

УДК 539.376

В.В. ТЕРАУД*НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва*

РАСТЯЖЕНИЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ВЫСОКОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ, ИЗМЕРЯЕМОЕ НА ОСНОВЕ ФОТОРЕГИСТРАТОРА

Применен разработанный автором метод бесконтактных измерений на основе фото-регистрирующего устройства. Приведены результаты экспериментальных исследований высокотемпературной ползучести при одноосном растяжении образцов из алюминиевого сплава и анализ полученных данных. Внимание уделено появлению и развитию локализации деформации. Получены экспериментальные данные о формировании и развитии шейки во времени и распространении ее вдоль длины образца. Приводится описание двух различных по характеру деформирования процессов – «хороший» и «плохой». Показано, что точность измерений составила 0,3 мм.

Ключевые слова: высокая температура, локализация деформации, разрушение, бесконтактные измерения, оптические наблюдения

Введение

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 рассчитано на высокую рабочую температуру. Обычно в подобных экспериментах производятся измерения очень малого количества параметров, что не лучшим образом сказывается на сравнительном анализе с проверяемой теорией.

Испытания металлов при осевом растяжении в условиях высокотемпературной ползучести проводятся с начала XX века. Во всех этих испытаниях образец находится внутри закрытой печи, поэтому единственная характеристика деформированного состояния, которую можно измерить в реальных опытах, – это зависимость удлинения образца от времени. Однако в некоторый момент (иногда сразу после нагружения) в слабом сечении начинает развиваться процесс деформирования более интенсивнее, чем в остальной части образца, поэтому измерения общей деформации образца, проводимые классическими методами, становятся неинформативными. Изменение размеров шейки представляет безусловный интерес. При стандартных испытаниях эти данные получить невозможно.

Широкое распространение в таких случаях приобрели бесконтактные системы измере-

ния на основе пирометра и катетометра. Из контактных измерений наиболее эффективны выносные керамические тензометры, обеспечивающие высокую точность измерений. Но на основе этих датчиков в процессе эксперимента возможно измерять изменение расстояния только между двумя заранее выбранными точками. Разработанная автором методика бесконтактных измерений позволила решить данную проблему. В статье приведены результаты экспериментальных исследований высокотемпературной ползучести алюминиевого сплава и анализ полученных данных.

Постановка испытаний. В качестве испытываемого материала был выбран алюминиевый сплав Д16Т, рабочая температура – 400 °С. Нагрузка соответствует напряжению в начальный момент времени, равному $\sigma_0 = 35$ МПа.

Испытания проводились по следующей схеме. Сначала образец, закрепленный в тисках установки, нагревался до рабочей температуры. После выхода температуры на заданный уровень включался фотоаппарат, настроенный на съемку через заданный промежуток времени. Производилось быстрое нагружение образца до заданного уровня осевого напряжения σ_0 . Дальнейшее деформирование производилось в условиях ползучести при постоянной растягивающей силе вплоть до разрушения. После разрушения образца съемка прекращалась, температура в печи постепенно уменьшалась до комнатной и после этого образец извлекался из установки.

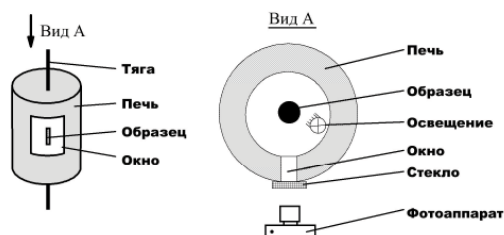


Рис. 1. Схема размещения образца в печи и регистрационного оборудования для бесконтактных измерений

В основу измерений был положен бесконтактный принцип измерений геометрических параметров. Общий принцип этого метода изложен в [1]. Схема метода показана на рис. 1. Геометрия образца восстанавливалась по реперным точкам, нанесенным на образец до эксперимента. Разработанная система состоит из трех основных частей: модернизированной печи, специального фотоаппарата, компьютерного комплекса.

