

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ОСОБЕННОСТЕЙ ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИЙ ПЛОСКИХ ОБРАЗЦОВ, РАСТЯГИВАЕМЫХ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ*

В.В. Терауд, Н.Е. Валисовский

Рассматривается проблема локализации деформаций в плоских растягиваемых образцах. Представлены результаты проведенных экспериментальных исследований ползучести плоских стандартных образцов из алюминиевого сплава при температуре 400°C. Образцы испытывались в условиях ползучести при различных начальных растягивающих напряжениях. Использование разработанной бесконтактной системы измерения позволило получить зависимости изменения формы образцов, перемещения поверхностных точек, истинного напряжения в образце от времени и др. Исследована зависимость ширины и толщины образца в месте разрушения от начального напряжения. Определен относительный интервал времени деформирования, при котором образец растягивается равномерно и время образования локализации деформаций. Введены понятия «быстрая» и «долгая» локализации. Проведено сравнение полученных результатов с данными аналогичных испытаний цилиндрических образцов.

Ключевые слова: ползучесть, испытания, высокая температура, плоский образец, локализация деформаций, шейка.

EXPERIMENTAL RESEARCH OF PARTICULARITIES OF STRAIN LOCALIZATION IN THE PLANE TENSILE SPECIMENS AT HIGH TEMPERATURE CREEP

V.V. Teraud, N.E. Valisovskiy

The paper presents the results of experimental research into creep of flat specimen of aluminum alloy at a temperature 400°C. Specimens were tested under creep conditions at different initial tensile stress. There has been also discussed a problem of strain localization in plane tensile specimens. The use of the developed non-contact measurement system allowed obtaining dependences of change of sample's form, surface points displacement, sample true stress on time, etc. The dependence of the width and thickness of the fracture point on the initial stress and the proximity to the neck site has been investigated as well. There have been obtained a relative time interval of deformation, in which the sample is stretched uniformly, and the formation time of deformation localization. The concepts of "fast" and "long" localization were introduced. A comparison results with similar tests of cylindrical samples have been made.

Keywords: creep, experiments, high temperature, flat specimen, localization of deformation, neck.

* Работа проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проект № 14-08-00528.

Введение

Экспериментальные и теоретические исследования образования шейки в цилиндрических и плоских образцах при их растяжении при комнатной температуре имеют более чем полувековую историю. Они продолжаются и в настоящее время, а полученные результаты отражены во многих статьях и монографиях известных отечественных и зарубежных авторов.

Экспериментальные исследования образцов при одноосном растяжении в условиях ползучести проводятся с прошлого века. Следует отметить работы Ю.Н. Работнова, Л.М. Качанова, Н.Н. Малинина, С.А. Шестерикова, А.М. Локощенко, В.П. Радченко, К.И. Романова, О.В. Сокина, С.П. Яковлева и других ученых. Однако в известных испытаниях процесс локализации деформации в образцах не рассматривался.

При проведении натурных испытаний на ползучесть при высокой температуре возникают большие сложности, связанные с измерением параметров деформирующегося образца. По этой причине практически во всех таких испытаниях измеряются только один-два параметра. Естественно, что процесс формирования и развития сужения (шейки), появляющегося в процессе испытания образца, остается без внимания. Использование классических подходов, например, измерение параметров деформаций при помощи тензорезисторов, практически невозможно вследствие влияния высокой температуры на датчик, помещаемый на образец. Эта проблема может решаться по-разному. Существуют высокотемпературные тензорезисторы типа НМТ-450 [1]. Однако их рабочая температура ограничена 450°C, а вследствие недостаточно малых размеров (~1 см) по сравнению с размерами образца, которые обычно не превышают 5–10 см, их использование не позволяет надежно исследовать процесс локализации деформаций.

В этой связи необходимо применять бесконтактные системы измерения. Например, в работе Третьяковой Т.В. [2] применена промышленная система Vic-3D, основанная на методе корреляции цифровых изображений. Для использования системы измерения Vic-3D предлагалось перед экспериментом покрыть образец специальной краской, создающей стохастический рисунок на поверхности образца, но применение которой при высокой температуре невозможно. Хотя такая система измерений была испытана, однако из-за вышеперечис-

ленных ограничений эта система не позволила получить необходимые данные.

При высокотемпературных экспериментах по растяжению образцов единственной характеристикой, которую можно измерить в реальных опытах, является зависимость удлинения образца Δl от времени t . После локализации деформаций получаемая величина удлинения образца становится малоинформативной. Данный момент времени в экспериментах обычно неизвестен, поэтому изучение появления и развития шейки представляет большой интерес. При стандартных испытаниях (эксперимент в закрытой, темной печи, измерение только удлинения образца от времени) эти данные получить невозможно.

