

УДК 539.3

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ ЦИФРОВОЙ ФОТОСЪЕМКИ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПОЛЕЙ ДЕФОРМАЦИЙ^{*)}

Д.А. Казаков, Д.В. Жегалов

Нижний Новгород

Представлена экспериментальная методика, использующая технологии цифровой фотографии для оценки изменения деформационных характеристик в рабочей части лабораторных образцов различной формы в условиях одноосного растяжения–сжатия.

В экспериментальной механике для наблюдения за изменениями полей деформаций в нагруженных элементах конструкций используются различные оптические методы [1]. Они основаны на явлениях фотоупругости, геометрического и интерференционного муара, голографической и лазерной спектринтерферометрии и др. Общими недостатками этих методов являются сложность в практической реализации и обработке данных эксперимента для получения необходимой информации.

Развитие новых технологий в области цифровой видеотехники позволило на базе компактной цифровой фотокамеры, совмещенной с персональным компьютером, разработать регистрирующую систему для оценки деформационных характеристик в лабораторном образце или элементе конструкции в процессе их нагружения. Используемое в ней программное обеспечение позволяет производить дистанционную съемку, управлять работой фотокамеры, получать и обрабатывать необходимую экспериментальную информацию в цифровом и графическом виде непосредственно в ходе эксперимента. Каждый полученный кадр (фотоснимок) синхронизируется с нагрузкой, действующей на образец в момент регистрации. После соответствующей обработки информация, содержащаяся в каждом снимке, отражает изменение напряженно-деформированного состояния в рабочей части лабораторного образца вплоть до момента разрушения.

Использование в современных цифровых фотокамерах Super CCD – матрицы третьего поколения позволяет получить изображение деформируемого объекта с разрешающей способностью до 12 миллионов пикселей и обеспечивает достаточную точность при измерении контролируемых перемещений в точках в процессе нагружения.

Каждый эффективный пиксель матрицы фотокамеры, используемый для формирования изображения на снимке, характеризуется тремя параметрами: координатами на плоскости и цветностью. Это позволяет отслеживать формоизменение границ

^{*)} Работа выполнена при частичном финансировании РФФИ (гранты 05-01-00837а, 07-08-13637 офи-ц) и Министерством образования и науки РФ (грант Президента РФ на поддержку ведущих научных школ НШ-6391.2006.8).

объекта исследования, а нанесение на поверхность объекта реперных точек, линий, сеток – изменение их положения в результате деформирования.

Точность измерения перемещений точек на поверхности образца зависит от разрешающей способности матрицы цифрового фотоаппарата и размеров рассматриваемой части поверхности образца, а увеличение цифровой фотографии при дальнейшей обработке позволяет измерять положение искомой точки с точностью до 1 пикселя (рис. 1) [2].

Матрица в 4 мегапикселя позволяет получать фотографии с максимальным размером 2272×1704 пикселей, и если съемка производится на рабочей части образца длиной 50 мм, точность в продольном направлении составит $50/2272 = 0,021$ мм в 1 пикселе. Матрица в 12 мегапикселей позволяет получать цветные фотографии размером 4256×2848 пикселей, при этом точность в продольном направлении составляет $50/4256 = 0,011$ мм в 1 пикселе для рабочего поля того же размера.

Предлагаемая регистрирующая система была апробирована при одноосном растяжении трубчатого и сплошного цилиндрических образцов на испытательной машине УМЭ-10ТМ. Установка включает в себя испытательную машину, оборудованную соответствующими датчиками силоизмерения и деформации; цифровую фотокамеру "SONY", имеющую разрешение 4,2 мегапикселя; осветительное оборудование; персональный компьютер с пакетом прикладных программ для обработки фотоизображений.

Технология проведения эксперимента состоит из следующих этапов:

1. Измерение начальных геометрических размеров образца и нанесение рисок на рабочей части образца для фиксирования заданной базы (нескольких баз).

2. Установка образца в захваты и настройка измерительного оборудования испытательной машины.

3. Настройка на дисплее фотоаппарата изображения наилучшего качества путем настройки освещения, изменения расстояния до образца, установки фона.

4. Получение первого кадра. (Испытательная машина не запущена, нагрузка равна нулю).

5. Передача первого кадра в персональный компьютер и анализ качества изображения с помощью программы графического редактора. Если качество изображения не достаточно хорошее для дальнейшей обработки, необходимо или получить новый кадр лучшего качества, или обработать изображение в графическом редакторе. После получения изображения удовлетворительного качества установка фотоаппарата и внешние условия (освещение, расстояние, фон) фиксируются и не изменяются до окончания эксперимента. Первый кадр, таким образом, является калибровочным, по нему определяются линейные масштабные коэффициенты.

