

УДК 539.376

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ МОМЕНТА ОБРАЗОВАНИЯ
ЛОКАЛИЗАЦИИ ДЕФОРМАЦИИ ПОЛЗУЧЕСТИ
В ОБРАЗЦАХ КРУГЛОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ
НА ОСНОВЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ***

© 2017 г.

Терауд В.В.

*НИИ механики Московского государственного университета
им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация*

ldrnww@gmail.com

Поступила в редакцию 19.12.2016

Приведены результаты экспериментального исследования ползучести растягиваемых цилиндрических образцов из алюминиевого сплава при температуре 400 °С. Рассмотрена проблема локализации деформаций в таких образцах при различных начальных растягивающих напряжениях. Использование разработанной автором бесконтактной системы измерений позволило получить зависимости изменения формы образцов и напряжения в образце от времени, на основе которых построены критерии оценки времени появления локализации деформаций в образце. Определен относительный интервал времени деформирования, при котором образец деформируется при растяжении равномерно. Показано, что момент появления локализации по критериям, приведенным в настоящей статье, занижен относительно реального момента образования шейки в образце.

Ключевые слова: эксперимент, растяжение, ползучесть, высокая температура, локализация деформаций, сужение, шейка.

Введение

Растяжение элементов конструкций, как правило, происходит с локализацией деформации (образованием шейки). Поэтому при деформировании металлических конструкций в условиях высокотемпературной ползучести выделяют две последовательные стадии деформирования. В течение первой стадии элемент конструкции (образец) сохраняет исходную форму. На второй стадии деформация в образце локализуется, появляется шейка, дальнейшее деформирование происходит в основном в шейке.

Момент перехода от однородного к неоднородному деформированию представляет большой интерес. Впервые экспериментальные исследования образцов при одноосном растяжении в условиях высокотемпературной ползучести были проведены в начале XX века. Среди отечественных исследователей следует отметить работы Ю.Н. Работнова [1], Л.М. Качанова [2], Н.Н. Малинина [3], С.А. Шестерикова [4],

* Выполнено при финансовой поддержке РФФИ (грант №16-38-60200).

А.М. Локошенко [5], О.В. Соснина [6], В.П. Радченко [7] и многих других ученых. Известны многочисленные экспериментальные и теоретические исследования образования и развития шейки в материалах, как правило, при испытаниях в условиях комнатной температуры [8–13].

1. Анализ экспериментально-теоретических работ

В статье [7] приведен сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по длительной прочности для тонкостенных трубчатых образцов из стали 12X18H10T при $T = 850$ °С. По представленным кривым деформирования можно заключить, что момент локализации деформаций происходит непосредственно перед разрушением, причем время до момента локализации составляет 95–99% от времени до полного разрушения образца.

Влияние скорости деформации на процесс локализации применительно к титановому сплаву ОТ-4 и стали 15 выполнено А.А. Ершовым [14]. Показано, что большее влияние, чем скорость деформирования, на сплав ОТ-4 оказывает температура. Для стали 15 увеличение скорости деформирования приводит к возрастанию участка упрочнения, что увеличивает степень равномерности деформаций заготовки.

Момент локализации деформаций связан с изменением количества дислокаций в материале [15]. Показано, что при одинаковых значениях действующего напряжения количество дислокаций в зоне кристаллографического сдвига в алюминии на порядок выше, чем в меди, и на порядок ниже, чем в свинце.

В ряде случаев некоторые сечения отличаются от соседних сечений меньшей сопротивляемостью растяжению в исходном состоянии, в этом случае шейка появляется уже на стадии нагружения. Структурное состояние различных сечений образцов исследовались в [16, 17].

При растяжении образцов из циркония и алюминия, предварительно деформированных на ~450% для получения мелкозернистого материала, наблюдалась их повышенная склонность к образованию шейки по сравнению с недеформированными образцами [18].

Различные подходы к описанию напряженно-деформированного состояния в области шейки образцов представлены в публикациях [19–22], в которых при анализе деформирования цилиндрических образцов было получено приближенное аналитическое распределение напряжений и деформаций вдоль радиуса в наименьшем сечении шейки.

Для описания экспериментальных данных по ползучести образцов при растяжении и их дальнейшего использования при проверке теоретических гипотез очень важно знать момент времени, при котором появляется шейка. В статье [23] исследовались локальные продольные деформации образца и отмечался момент образования шейки с помощью анализа фотографий его рабочей части.