Основная цель данной работы – представить результаты экспериментальных исследований образцов в условиях высокотемпературной ползучести для проверки теоретических работ и построения новых математических моделей, а также детальное описание процессов, протекающих в зоне локализации деформаций, и нахождения момента времени, в который происходит локализация деформаций.

Постановка и проведение исследований

Испытания проводились для плоских образцов из алюминиевого сплава Д16Т при рабочей температуре 400°C. Начальные размеры всех образцов: длина $L_0 = 44$ мм, ширина $a_0 = 9$ мм, толщина $H_0 = 1,3$ мм. Постоянная растягивающая сила P_0 выбиралась так, чтобы получить напряжения в начальный момент времени, равными $\sigma_{01} = 26$ МПа, $\sigma_{02} = 16$ МПа, $\sigma_{03} = 12,4$ МПа, $\sigma_{04} = 10$ МПа в различных испытаниях. При каждом значении начального растягивающего напряжения испытания проводились для различного количества образцов: шесть – при σ_{01} , восемь – при σ_{02} , четыре – при σ_{03} , три – при σ_{04} .

В экспериментах применялась бесконтактная система измерения геометрических параметров образца [3]. Геометрия образца восстанавливалась по фотографиям, полученным в процессе эксперимента. Разработанная система состоит из трех основных частей: модернизированной печи, специального фотоаппарата и компьютерного комплекса. В закрытой печи на боковой поверхности сделано небольшое отверстие, закрытое высокотемпературным оптическим кварцевым стеклом, внутри установлено освещение – кварцевая лампа.

Для уменьшения количества кадров в последующем распознавании, но при этом для сохранения подробностей фоторегистрации, было разработано устройство, которое через каждый 0,1 мм (настраиваемый параметр) удлинения образца формировало управляющий импульс на фотоаппарат, который производил фотофиксацию текущего момента. Компьютерный комплекс состоит из трех программ: распознавателя (производит выделение образца на кадре и измерение его размеров), решателя (вычисляет все параметры и формирует полученные данные) и постобработчика (строит графики и таблицы) [3].

Испытания проводились в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова на установке ИМЕХ-5. Образец укрепляется в тисках испытательной машины при помощи захватов так, что оси верхней тяги, образца, нижней тяги и платформы с весами составляют одну линию. Для измерения перемещений использовался фотоаппарат NIKON D300s с объективом NIKKOR 80-200 мм и удлинительное кольцо 12 мм для фокусировки с близкого расстояния. Обычно устанавливалось фокусное расстояние 130 мм, а фотоаппарат устанавливался на расстоянии одного метра. Для последующего анализа изображений, снятых при проведении экспериментов, на образец предварительно наносились риски в виде прямых линий, образующие прямоугольники 3×2 мм, изображение которых на недеформированном образце показано на рис. 1, а. Риски наносились на станке с ЧПУ собственного производства.

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 или заданный интервал удлинения образца. Производилось быстрое нагружение образца до заданного уровня начального напряжения σ_0 при помощи веса P_0 в нижней части установки. Дальнейшее деформирование производилось в условиях ползучести при постоянной растягивающей силе P_0 вплоть до разрушения.

Дополнительно к оптической системе измерений был установлен контактный датчик (индуктивный датчик растяжения и система сбора данных HBM Spider 8), измеряющий удлинение образца по захватам машины. По данным от этого датчика в дальнейшем проводилась

верификация данных с оптической системой измерения.

Анализ результатов

Данные, получаемые в процессе высокотемпературных натурных экспериментов при растяжении, включают зависимость удлинения образца от времени или зависимость логарифмической деформации ползучести $p = \ln(L/L_0)$ от времени t . На рисунке 2 изображены зависимости деформации ползучести образцов от времени для четырех значений начальных напряжений. Звездочками показаны моменты разрушения. Количество кривых соответствует числу испытанных образцов.

На рисунке 3 приведены опытные данные для значений предельной толщины H^* и предельной ширины a^* в месте разрыва образцов. Разными символами помечены экспериментальные данные, соответствующие различным начальным напряжениям. С повышением начального растягивающего напряжения увеличиваются предельные значения ширины и толщины. Образцы с более низким начальным напряжением разрушаются при большей толщине и ширине в месте разрушения, чем образцы с более высоким начальным напряжением.