Оборудование. Испытания проводились на установке ИМех-5 в Институте механики МГУ имени М.В. Ломоносова. На установке ИМех-5 поддерживаются заданная высокая температура и заданное усилие в рабочей части печи. Растягивающее усилие P_0 создается грузами, нагружаемыми на платформу в нижней части установки.

Изготовлена оправа, которая плотно прилегает к внешней стороне печи, имея прямоугольное отверстие в центре для визуального доступа. Это отверстие плотно закрыто оптическим кварцевым стеклом. Такая конструкция исключает попадание холодного воздуха внутрь печи во время эксперимента. Внутри печи была укреплена кварцевая лампа на керамических держателях, к которой проволокой из нихрома подводилось электричество. С помощью регулировки яркости лампы и ее положения было получено превосходное освещение образца в процессе эксперимента.

В качестве оптической системы были использованы фотоаппарат NIKON D300S, оптическая система NIKKOR 80-200 f/2.8 AF-D ED и удлинительное кольцо 12 мм фирмы ARKO. Для возможности фотографирования различных по длительности испытаний был разработан блок управления Spider7. Основной задачей блока является формирование импульсов управления, соответствующих изменению длины на 0.1 мм. Это позволяет сохранить точность измерения и исключить избыточность кадров от эксперимента при серийной съемке.

Образцы. В экспериментах применены цилиндрические образцы, изображенный на рис. 2. Рабочая часть (1) имела различные дли-

ны значения L_0 и диаметра D_0 , с отклонением по диаметру образца, не превышающим 100 мкм. Рабочая часть соединена с утолщением (2) через радиусный переход, тем самым исключая концентратор напряжения. Образцы закреплялись в тягах машины при помощи резьбы (3). В табл. 1 показаны геометрические параметры рабочей части применяемых образцов. Никаких специальных подготовок перед испытаниями, описаны в [2], образцов применять не надо.

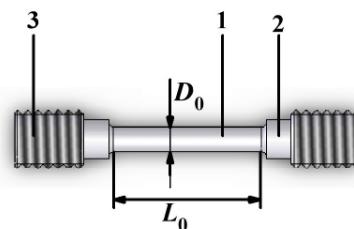


Рис. 2. Чертеж образца для экспериментальных исследований

Таблица 1 – Значение размеров рабочей части и параметров нагружения для образцов

D_0 [мм]	L_0 [мм]	σ_0 [кг/мм ²]	P_0 [кг]
4	24 и 26	3.5	44
5	28 и 31	3.5	68.7

Результаты. На рис. 3 и рис. 4 показаны диаметры образцов в двух экспериментах в различные моменты времени. На рис. 3 цифрами обозначены моменты времени до разрушения, соответствующие 1 – $t = 0\%$, 2 – $t = 80\%$, 3 – $t = 95\%$, 4 – $t = 100\%$ времени разрушения t^* . На рис. 4 при 1 – $t = 0\%$, 2 – $t = 10\%$, 3 – $t = 30\%$, 4 – $t = 60\%$ времени разрушения t^* , для которого зафиксировать момент разрушения не удалось. Эти графики показывают различный характер протекания процесса деформирования.

Отличительными особенностями первого процесса деформирования (рис. 3) являются слабое деформирование большую часть времени и локализация деформации, приводящая к быстрому разрушению. При этом часть образца с областью развития шейки растет с 25% до 42%. Столь высокая часть образца, затронутая развивающейся шейкой, опровергает предположение многих авторов, что при локализации деформаций деформация протекает в локальной зоне, не затрагивая большую часть образца.