6. Запуск нагружающего устройства с регистрацией нагрузки и перемещений на диаграммном аппарате испытательной машины и параллельной фоторегистрацией процесса в определенные моменты времени.

7. Построение графических файлов по ходу эксперимента и передача их по USB-кабелю в персональный компьютер. При необходимости файлы цифровых фотографий обрабатываются в графическом редакторе для достижения наилучшего качества.

8. Оцифровка измерительной (рабочей) части образца на каждой из фотографий.

После соответствующей обработки результатов эксперимента они могут быть

использованы для изучения формоизменения образца при различных нагружениях; изучения местных пластических деформаций; построения истинной диаграммы деформирования, так как регистрируется фактический диаметр образца в процессе нагружения и в момент образования шейки, вплоть до разрушения.

Испытания проводились на трубчатых и сплошных образцах из стали 12Х18Н10Т при одноосном растяжении. Для трубчатого образца при построении истинной диаграммы деформирования использовались следующие допущения: напряжения по толщине стенки образца однородны; рабочая (измерительная) часть образца до начала образования макротрещины сохраняет цилиндрическую форму, а изменение толщины стенки равномерно на указанной длине; в процессе деформирования выполняется условие сохранения постоянства объема материала в рабочей части образца. На рабочей части образца наносились риски на расстояниях: 10, 20, 30, 40 мм, которые являются исходными базами для измерений; первый кадр представлен на рис. 1.

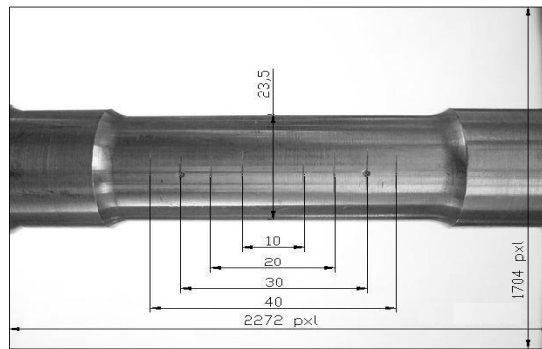


Рис. 1

Из рис.2 (а-г) видно, что рабочая часть трубчатого образца в процессе деформирования (растяжения) сохраняет цилиндрическую форму практически до образования макротрещины. На рис. 2, в, где накопленная деформация e_{11} составляет 64%, визуально различима шейка в образце, и это состояние непосредственно предшествует образованию видимой макротрещины.

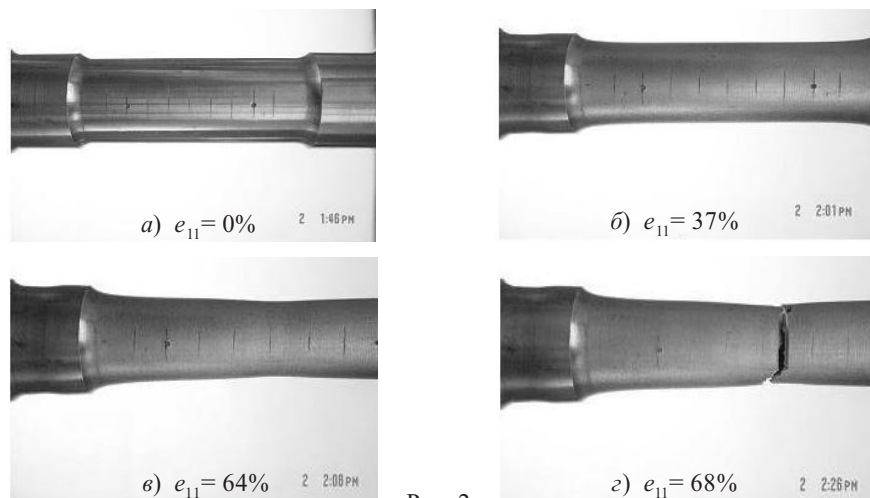


Рис. 2

Кривые в нижней части рис. 3 изображают условные диаграммы деформирования образца, построенные по данным фоторегистрации на базе 40 мм (пунктирная кривая с кружочками), и по данным тензометрического преобразователя (деформометра), установленного на подвижной траверсе испытательной машины (пунктирная кривая с крестиками). Расхождение в 10% по остаточной деформации при регистрации процесса деформирования до разрушения этими двумя способами объясняется косвенным методом измерения деформации с помощью деформометра (по перемещению захватов).