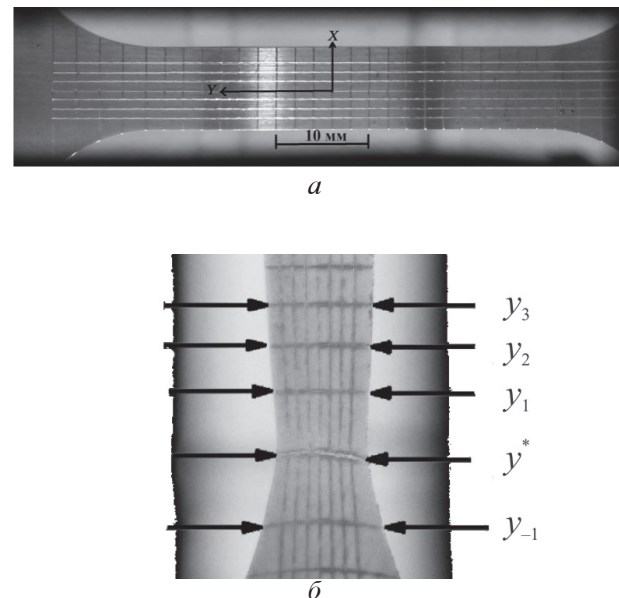


Рис. 1. Изображение начального образца (а), установленного в печи, и фотография части образца незадолго до разрушения (б): y^* – линии сетки по месту разрыва; y_1 – y_3 – линии сетки над разрывом; y_{-1} – линия сетки непосредственно под разрывом

