

УДК 531.715.27

Локощенко А.М., Терауд В.В.

НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, г. Москва, Россия

МЕТОД РЕГИСТРАЦИИ И ИЗМЕРЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ НА ОСНОВЕ ФОТОАППАРАТА

Высокотемпературные механические испытания связаны с большой сложностью их проведения. При температурах испытаний свыше 200-300 °С резко возрастает сложность измерения параметров в процессе экспериментов. Причина этому – резкое сокращение типов доступных датчиков, часто измерения приходится проводить косвенными методами. С помощью предлагаемого метода бесконтактного измерения возможно одновременное получение большого количества доступных для измерения параметров. Испытываемый образец предварительно покрывается мерной сеткой и затем помещается в печь. Через смотровое окно в момент испытаний производится фотосъемка образца. Получаемые изображения анализируются, и по мерной сетке восстанавливаются значения измеряемых параметров. Процесс измерения проводится с использованием компьютерного анализа полученных данных.

Ключевые слова: бесконтактные измерения, высокая температура, локализация деформации, разрушение.

Введение

Целью проведения любого эксперимента является проверка теоретической модели поведения реального процесса. При высокотемпературных испытаниях возникает множество проблем, вызванных невозможностью проведения прямых измерений параметров в эксперименте, при этом значительно снижается возможность использования датчиков, большинство из которых не рассчитаны на высокую рабочую температуру. Из контактных измерений наиболее эффективны выносные керамические тензометры, обеспечивающие высокую точность измерений [1]. Но на основе этих датчиков и подобных им возможно измерять всего один или два параметра в процессе эксперимента. Широкое распространение в таких случаях приобрели бесконтактные системы измерения на основе пирометра и катетометра. Метод SPATE [2] был разработан для бесконтактного измерения напряжений. Этот метод основан на измерении малых изменений температуры инфракрасного излучения, которые сопровождают изменения напряжений. Измерение большого количества параметров в процессе высокотемпературного эксперимента представляет очень большую сложность и практически никогда не применяется, что не лучшим образом сказывается на сравнительном анализе с проверяемой теорией. Разработка системы, позволяющей в несколько раз повысить количество измеряемых во время эксперимента параметров, позволит значительно повысить достоверность сравнительного анализа с теоретическими расчетами.

© Локощенко А.М., Терауд В.В., 2012

В основу измерений был положен бесконтактный принцип измерений геометрических параметров. Геометрия образца восстанавливалась по реперным линиям, нанесенным на образец до эксперимента.

Разработанная система состоит из четырех основных частей:

- специальной печи,
- подготовленного образца,
- регистрирующего устройства,
- компьютерного комплекса.

Тестовыми задачами для проверки разработанной системы измерения стали две следующие: осадка цилиндра и одноосное растяжение образца.

1. Осадка цилиндра

Осадка сплошного цилиндра высотой H_0 и радиусом R_0 проводилась с помощью двух плит, движущихся навстречу друг другу с взаимной скоростью $2w$ вдоль продольной оси z . За время t_1 при температуре T цилиндр осаживался до величины высоты цилиндра H_1 .

1.1. Образец

Перед испытаниями необходимо провести специальную предварительную подготовку образца. Основным этапом подготовки образца является нанесение реперных линий, по которым в дальнейшем будет производиться восстановление геометрии. Для повышения точности нанесения и облегчения процесса распознавания реперных линий, поверхность образца, на которую предполагается нанесение реперных линий, предварительно шлифовалась и полировалась. Реперные линии наносились механическим образом.

В качестве наносимых реперных линий была выбрана прямоугольная сетка линий, пересечения которых рассматривались как реперные точки. Изображение испытываемого образца с нанесенными реперными точками показано на рис. 1.

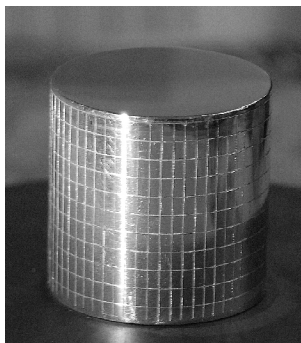


Рис. 1. Подготовленный цилиндр

1.2 Регистрирующее устройство

К регистрирующему устройству предъявляются особые требования, от качества получаемого изображения зависит разрешающая способность производимых измерений. Был произведен анализ требований к регистрирующей матрице и оптической системе. Требования к регистрирующей матрице:

1. Высокая разрешающая способность матрицы. Например, для получения разрешения 0.1 мм на образце, занимающем 1/3 от кадра, необходимо, чтобы разрешение матрицы было не ниже 6 Мегапикселей.

