с кручением.

При создании метода испытания весь процесс нагружения образца можно разделить на большое количество шагов в соответствии с рис. 1.7.

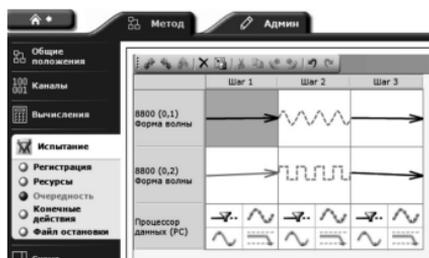


Рис. 1.7. Пошаговое задание метода испытания

На каждом шаге можно задавать индивидуальную форму сигнала для каждой оси. На любом шаге нагружение может быть задано управлением по положению, нагрузке или деформации, полученной как по измерениям встроенных датчиков, так и по данным экстензометра. Переход от одного шага к другому возможно задавать в виде условия, например достижения значения нагрузки, перемещения, деформации или времени. Простое пошаговое создание метода испытаний позволяет обеспечить полный контроль над формой волны, методом управления испытанием, сбором данных и процессом испытания. Программное обеспечение позволяет управлять скоростью опроса данных в процессе испытания, что может увеличивать точность требуемых результатов, при этом минимизировать размер файла выборки.

Программа WaveMatrix позволяет настраивать рабочее окно, которое может отражать в реальном времени до четырех графиков слежения за процессом испытания, добавлять индикаторы процесса и состояния, полностью отражающие ход испытания. Результаты испытаний автоматически группируются в логическую структуру, что способствует быстрому доступу к файлам данных.

Программа обеспечивает поддержку до шести встроенных карт управления осями нагружения, возможен сбор данных максимум по 24 каналам, в том числе с температурных контроллеров.

Таким образом, специализированное программное обеспечение максимально облегчает работу оператора, связанную с настройкой машины, заменой и калибровкой датчиков и экстензометров, позволяет минимизировать погрешности при измерении параметров испытаний, расширяет возможности создания программ нагружения, проведения испытаний и контроля процесса испытания.

## 1.2. Средства измерений усилий и перемещений. Бесконтактные оптические системы регистрации деформаций

При исследовании механических характеристик материалов в процессе испытания используются специализированные датчики для регистрации усилий и перемещений. Ведущие мировые производители экспериментального оборудования обеспечивают создание датчиков усилий, перемещений и экстензометров широкой номенклатуры.

Датчики нагрузок устанавливаются в кинематическую цепь последовательно с испытываемым образцом. Внешний вид датчиков силы Instron серии 2525 — *а* и 2527 — *б* представлен на рис. 1.8.



Рис. 1.8. Датчики силы Instron серии 2525 (*а*) и 2527 (*б*)

Основная конструктивная составляющая датчиков силы — это упругий элемент, который деформируется в результате приложенной к датчику нагрузки. Величину деформации упругого элемента регистрируют наклеенные на него тензорезисторы. Тензорезисторы соединены в мостовую схему, что способствует более точному определению показаний и минимизации влияния температуры окружающей среды. Изменение электрического напряжения при изменении действующей нагрузки регистрируется контроллером. Установление соответствия уровня напряжения действующей нагрузке осуществляется процедурой тарировки датчиков. Одни из основных характеристик датчиков силы — это диапазон рабочих нагрузок (номинал датчика), в пределах которого деформация упругого элемента пропорциональна действующей нагрузке, и величина погрешности регистрируемых данных.

Существуют датчики, предназначенные для регистрации осевой нагрузки, крутящего момента и датчики для одновременной регистрации осевой нагрузки и крутящего момента, используемые в двухосевых испытательных системах.

Во время усталостных испытаний с высокой частотой на сервогидравлических машинах подвижные элементы системы испытывают ускорение. В результате чего в дополнение к силе, прикладываемой к образцу, датчик нагрузки также регистрирует силу, возникшую при движении захватов и установленных приспособлений. Для минимизации ошибок, связанных с наличием инерционных сил, в таких испытательных системах используются датчики, в частности датчики Dupacell, имеющие в своей конструкции акселерометр, установленный непосредственно на оси нагружения. Датчики нагрузки Dupacell характеризуются погрешностью измерения нагрузки не более 0,5%.

Большинство испытательных систем имеют в конструкции встроенные линейные датчики перемещений, выполненные на основе дифференциального трансформатора (LVDT-датчики), установленные на линейном исполнительном механизме. Двухосевые испытательные системы оснащены также встроенными датчиками вращения на основе вращающихся индукционных преобразователей (RVIT-датчики), установленных на валу поворотного исполнительного механизма. Встроенные датчики положения необходимы для управления и настройки испытательных систем.