Кривые в верхней части рис. 3 изображают истинные диаграммы деформирования, построенные на основании данных фоторегистрации на различных базах измерения и с учетом фактической площади образца в конкретный момент времени испытания. Видно, что независимо от выбранной базы измерения, все кривые имеют минимальный разброс, но остаточные деформации (деформации до разрушения) отличаются, увеличиваясь при уменьшении базы измерения. Следует также отметить, что величина площади под диаграммой деформирования существенно зависит от выбранной базы измерения. В частности, разница в оценке площади на базах измерения 10 мм (см. рис. 3, кривая с треугольниками) и 40 мм (см. рис.3, кривая с кружочками) составляет почти 25%.

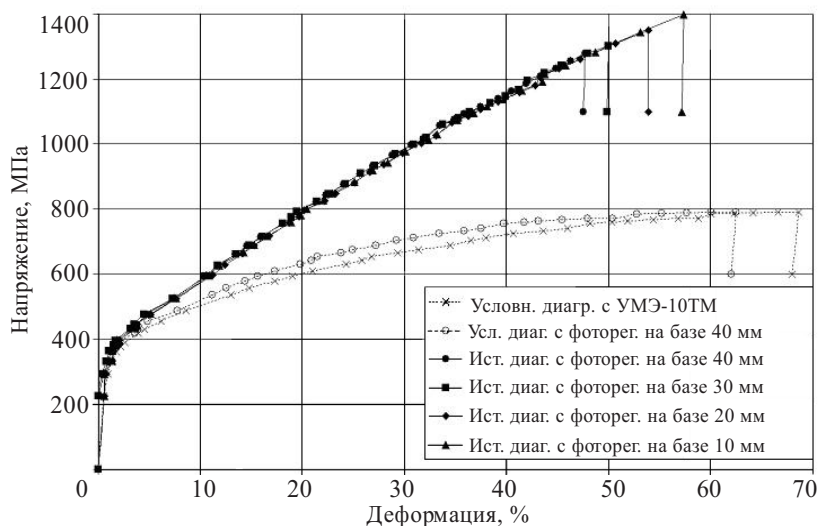


Рис. 3

В случае одноосного растяжения сплошного образца сложности при построении истинной диаграммы деформирования возникают с момента начала образования шейки, когда напряженное состояние в наименьшем сечении образца становится неоднородным. Известно [3–5], что истинная интенсивность напряжений в наиболее опасном сечении стержня определяется по формуле:

$$\tilde{\sigma}_e = \frac{\sigma_m}{1 + a/(4R)}; \quad (1)$$

где a – радиус наименьшего поперечного сечения в шейке; R – радиус кривизны контура шейки в точке наименьшего поперечного сечения; $\sigma_m = P / \pi a^2$ – среднее нормальное напряжение в шейке образца; P – сила действующая в образце.

Для расчета истинной интенсивности деформаций с момента образования шейки можно использовать формулу:

$$e_u = e_z = \ln(1 + e_z), \quad (2)$$

где e_z , e_z – соответственно истинная и условная относительная продольная деформация образца [3–5].

Таким образом, для построения истинной диаграммы деформирования помимо построения машинной (первичной) диаграммы деформирования необходима информация о текущих значениях минимального диаметра шейки и радиуса кривизны ее контура в точках наименьшего поперечного сечения вплоть до момента разрушения образца. Предложенная измерительная система позволяет получать указанную информацию из эксперимента (рис. 4), а после обработки графических файлов (фотоизображений) процесса получать значения искомых параметров R и a (рис. 5).