В настоящей статье не учитывается структурное состояние различных сечений образцов при образовании и развитии шейки, предполагается справедливой гипотеза плоских сечений, считается, что действующие напряжения по поперечному сечению образца одинаковы.

2. Постановка и проведение исследований

Для проведения экспериментов применялись образцы круглого поперечного сечения из алюминиевого сплава Д16Т. Образцы изготавливались на токарном станке

в соответствии с ГОСТ 9651-84. Испытания образцов проводились при рабочей температуре 400 °С. Начальные значения диаметра d_0 , длины рабочей части l_0 и величины начальных напряжений растяжения для цилиндрических образцов σ_0 приведены в таблице 1.

Таблица 1

№	d_0 , мм	l_0 , мм	σ_0 , МПа
1	5	31	19,6
2	5	26	19,6
3	5	26	19,6
4	5	28	19,6
5	5	28	24,5
6	5	27	19,6
7	5	28	19,6
8	4	24	24,5
9	4	24	24,5
10	4	24	17,6
11	4	23	17,6

Высокотемпературные испытания проводились при постоянной растягивающей силе. Образец помещался внутри закрытой печи. Автором разработана методика бесконтактных измерений [24, 25], которая позволила исследовать появление и развитие шейки в образцах при высокой температуре. Геометрия образца определялась по фотографиям, полученным в процессе эксперимента. Разработанная система состоит из модернизированной печи, специального фотоаппарата и компьютерного комплекса. Для визуальной оценки и фотографирования изменений геометрии образца в процессе его деформирования в кожухе печи на боковой поверхности прорезано отверстие, закрытое высокотемпературным оптическим кварцевым стеклом, внутри печи осуществлялось освещение кварцевой лампой. Компьютерный комплекс состоит из трех программ: распознавателя (производит выделение образца в кадре и измерение его размеров), решателя (вычисляет все необходимые параметры и формирует полученные данные) и постобработчика (строит графики) [26].

Испытания проводились в НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова на установке ИМЕХ-5. Образец укреплялся в тросах испытательной машины при помощи захватов. Для измерения перемещений использовались фотоаппарат NIKON D300s с объективом NIKKOR 80-200 мм и удлинительное кольцо 12 мм для фотографирования с близкого расстояния. Устанавливалось фокусное расстояние 130 мм, а фотоаппарат размещался на расстоянии одного метра от печи. Образец нагревался до рабочей температуры. После достижения заданного уровня температуры включался фотоаппарат. Разработанный и изготовленный автором прибор обеспечивал фотографирование через заданный интервал удлинения образца. Производилось быстрое нагружение образца до заданного уровня начального напряжения. Дальнейшее деформирование происходило в условиях ползучести при постоянной растягивающей силе вплоть до разрушения.

Дополнительно к оптической системе измерений [25] был установлен контактный датчик, измеряющий удлинение образца по захватам машины, который был подключен к системе измерения HBM Spider 8. По информации об удлинении образца, полученной с помощью этого датчика, проведена оценка точности измере-

ний, проведенных оптической системой. Расхождение данных, полученных двумя этими способами, не превышает 4% от диаметра образца.

3. Определение момента времени появления шейки

Рассмотрим возможные критерии определения момента времени начала локализации деформации (образования шейки).

В качестве критерия появления шейки можно задать условие, при котором разность между максимальным $d_{\max}(t)$ и минимальным $d_{\min}(t)$ диаметрами образца в рабочей части достигает некоторой критической величины k_1 в момент времени τ_1 :

$$d_{\max}(t) - d_{\min}(t) \geq k_1. \quad (1)$$

Другой критерий использует величину

$$\nu(t) = \max_x |M[\Delta d(t, x)] - \Delta d(t, x)|.$$

Здесь $\Delta d(t, x) = d(t, x) - d(0, x)$, где $d(t, x)$ – диаметр образца в точке x в момент времени t , $M[\Delta d(t, x)]$ – среднее арифметическое величины $\Delta d(t, x)$ по x в момент времени t . Условием появления шейки является достижение величиной ν значения k_2 :

$$\nu(t) \geq k_2. \quad (2)$$

Однако с помощью этих критериев невозможно исключить влияние шумовой составляющей при измерении диаметра образца в экспериментах.