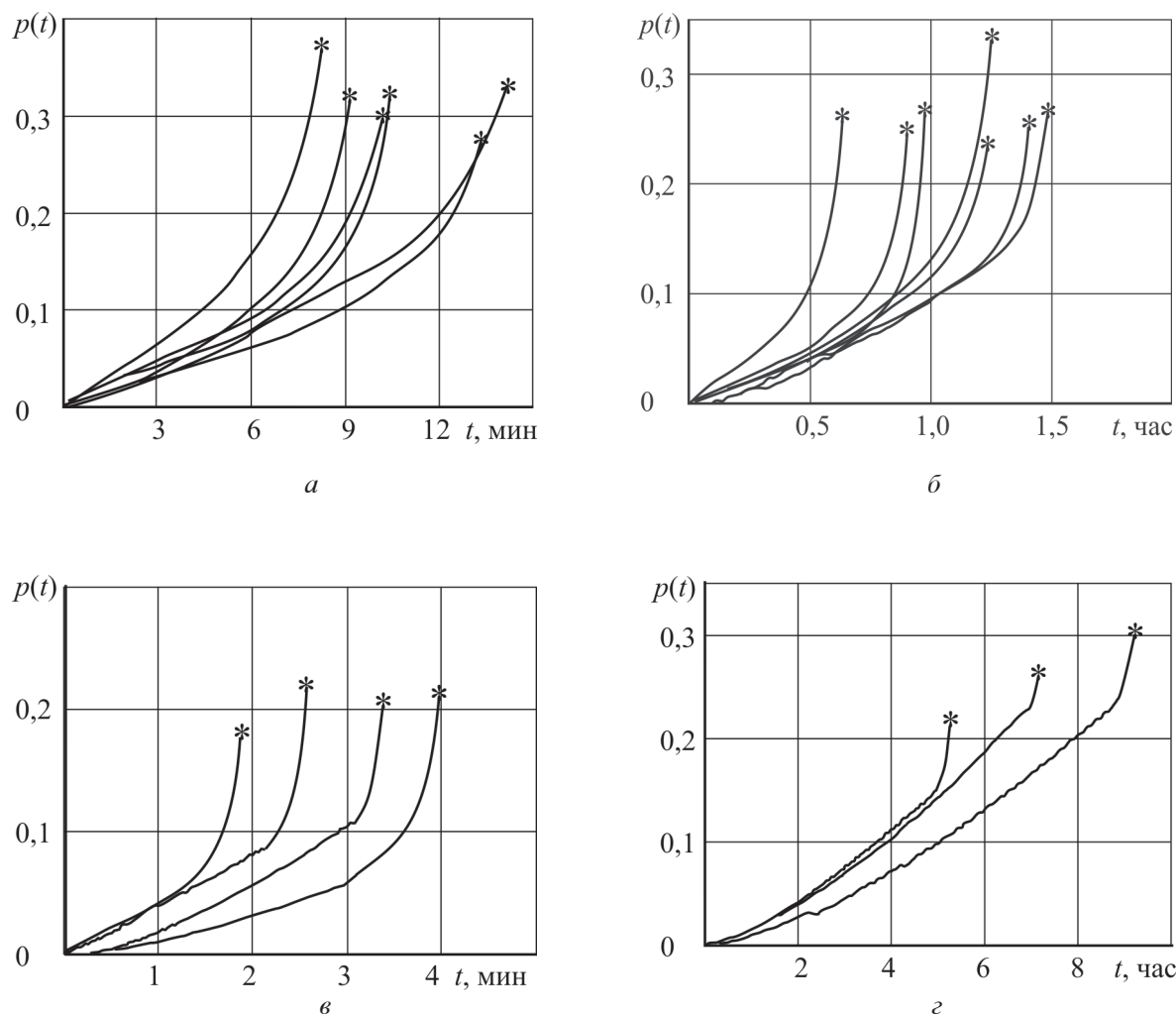


Рис. 2. Кривые деформаций ползучести $p(t)$ при разных начальных напряжениях:
 $a - \sigma_{01} = 26$ МПа; $б - \sigma_{02} = 16$ МПа; $в - \sigma_{03} = 12,4$ МПа; $г - \sigma_{04} = 10$ МПа

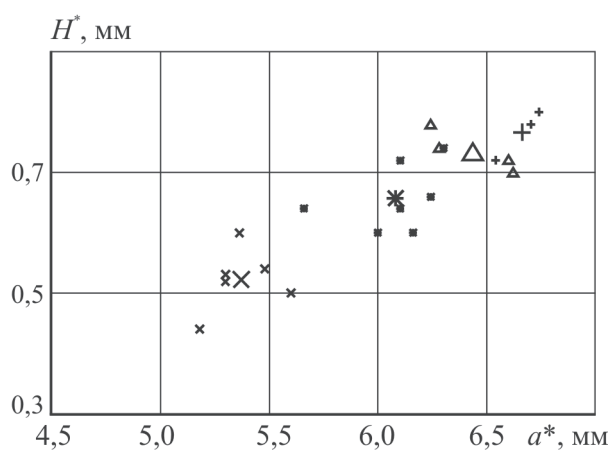


Рис. 3. Значения предельной толщины H^* и предельной ширины a^* в месте разрыва образцов:

$\times - \sigma_{01}$; $* - \sigma_{02}$; $\Delta - \sigma_{03}$; $+ - \sigma_{04}$

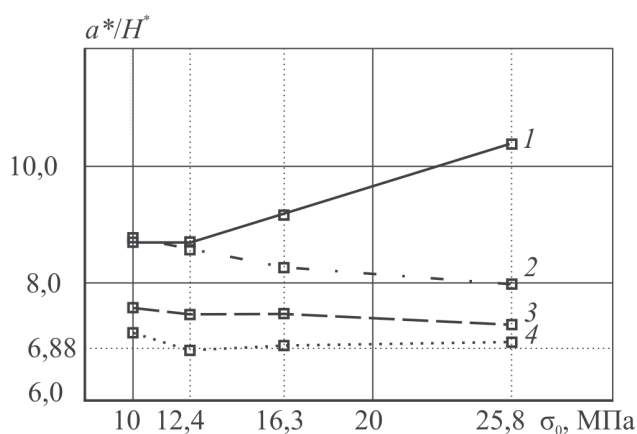


Рис. 4. Зависимости отношение a^*/H^* в различных сечениях образца от начального напряжения:

$1 - y^*$; $2 - y_{-1}$; $3 - y$; $4 - y_A$

На рисунке 4 изображены осредненные данные, показывающие зависимость отношения предельной ширины a^* к предельной толщине H^* в различных сечениях разрушенных образцов от начального напряжения. Обозначения y_i приведены на рис. 1, б. Значение 6,88 характеризует начальное отношение a_0/H_0 .

Как видно, образец вне шейки деформируется по ширине и толщине практически пропорционально, при приближении к месту локализации деформаций деформирование по толщине превалирует над деформированием по ширине с превышением до 30–50% (сравнение вне шейки и в месте разрыва). С повышением начального растягивающего напряжения увеличивается отношение a^*/H^* в месте разрыва.