2. Съемка с точным интервалом времени.

Требования к оптической системе:

1. Слабые геометрические искажения. В них включаются дисторсия, кома и т. п.

2. Высокая разрешающая способность оптики. Очевидно, что от того, насколько четко будут регистрироваться реперные линии, зависит разрешающая способность системы.

3. Высокая глубина резкости. Образец в процессе эксперимента смещается из плоскости фокусировки, что не должно сказываться на четкости получаемых снимков. Поэтому либо фокусировка должна производиться при каждом кадре, либо глубина резкости должна быть высокой. Проведение фокусировки при каждом кадре может привести к непредсказуемым задержкам, поэтому от нее было решено отказаться.

4. Точный подбор фокусного расстояния. Для получения максимальной разрешающей способности изображение образца в кадре должно быть максимально возможного размера. Для этого необходимо подобрать соответствующее фокусное расстояние. Следует отметить, что вследствие неидеальности оптических систем изобра-

жение на периферии кадра имеет дополнительные искажения, которые следует учитывать при компоновке кадра. Наиболее простой путь в подборе фокусного расстояния — это использование вариофокального объектива.

В связи с вышеизложенным было подобрано следующее оборудование, удовлетворяющее этим требованиям:

- фотоаппарат NIKON D200, D300 или D3;

- объектив NIKKOR 80-200mm f/2.8D AF или AF-S с удлинительными кольцами.

1.3 Программное обеспечение

Для перевода сфотографированных изображений образца в числовую геометрию и для последующих вычислений различных параметров был написан пакет программ. Пакет программ состоит из двух основных частей: вычислителя и постобработчика. Окно программы изображено на рис. 2.

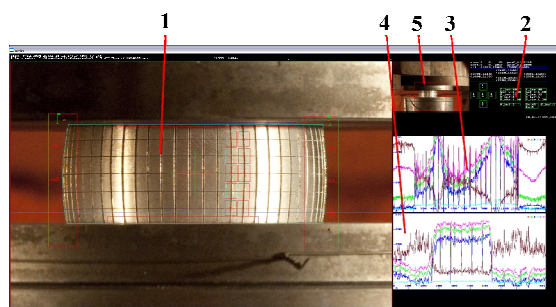


Рис. 2. Окно программы

1 — основное изображение цилиндра (увеличенное), 2 — меню параметров настройки, 3 — графики цветности (красный, зеленый, синий) и яркости (яркость, контрастность, цветность) выбранного горизонтального сечения, 4 — график выбранного вертикального сечения (аналогично 3), 5 — миниатюра всего кадра

С помощью вычислителя решается задача перевода изображения из графической формы (фотография) в числовую форму с вычислением необходимых параметров. Для этого производятся последовательно два действия: распознавание реперных линий, границ образца и вычисление необходимых параметров. Для уточнения распознавания предусмотрен модуль автоматического распознавания реперных точек. Если автоматический модуль некорректно распознает изображение, то пользователю необходимо распознать изображение самостоятельно и нанести реперные точки при помощи ручного модуля редактирования. Модуль ручного редактирования позволяет при помощи мыши нанести реперные линии на изображения, после чего с помощью разработанной программы рассчитать геометрию образца.

Процесс перевода распознанных реперных точек из графической в численную форму происходит следующим образом: задается координ-

натная система на кадре фотографии, связанная с верхним левым углом фотографии. На каждом кадре реперные линии привязываются к этой координатной системе. Вычисляются координаты точек пересечения реперных линий – это будущий базис точек для вычисления кинематики деформирования. Вводится вторая прямоугольная координатная система, связанная с образцом, для определенности и удобства использования координата $(0, 0)$ соответствует середине образца по высоте на его поверхности. Координаты реперных точек из первой координатной системы пересчитываются во вторую при помощи калибровочной таблицы. Данная таблица составляется перед экспериментом. Следует отметить, что образец и соответственно реперные линии расположены не в одной плоскости, а на искривленной поверхности образца, в то время как фотография содержит их изображение в одной плоскости, что учитывается при вычислении координат реперных точек в координатной системе, связанной с образцом.