Рабочие варианты критериев удалось получить при введении в рассмотрение однородно деформирующегося образца, который деформируется по тому же закону изменения длины $l(t)$, что и реальный образец, но сохраняет однородную деформацию всей рабочей области, то есть диаметр образца $d^0(t)$ один и тот же по всей длине рабочей области образца. Для такого образца выполняется соотношение:

$$d^0(t) = 2r_0 \sqrt{\frac{l_0}{l(t)}}. \quad (3)$$

Здесь r_0 – радиус образца в начальный момент времени.

В этом случае полагаем, что шейка образуется в момент времени τ_3 при условии

$$\varphi(t) \geq k_3, \quad (4)$$

где $\varphi(t) = d^0(t) - \min_x d(t, x)$.

На рис. 1 приведены зависимости величины $\varphi(t)$ (пунктирные кривые) для экспериментов №2 ($k_3 = 0,1$ мм, рис. 1а) и №9 ($k_3 = 0,2$ мм, рис. 1б) из таблицы 1, показаны моменты образования шейки, описанные для удобства наглядности с помощью величины Ψ_3 (полагаем, что $\Psi_3 = 0$ при отсутствии шейки и $\Psi_3 = 1$ при наличии шейки). Появление колебаний функции Ψ_3 связано с колебаниями значений измеренного минимального диаметра $\min_x d(t, x)$, полученных экспериментально.

Рассмотрим еще один критерий образования шейки. Для однородно деформирующегося образца определяются напряжения $\sigma(t, x)$ в сечении, где имеет место $\min_x d(t, x)$, и напряжения $\sigma^0(t)$, соответствующие величине $d^0(t)$. Полагаем, что шейка образуется в момент времени τ_4 при условии:

$$\max_x (\sigma(t, x) - \sigma^0(t)) \geq k_4. \quad (5)$$

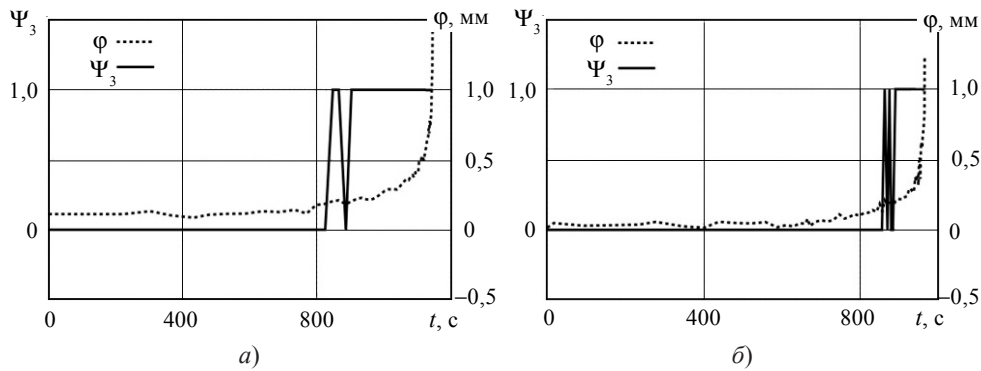


Рис. 1

На рис. 2 изображены кривые сглаженных значений $\max_x \sigma(t, x)$ и $\sigma^0(t)$ (штриховая и пунктирная линии), а также моменты образования шейки, описанные для удобства с помощью критерия Ψ_4 (считаем, что $\Psi_4 = 0$ при отсутствии шейки и $\Psi_4 = 40$ МПа при наличии шейки), для эксперимента №2. Полагаем, что $k_4 = 0,3$ МПа (рис. 2а) и $k_4 = 1,4$ МПа (рис. 2б). На рисунке приведена кривая несглаженного значения $\max_x \sigma(t, x)$ (тонкая сплошная линия), всплески на которой объясняют колебания кривых Ψ_4 . Значение времени, при котором появление шейки определено визуально, показано вертикальной стрелкой.