В подавляющем большинстве высокотемпературных испытаний предполагается, что плоский образец деформируется равномерно. Это предположение верно только для начальной стадии деформирования, причем продолжительность этой начальной стадии неизвестна. Результаты проведенных высокотемпературных испытаний цилиндрических образцов на ползучесть до разрушения впервые были представлены в работе [3]. В данной работе исследованы особенности локализации деформаций в плоских образцах. На рисунке 5 приведены графики $\sigma_{\max}(t)$ для различных испытаний при $\sigma_{01} - \sigma_{04}$ соответственно. Сплошные линии соответствуют максимальным напряжениям $\sigma_{\max}$, полученным в предположении однородной деформации, но с учетом уменьшающейся площади поперечного сечения, по длине рабо-

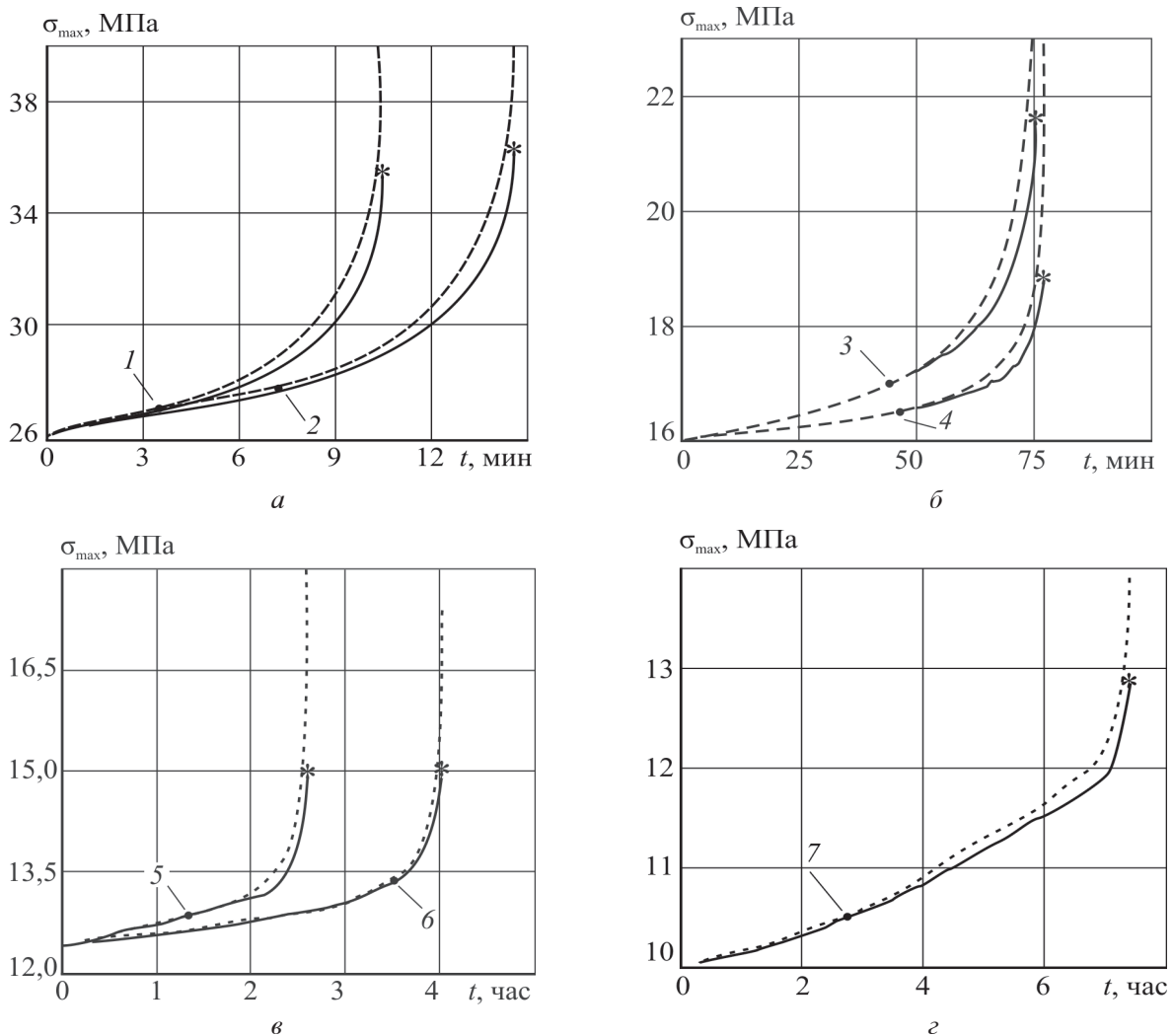


Рис. 5. Максимальные напряжения, полученные в экспериментах:

a – для σ_{01} ; $б$ – для σ_{02} ; $в$ – для σ_{03} ; $г$ – для σ_{04} ; — – в предположении однородной деформации; - - - истинное максимальное напряжение в образце; 1–7 – точки расхождения кривых

чей части образца. Пунктирные линии соответствуют реально действующим максимальным напряжениям, полученным с учетом неоднородной деформации образца. Точки 1–7 соответствуют значениям времени, когда кривые расходятся. Равномерная деформация образцов происходит, как правило, только в течение длительности, составляющей 30–50% от времени до разрушения: после этого появляется значительная неоднородность деформирования.