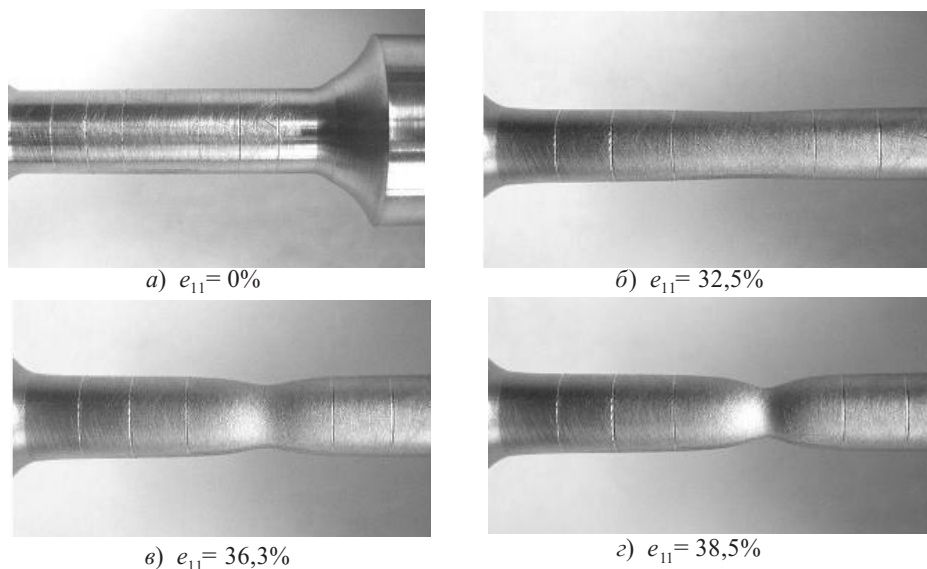


Рис. 4

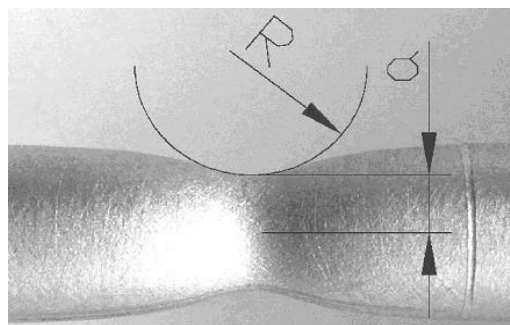


Рис. 5

По результатам испытаний сплошного образца (начальный диаметр $d_0 = 12$ мм, базы измерения $\Delta = 10$ мм, 20 мм, 30 мм) после обработки фотографий (см. рис. 4) были получены соответствующие первичные диаграммы нагружения (рис. 6), определены необходимые размеры в развивающейся шейке и построены истинные диаграммы деформирования образца до разрушения $\tilde{\sigma}_u \sim \tilde{e}_u$ для заданных баз измерения (рис. 7).

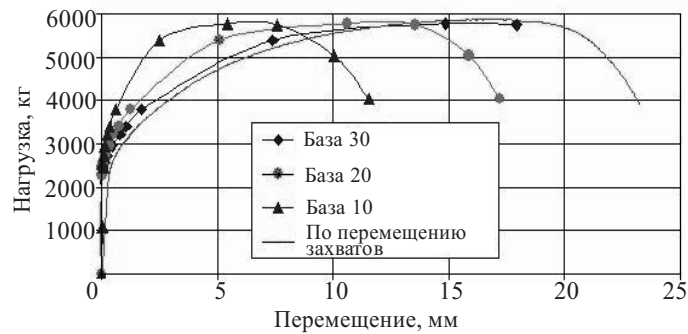


Рис. 6

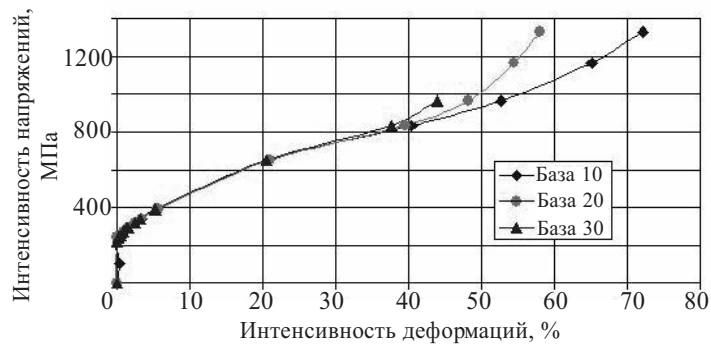


Рис. 7

Предлагаемая регистрирующая система, простая и надежная в практической реализации позволяет при проведении различных видов экспериментов контролировать перемещение точек на границах и поверхности рабочей части образца (конструкции) и получать данные об изменении геометрических размеров рабочей части по двум координатам одновременно, что существенно расширяет возможности оценки напряженно-деформированного состояния изучаемого объекта в области больших деформаций.

Авторы выражают благодарность В. Г. Баженову за участие в постановке задачи и постоянную помощь в практической реализации предложенной методики.

Литература

1. Экспериментальная механика: В 2-х книгах. Книга 1. Пер. с англ. / Под ред. А. Кобаяси. – М.: Мир, 1990. – 616 с.
2. Официальный каталог выставки ФОТОФОРУМ 2005. Москва, КВЦ "Сокольники".

3. *Надаи, А.* Пластичность и разрушение твердых тел / А. Надаи. – М.: Изд-во иностр. лит., 1954. – 647 с.

4. *Малинин, Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести / Н.Н. Малинин. – М.: Машиностроение, 1975. – 400 с.

5. *Давиденков, Н.И.* Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца / Н.И. Давиденков, Н.И. Спиридонова // Заводская лаборатория. – 1945. – Т. XI, №6. – С. 583–593.

[22.02.2007]

USING DIGITAL PHOTOGRAPHY TECHNIQUES FOR STUDYING STRAIN FIELDS

D.A. Kazakov, D.V. Zhegalov

An experimental technique is presented using digital photography for evaluating changes in strain characteristics of working parts of laboratory specimens of various geometry under uniaxial tension-compression.