При использовании данных со встроенных датчиков имеет место погрешность, связанная с жесткостью нагружающей системы. В связи с этим в исследованиях механических характеристик, зависимостей и закономерностей поведения материалов используются дополнительные датчики перемещений — экстензометры. Преимущество экстензометров заключается в том, что перемещения измеряются непосредственно на поверхности рабочей части образца и в высокой точности измерений.

Принцип действия экстензометров основан на регистрации деформировании упругого элемента при перемещении ножек датчика с использованием тензорезисторов. Экстензометры имеют различную конструкцию и предназначены для измерения таких величин, как осевая деформация, поперечная деформация, угол сдвига, величина раскрытия трещины.

В качестве примера на рис. 1.9 приведен экстензометр для измерения осевой деформации в испытаниях на усталость — *а* и двухосевой экстензометр для измерения осевой и сдвиговой деформации при растяжении с кручением — *б*.

На рис. 1.10 приведены экстензометры для измерения поперечной деформации плоских и цилиндрических образцов.

При проведении исследований в муфельных печах при высоких температурах применяются специализированные высокотемпературные экстензометры. В качестве примера на рис. 1.11 представлен высокотемпературный экстензометр для измерения величины раскрытия трещины.

Конструктивные особенности таких экстензометров (водяное охлаждение корпуса) и применение стеклянных и керамических ножек



Рис. 1.9. Динамический экстензометр для регистрации осевой деформации (а) и двухосевой экстензометр для измерения осевой и сдвиговой деформации (б)



Рис. 1.10. Экстензометры для измерения поперечной деформации

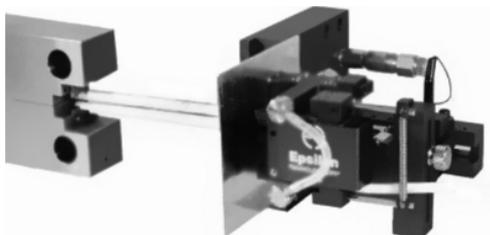


Рис. 1.11. Высокотемпературный экстензометр измерения величины раскрытия трещины

позволяют вывести корпус датчика за пределы печи. В результате чего минимизируется воздействие высоких температур на упругие элементы датчиков и тензорезисторов и обеспечивается надежная работа экстензометров.

Для минимизации погрешности результатов при использовании данных, полученных со встроенного датчика, в специализированном программном обеспечении предусмотрена возможность корректировки положения захватов с учетом жесткости машины. Это производится путем вычитания из перемещения, регистрируемого датчиком, перемещения, вызванного упругой деформацией частей испытательной машины.

Для оценки различия данных, полученных со встроенного датчика, с экстензометра и скорректированных с учетом жесткости испытательной машины, приведены диаграммы деформирования сплава Д16Т на начальном участке в соответствии с рис. 1.12, где особенно заметно влияние жесткости испытательной машины.

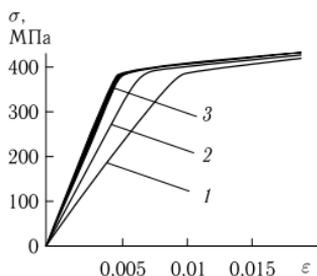


Рис. 1.12. Диаграммы деформирования сплава Д16Т: построенные по встроенному датчику (1), с учетом жесткости (2) и по экстензометру (3)

Диаграмма (1) построена по данным встроенного датчика. Диаграмма (2) построена по данным, полученным со встроенного датчика с учетом корректировки жесткости испытательной машины. Диаграмма (3) построена по данным экстензометра. Недостаточная жесткость испытательной машины может оказывать существенное влияние на определение механических характеристик. Диаграмма деформирования, построенная с учетом жесткости испытательной машины, приближена к диаграмме, построенной по данным экстензометра, но не совпадает с ней.

Влияние крутильной жесткости нагружающей системы проявляется также в эксперименте на кручение, что проиллюстрировано на рис. 1.13.

Анализ полученных данных показывает, что при проведении механических экспериментов предпочтительно использовать навесной экстензометр. В ряде случаев использование экстензометра затруднено или невозможно, например, при испытании образцов с малой длиной рабочей части, использовании дополнительного оборудования (температурных камер, печей и т. д.) или приспособлений, а также в случае опасности повреждения устройства при разрушении образца.