С помощью постобработчика проводится визуализация всех вычисленных параметров в двумерной форме. Имеется возможность изображать зависимости различных параметров от времени t и осевой координаты образца z , например, изменение высоты осаживаемого цилиндра с течением времени показано на рис. 2. Некоторые параметры имеется возможность изображать в виде полей на графическом изображении образца.

1.4 Печь

Разработанный метод измерения подразумевает прямой визуальный доступ к испытываемому образцу. Некоторые печи имеют такие визуальные окна. Для испытаний была использована большая высокотемпературная печь ZDMXH-30t, находящаяся в НИИ механики МГУ. Отверстия для визуального доступа у нее нет, поэтому было решено его изготовить.

В результате анализа размеров испытываемых цилиндров был выбран размер рабочей области в печи 120·120 мм, что требовало иметь в стене печи отверстие в виде усеченного конуса 80·100·300 мм (предполагается, что фокусное расстояние от образца до регистрирующего устройства составляет 1 м).

В результате большой подготовительной работы был изготовлен кирпич с отверстием нужных размеров, который затем был помещен в стенку печи. Для исключения проникания холодного воздуха внутрь печи через изготовленное отверстие, с наружной и внутренней сторон печи отверстие закрывалось кварцевыми стеклами.

1.5 Проведение эксперимента

Перед экспериментом на место образца помещалась клетчатая таблица, устанавливался штатив с фотоаппаратом, настраивались параметры съемки. Производилось фотографирование нескольких кадров таблицы, по которым в дальнейшем производилась калибровка вычислителя. Положение штатива и параметров съемки фиксировалось и оставалось неизменным во время всего эксперимента.

Базовая система освещения показала недостаточное освещение образца. Поэтому от подобной системы освещения было решено отказаться. В дальнейшем внутри печи была укреплена кварцевая лампа на керамических держателях. Электрический ток подводился нихромовой проволокой. Было получено превосходное освещение образца в процессе эксперимента при помощи регулировки яркости лампы и ее положения.

Перед началом эксперимента фотоаппарат и система измерения на прессе синхронизировались. Подготовленный образец помещался в печь, нагревался до заданной температуры и выдерживался при этой температуре около 1 часа. В проведенных экспериментах осадка цилиндра происходила при постоянной нагрузке P_0 при температуре $T = 400$ °С. Использовались цилиндры размерами 39·39 мм, с нанесенной прямоугольной сеткой 3.4·1.2 мм. Параметры деформирования следующие: $P_0 = 60$ кН и 70 кН, средняя длительность процесса осадки $t_1 = 700$ сек.

1.6 Результаты

Точность полученных данных в проведенном эксперименте составила около 0.2 мм. Разработанная система позволяет получать оптический доступ к цилиндру, в связи с этим можно видеть процесс деформирования цилиндра и записывать видео-процесс для дальнейшего просмотра. Для каждого эксперимента имеется возможность создавать видео-файл. Видео-файл может содержать стандартный процесс деформирования и использовать дополнительную реальность в виде цветного подкрашивания образца в соответствии с деформациями или действующими напряжениями.

Была проведена серия экспериментов, в процессе каждого были измерены 300 - 700 интервалов по времени, в каждом из которых измерялась геометрия образца по 50-100 точкам. Были получены различные параметры образца, изменяющиеся во времени. На рис. 3 приведена экспериментальная зависимость высоты цилиндра от времени $H(t)$. В результате анализа полей перемещений были получены значения характеристик тензоров деформаций и скоростей деформаций на поверхности образца.