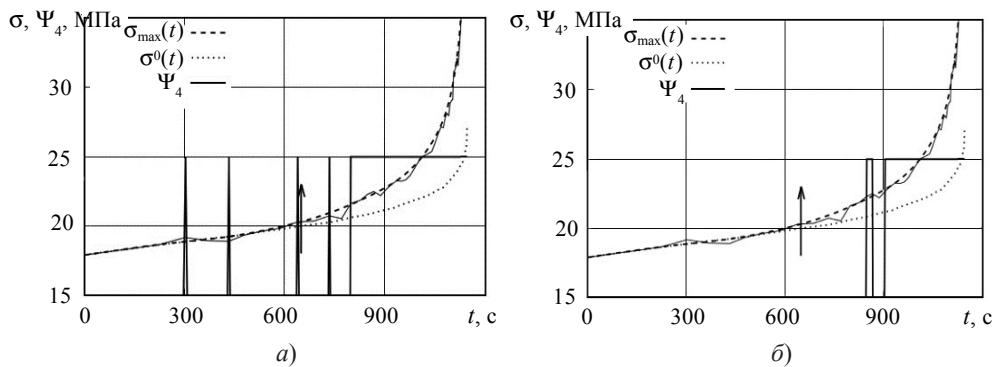


Рис. 2

Величина параметра $k_4 = 1,4$ МПа принята для исключения шумовой составляющей применяемой системы измерения. Влияние шума видно на рис. 2а. Представляется, что критерий локального повышения растягивающего напряжения можно считать основным для определения момента локализации.

Сводные данные по проведенным экспериментам приведены в таблице 2. В таблице помимо абсолютного времени τ появления шейки приведено относительное время $\bar{\tau} = \tau/t^*$ (t^* – время до разрушения образца). Среднее значение времени появления шейки $\bar{\tau}_3$ по критерию, когда текущие диаметры образца сравниваются с диаметром однородно деформирующегося образца (Ψ_3) в экспериментах при растяжении цилиндрического образца для значения параметра $k_3 = 0,1$ мм, составляет 80%, а для значения параметра $k_3 = 0,2$ мм составляет 84,5%. По критерию локального повышения растягивающего напряжения для значения параметра $k_4 = 0,3$ МПа $\bar{\tau}_4$ составляет 61,5%, а для значения параметра $k_4 = 1,4$ МПа составляет

85,2%. По визуальному способу определения момент образования шейки составляет 53% (среднее значение) от времени до разрушения. Значения параметров k_3 и k_4 должны выбираться минимальными для идентификации образования шейки сразу после ее появления, вместе с тем они должны исключать ложную идентификацию шейки из-за наличия шумовой составляющей.

Таблица 2

№	$k_3 = 0,1$ мм		$k_3 = 0,2$ мм		$k_4 = 0,3$ МПа		$k_4 = 1,4$ МПа	
	τ_3 , с	$\bar{\tau}_3$, %	τ_3 , с	$\bar{\tau}_3$, %	τ_4 , с	$\bar{\tau}_4$, %	τ_4 , с	$\bar{\tau}_4$, %
1	1600	92	1660	95	1250	72	1620	93
2	–	–	820	72	650	57	850	74
3	1310	82	1400	88	1250	79	1390	87
4	900	80	900	80	620	55	880	78
5	540	78	610	88	470	68	550	79
6	850	59	1400	98	710	50	1100	77
7	1250	73	1500	87	1000	58	1330	77
8	–	–	350	46	350	46	640	83
9	750	78	850	88	750	78	950	98
10	2520	88	2700	94	1900	66	2800	98
11	1580	90	1650	94	820	47	1630	93
Средние значения	80,0		84,5		61,5		85,2	

Заключение

Использование критериев, основанных на исследовании однородно деформируемого образца, показывает, что время равномерного деформирования может занимать около 60% жизненного цикла образца, это необходимо учитывать при расчетах. По визуальному способу определения момента образования шейки время локализации составляет 53%. Представляется, что для оценки момента появления шейки наиболее целесообразно использовать критерий локального повышения растягивающего напряжения.

Время образования шейки, приведенное в настоящей статье, занижено относительно реального времени ее образования. В качестве дальнейшего уточнения используемых зависимостей необходимо увеличивать количество образцов в эксперименте, так как разброс между минимальными и максимальными значениями времени появления шейки составил от 11 до 33% от времени до разрушения образца.

Автор выражает благодарность А.М. Локощенко за ценные советы и правку рукописи.

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Наука, 1966. 752 с.
2. Качанов Л.М. *Теория ползучести*. М.: Физматгиз, 1960. 456 с.
3. Малинин Н.Н. *Прикладная теория пластичности и ползучести*. М.: Машиностроение, 1975. 400 с.
4. Шестериков С.А., Лебедев С.Ю., Юмашева М.А. Новые функциональные соотношения для описания процессов ползучести и длительной прочности. *Материалы IX конференции по прочности и пластичности*. М. 1996. Т. 3. С. 130–134.
5. Локощенко А.М. *Ползучесть и длительная прочность металлов*. М.: Физматлит, 2016. 504 с.