Отличительной особенностью второго процесса деформирования, изображенного на рис. 4, является постепенное равномерное деформирование всей рабочей части образца. Как правило, при таком характере деформирования локализация происходит при $t > 50\%t^*$. Дан-

ный вариант деформирования представляется наиболее правильной последовательностью протекания деформирования и может быть одним из критериев проверки качества эксперимента. Потому при проведении высокотемпературных испытаний, при котором процесс деформирования протекает подобным образом, результаты эксперимента следует признавать бракованными и исключать из анализа. Несложно заключить, что после эксперимента отличить один характер протекания процесса от другого возможно по максимальному диаметру образца в рабочей зоне. Как можно видеть из рисунков при хорошем протекании процесса деформирования (рис. 4) максимальный диаметр незадолго до разрыва около 4.3 мм, при начальном диаметре 5 мм. Аналогичные измерения по графику на рис. 3 показывают значение максимального диаметра 4.9 мм при начальном 5 мм.

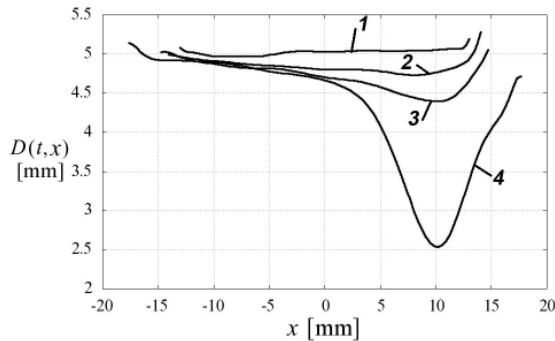


Рис. 3. Значение диаметров образцов при 1 – $t = 0\%$, 2 – $t = 80\%$, 3 – $t = 95\%$, 4 – $t = 100\%$ от времени разрушения t^*

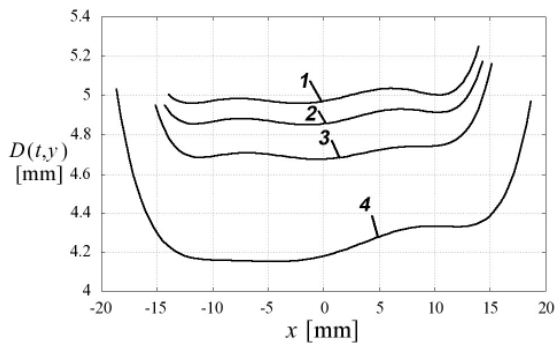


Рис. 4. Значение диаметров образцов при 1 – $t = 0\%$, 2 – $t = 10\%$, 3 – $t = 30\%$, 4 – $t = 60\%$ от времени разрушения t^*

Вследствие применения разработанной автором системы измерения стало возможным сравнить реально действующее напряжение в образце с напряжением, получающимся при предположении о равномерной деформации

вдоль всей рабочей части, как это делается обычно. На рис. 5 приведены три пары кривых, соответствующие трем экспериментам (1, 2 – образец №5, 3, 4 – образец №4 и 5, 6 – образец №1), при этом цифрами 1, 3, 5 обозначены кривые, соответствующие реальному максимальному напряжению, кривые 2, 4, 6, соответствуют напряжению в образце при предположении, что деформация рабочей части образца происходит равномерно без локализации. Цифрами 7, 8, 9 обозначены моменты времени, при которых начинается значительное расхождение пары кривых. Данный график наглядно иллюстрирует, что предположение о равномерной деформации рабочей части выполняется в среднем только в начале эксперимента (при $t < 30-40\%$). Расхождения между упомянутыми напряжениями доходят до 100%, что говорит о важности учета истинного распределения напряжений в образце.