Рисунок 6 иллюстрирует профиль образца в месте локализации непосредственно перед ($t=t_{-1}^*$) и при разрушении ($t=t^*$) образцов. Можно отметить, что при более высоком начальном напряжении σ_{01} (рис. 6, а) форма образца перед разрушением сильнее изменяется, чем при низком значении начального напряжения σ_{04} (рис. 6, б). На рисунке 6, б сплошная и штриховая линии практически сливаются, показывая несущественное влияние финальной стадии деформирования на общую деформацию образца. Образец при σ_{01} деформировался 480 сек, при этом за небольшой конечный промежуток времени перед разрушением (около 1–2 сек) его сужение составило $(a_t - a_{t_{-1}^*})/a_{t_{-1}^*} = 15\%$ по ширине, в отличие от образца при σ_{04} , деформирующегося до разрушения 18000 сек, сужение которого за такой же относительный период времени (около 75 сек) составило не более 0,5%.

Представляется интересным сравнить особенности деформирования плоских и цилиндрических образцов. На рисунке 7 показаны графики изменения ширины a или диаметра D

образца в различные моменты времени, вплоть до разрушения, для различных значений относительно времени $\bar{t} = (t/t^*) \cdot 100\%$. Графики иллюстрируют различный характер деформирования плоских образцов.

Результаты, показанные на рис. 7, а, в, характеризуются тем, что образец большую часть времени деформируется равномерно: на рисунке стрелками показан процесс удлинения (горизонтальные стрелки) и процесс уменьшения поперечного размера (вертикальная стрелка). Локализация деформаций происходит незадолго до разрушения (80–90% для плоских образцов и 90% для цилиндрических); такие образцы предложено называть образцами с «долгой» локализацией. В проведенном исследовании образцов с «долгой» локализацией было меньше. Следует отметить, что образцы с «долгой» локализацией могут иметь непостоянный поперечный размер по длине рабочей части (см. рис. 7, а, в): на верхней и нижней части образца имеются области с меньшей шириной). При этом продольное деформирование не сосредоточено в зоне минимального поперечного размера, а равномерно распределено по образцу; в этом случае считается, что локализация деформации не происходит.

Результаты, показанные на рис. 7, б, г, характеризуются тем, что локализация деформаций в образцах происходит гораздо раньше (30% для плоских образцов и 15% для цилиндрических образцов), и дальнейшее деформирование происходит только в зоне локализации (обведенная область на рис. 7, г). Такие образцы

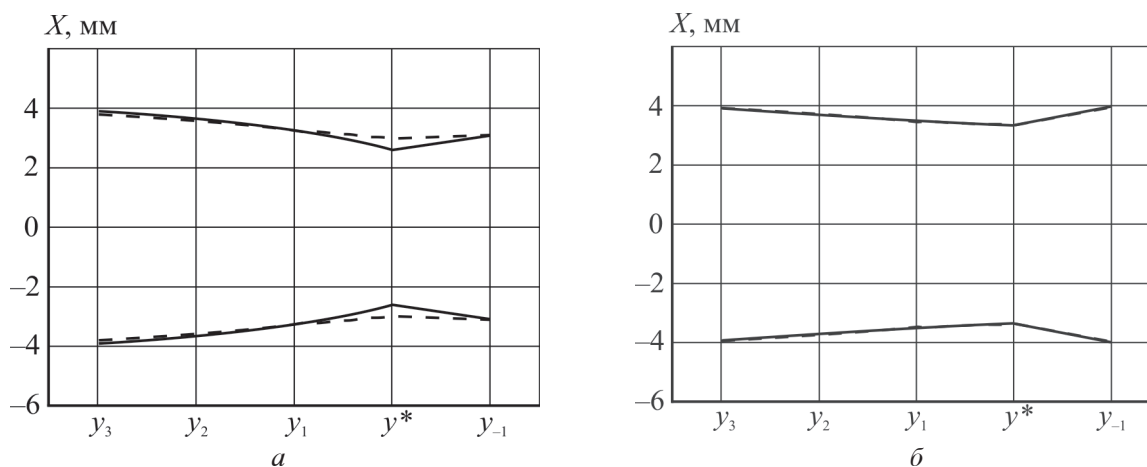


Рис. 6. Профиль образца в месте локализации деформаций при разрушении (при $t = t^*$, сплошная линия) и перед разрушением (при $t = t_{-1}^*$, пунктирная линия):
а – $\sigma_{01} = 26$ МПа; б – $\sigma_{04} = 10$ МПа