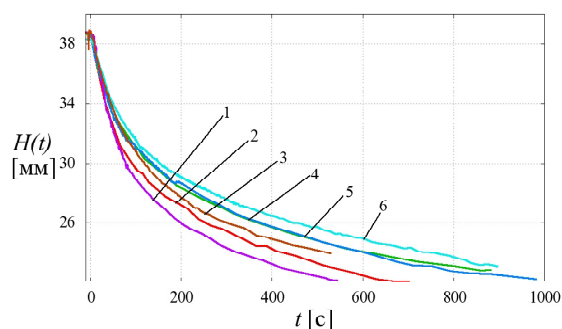


Рис. 3. Зависимость высоты от времени

В работе [3] авторами были проведены экспериментально-теоретические работы по исследованию осадки цилиндров. Анализ испытанных цилиндров выявил наличие на их торцах, контактирующих с плитами пресса, двух зон: центральной и периферийной, имеющей концентрические кольца. Оказалось, что осадка цилиндра образца в поперечном сечении происходит в основном за счет расширения центральной части образца, в то время как вблизи торцов образца происходит активное перетекание материала с боковой поверхности на контактную. С учетом этого образования концентрических колец на торце цилиндра объясняется перетеканием материала с боковой поверхности на контактную. Боковая поверхность, в отличие от шлифованной торцевой, не шлифовалась до эксперимента.

2. Одноосное растяжение образца

Производится растяжение цилиндрического образца длиной l_0 и диаметром d_0 постоянной во времени силой P_0 . Использовался образец с диаметром 4 мм и длиной рабочей части 25 мм. Параметры деформирования следующие: $P_0 = 500$ Н, длительность до разрушения $t_1 = 1985$ сек.

Так как структура растягиваемых образцов неоднородна, то вблизи самого слабого сечения наблюдается повышенное деформирование (локальная деформация) и как следствие — повышенное напряжение. На рис. 4 изображены фотографии образца при продольном растяжении для времени $t = 0$ сек — недеформированное состояние и $t = 1981$ сек — за 4 сек до разрушения. Данные

фотографии изображены с дополнительной реальностью в виде цветов, соответствующих действующему напряжению в поперечном сечении. Эпюры осевых напряжений по длине образца в виде графика изображены рядом. Повышение действующего напряжения в образце хорошо видно в месте локализации, развитие которой приводит к разрушению. Область повышенного напряжения достаточно широкая относительно среднего по образцу. Перед разрушением она соответствует 30% от длины образца, то есть локализация деформации затрагивает большую часть образца.

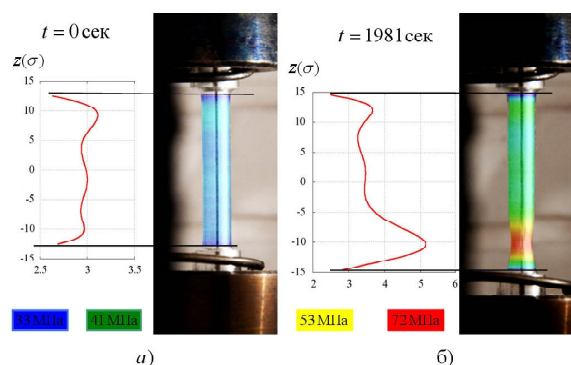


Рис. 4.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 11-08-00007 и 12-08-31166).

Литература

1. Белл Ф. Жд. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел [Текст] / Ф. Жд. Белл. Ч. I. - М., Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1984 — 600 с.
2. Кобфяси А. Экспериментальная механика [Текст] кн. 2. пер. с англ. / под ред. /А. Кобфяси. — М., Мир, 1990. — 552 с.
3. Локощенко А.М. Экспериментально-теоретическое исследование высокотемпературной осадки цилиндров [Текст] / А.М. Локощенко, В.В. Терауд. — Научная конф. «Ломоносовские чтения»: тез. докл. Секция механики. 13 — 17 апреля 2009г. — МГУ. М. 2009. — С. 106.

Поступила в редакцию 01.06.2012

A.M. Lokoshchenko, W.V. Teraud. The method of registration and measurement deformations under high temperature based on the camera

High temperature tests are related to great difficulties of the execution. The complexity of measurements grows sharply when temperature of tests becomes more than 200-300 °C. The reason of it — sharp decrease of accessible sensors. Usually, this kind of measurements isn't direct. With the help of proposed non-touch method it becomes possible to receive simultaneously a lot of measurements. A specially prepared tested specimen put into a furnace. During the testing photos of specimen are taken through the viewing window. The derivable images are analyzed and parameters are solved by net cross. This process is based on the compute analyze of the derivable data.

Key words: non-touch measurements, high temperature, strain localization, fracture.