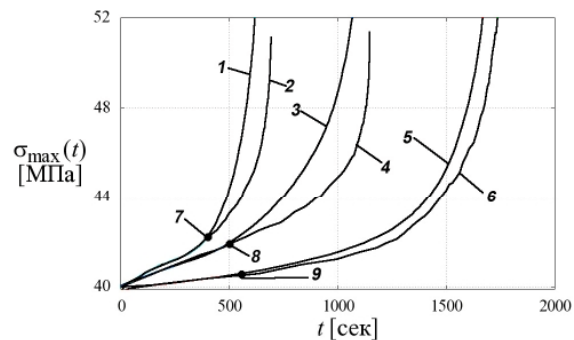


Рис. 5. Зависимости $\sigma_{max}(t)$, полученные различными методами

Точность. В экспериментах применялась низкодисперсная и низкоабберационная оптика фирмы NIKKOR. Проведенные независимой лабораторией [3] исследования показали максимальное искажение 0.4% дисторсии при 135 мм фокусного расстояния и 0.7% при 200 мм.

Оценка погрешности измерения производилась при использовании длины образца, полученной оптическим методом и прямым измерением изменения длины образца по изменению длины между тягами машины в процессе эксперимента. На рис. 6 приведены три пары значения длины образца: 1,2 – эксперимент №1; 3,4 – эксперимент №2; 5,6 – эксперимент №3; при этом кривые 1,3,5 соответствуют длине образца, полученной оптическим методом, кривые 2, 4, 6 соответствуют длине образца, полученной прямыми измерениями. Анализ данных, изображенных на рисунке показывают, что расхождение длины образца, измеренное оптическим методом, и прямым измерением не превышают 0.3 мм.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ проект 12-08-31166.

Литература

1. Локощенко А.М., Терауд В.В. Метод регистрации и измерения деформаций при температуре на основе фотоаппарата // Вестник двигателестроения. 2012. №2. С.61 – 64.
2. А.М. Локощенко, В.В. Терауд. Экспериментальное подтверждение моделирования осадки цилиндров при ползучести. // Машиностроение и инженерное образование. 2011. №1. С.49 – 53.
3. <http://www.photozone.de/Reviews/252-nikkor-af-80-200mm-f28d-ed-review--test-report>

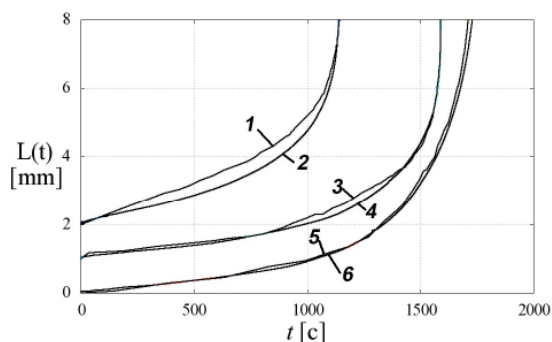


Рис. 6. Значения длины образца, полученные оптическим методом и прямым измерением по тягам машины (1, 3, 5 – оптическое измерение, 2, 4, 6 – прямое измерение)

В.В. Терауд. Розтягнення циліндричних зразків за умов високої температури, що вимірюється на основі фоторегистратора

Застосовано розроблений автором метод безконтактних вимірювань на основі фотореєструючого пристрою. Наведено результати експериментальних досліджень високотемпературної повзучості за умов одновісного розтягнення зразків з алюмінієвого сплаву і аналіз отриманих даних. Увагу приділено появленню і розвитку локалізації деформації. Отримано експериментальні дані про формування і розвиток шийки за часом і розповсюдження її за довжиною зразка. Наведено опис двох різних за характером деформування процесів – «добрий» та «поганий». Показано, що точність вимірювань склала 0,3 мм.

Ключові слова: висока температура, локалізація деформації, руйнування, безконтактні вимірювання, оптичні спостереження.

W.V. Teraud. Stretching of the cylinder specimen under high temperature measured based on the camera

Developed by author method of the non-touch measurement based on the camera is used. There are shown experimental results of the aluminum alloy under creep and analyze this data. The main view is deformation during strain localization. There are token experimental dates of neck formation and evolution during time and distributing along specimen. Two results of the different process are shown - «good» and «fail». The accuracy is 0.3 mm.

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