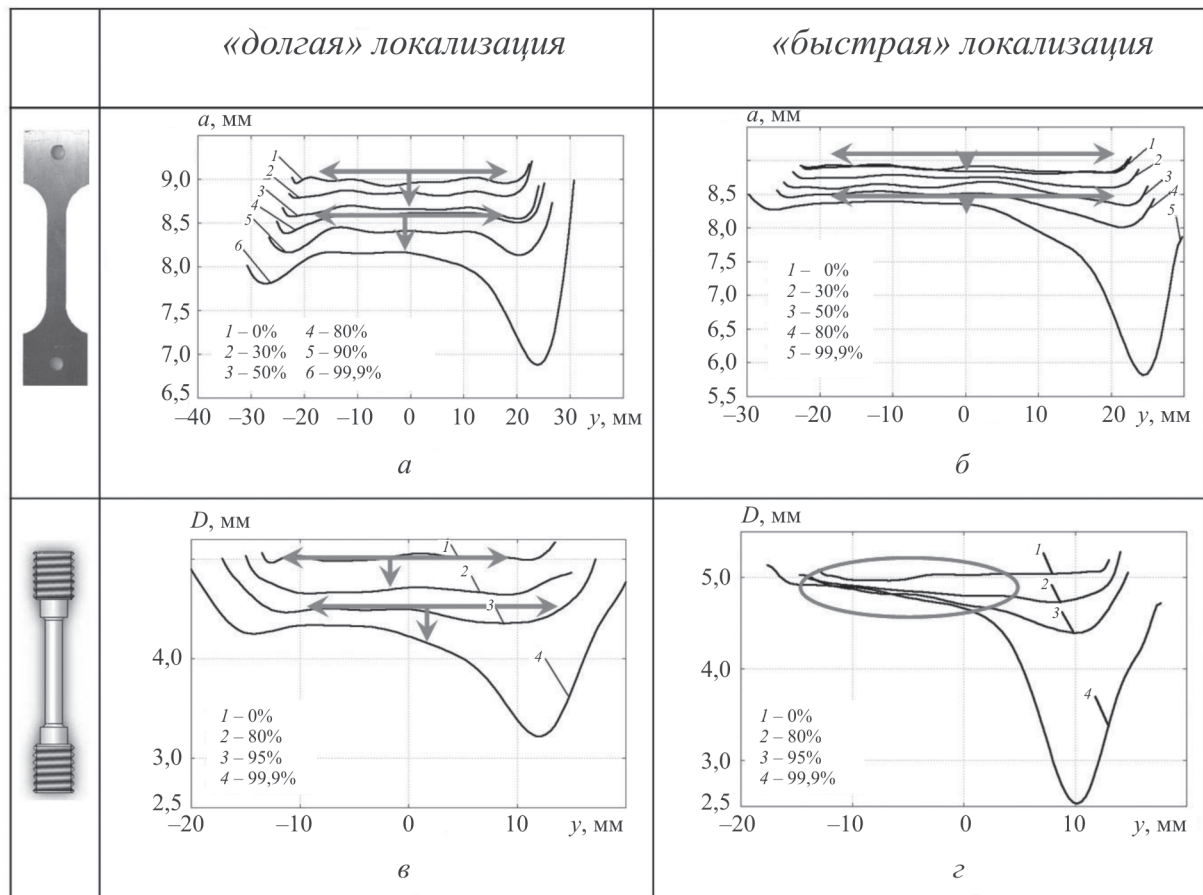


Рис. 7. Изменение поперечных размеров образцов для различных значений относительного времени $\bar{t}$ (в процентах) до момента разрушения: а, б – плоские образцы; в, г – цилиндрические образцы

предложено называть образцами с «быстрой» локализацией деформаций.

Было установлено, что плоские образцы в процессе испытания более длительное время деформируются равномерно (начало стадии неравномерного деформирования начинается позже), чем цилиндрические образцы.

Наглядным способом изображения деформаций, возникающих в образце, является изображение полей деформаций образца. В этом случае область образца окрашивается в цвет, соответствующий величине деформации этой области относительно остальной части образца. На рисунке 8 показано распределение поверхностных смещений (модуль пространственного смещения) в поперечном направлении (по X), соответствующий моменту перед разрушением, на поверхности недеформиро-

ванного образца (исходного). Эти данные наглядно показывают, какие части образца наиболее интенсивно деформируются (темные области), какие – наименее (светлые области). На приведенном рисунке (см. рис. 8) хорошо видно, что процесс деформирования образца относительно горизонтальной линии симметрии не происходил симметрично, хотя образец и условия деформирования были симметричными. Увеличенная темная область (1) справа сверху рабочей части показывает достаточно интенсивное перемещение материала к центру, по сравнению с аналогичной областью (2) снизу. Подобная асимметрия вызвана, скорее всего, неидеальностью микроструктуры материала образца. В проведенном исследовании большинство образцов деформировались более симметрично.

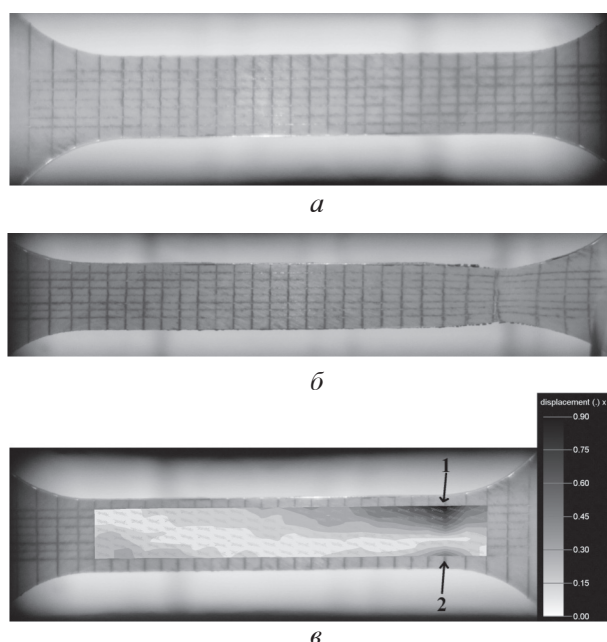


Рис. 8. Изображение образцов:

a – исходный недеформированный образец;
б – деформированный образец; *в* – распределение поверхностных смещений (по оси *x*) перед разрушением, показанное на исходном образце

Заключение

Проведен анализ процесса локализации деформаций в плоских образцах, наблюдаемого в процессе высокотемпературных испытаний при ползучести вплоть до разрушения. Впервые показано, что равномерная деформация образцов происходит только в течение 30–50% от времени разрушения, после чего появляется значительная неоднородность деформирования. Зафиксирован момент времени, в который на образце образуется шейка. Этот момент соответствует расхождению зависимостей

для условных и истинных максимальных напряжений $\sigma_{\max}(t)$. Было выяснено, что образцы с более низким начальным напряжением разрушаются при больших значениях ширины и толщины образца в зоне локализации. С повышением начального растягивающего напряжения и приближением к месту локализации увеличивается отношение ширины к толщине в разрушенном образце. В связи с этим предложено ввести понятия «быстрая» и «долгая» локализации деформации. Показано, что плоские образцы по сравнению с цилиндрическими образцами деформируются более равномерно в своей рабочей части.

Авторы выражают благодарность профессору, доктору физико-математических наук А.М. Локощенко за проявленный интерес к работе и ценные замечания.

Список литературы

1. Клоков Н.П. Тензорезисторы. М.: Машиностроение, 1990. – 230 с.
2. Третьякова Т.В. Особенности использования программного обеспечения Vic-3D, реализующего метод корреляции цифровых изображений, в приложении к исследованию полей неупругих деформаций // Вычислительная механика сплошных сред. 2014. Т. 7. № 2. С. 162–171.
3. Локощенко А.М., Терауд В.В. Исследование методом фоторегистрации локализации деформации в цилиндрических образцах при высокотемпературной ползучести // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 43–46.

Материал поступил в редакцию 06.04.15

ТЕРАУД

Валентин Викторович

E-mail: ldrnww@gmail.com

Тел.: 8 (495) 939-52-78

Кандидат технических наук, научный сотрудник НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова. Сфера научных интересов: технологические процессы, осуществляемые в условиях высокотемпературной ползучести. Автор 40 научных работ.

ВАЛИСОВСКИЙ

Никита Евгеньевич

E-mail: wne3-v@rambler.ru

Тел.: 8 (495) 311-41-85

Инженер-программист НПЦАП им. Н.А. Пилюгина. Сфера научных интересов: численные методы, математическая логика, теория игр, методы искусственного интеллекта.