6. Любашевская И.В., Соснин О.В. Об оценках интенсивности процессов высокотемпературной ползучести элементов конструкций. *Математическое моделирование и краевые задачи*. 2004. Т. 1. С. 132–135.
7. Радченко В.П., Небогина Е.В., Андреева Е.А. Структурная модель разупрочняющегося при ползучести материала в условиях сложного напряженного состояния. *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2009. №1 (18). С. 75–84.
8. Панин В.Е., Гриняев Ю.Г., Панин А.В. Полевая теория многоуровневого пластического течения в шейке деформируемого твердого тела. *Физическая мезомеханика*. 2007. №5. С. 5–16.
9. Степанов С.Л. Экспериментальные исследования разрушения материалов при шейкообразовании и локализации пластических деформаций по жесткопластической схеме Оната и Прагера. *Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*. 2004. Вып. 26. С. 127–130.
10. Дерюгин Е.Е., Панин В.Е., Шмаудер З., Стороженко И.В. Эффекты локализации деформации в композитах на основе Al с включением Al_2O_3 . *Физическая мезомеханика*. 2001. Т. 4. №3. С. 35–47.
11. Данилов В.И., Зуев Л.Б., Летахова Е.В., Орлова Д.В., Охрименко И.А. Типы локализации пластической деформации и стадии диаграмм нагружения металлических материалов с различной кристаллической структурой. *ПМТФ*. 2006. Т. 47. №2. С. 176–184.
12. Никитин Л.В., Рыжак Е.И. Об осуществимости состояний материала, соответствующих «падающему» участку диаграммы. *Изв. АН СССР. МТТ*. 1986. №2. С. 155–161.
13. Лебедев А.А., Чаусов Н.Г., Марусий О.И. и др. Кинематика разрушения листовой аустенитной стали на заключительной стадии деформирования. *Проблемы прочности*. 1989. №3. С. 16–21.
14. Ершов А.А. Локализация деформаций при различных скоростях нагружения. В сб. *Матер. XIV Международ. науч.-техн. Уральской школы-семинара металлургов – молодых ученых*. Новосибирск: Изд-во УрФУ, 2013. С. 172–174.
15. Колупаева С.Н., Петелин А.Е. Локализация деформаций в зоне сдвига в ГЦК материалах. *Вестник Тамбовского университета. Сер. Естественные и технические науки*. 2013. Т. 18. №4-2. С. 1560–1561.
16. Беликова А.Ф., Бураваева С.Н., Гордополов Ю.А. Локализация деформации и связь ее с деформированным состоянием материала. *Журнал технической физики*. 2013. Т. 83. №2. С. 153–155.
17. Иванова Л.А., Травин В.В., Бенеманская Г.В., Макаренко И.В. Эволюция структуры титанового сплава при упругопластическом нагружении. *Вопросы материаловедения*. 2016. №1. С. 11–21.
18. Русин Н.М., Полетика Т.М., Гирсова С.Л., Данилов В.И. Особенности локализации пластической деформации при интенсивном деформировании металлов. *Изв. вузов. Физика*. 2007. Т. 50. №11. С. 43–49.
19. Давиденков Н.Н., Спиридонова Н.И. Анализ напряженного состояния в шейке растянутого образца. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 1945. №6. С. 583–593.
20. Бриджмен П. *Исследование больших пластических деформаций и разрыва*. М.: ИЛ, 1955. 444 с.
21. Ахметзянов М.Х., Албаут Г.Н., Барышников В.Н. Исследование локализации деформаций и напряжений в шейке тонкой полосы методом фотоупругих покрытий. *Физическая мезомеханика*. 2004. Т. 7. Спец. выпуск. Ч.1. С. 347–350.
22. Дерюгин Е.Е. Аналитическое описание распределения пластической деформации в шейке плоского образца при растяжении. *Письма о материалах*. 2011. Т. 1. С. 231–237.
23. Казаков Д.А., Жегалов Д.В. Использование технологий цифровой фотосъемки для изучения полей деформаций. *Проблемы прочности и пластичности*. 2007. Вып. 69. С. 99–105.
24. Терауд В.В. Растяжение цилиндрических образцов при высокой температуре, измеряемое на основе фоторегистратора. *Вестник двигателестроения*. 2013. №2. С. 236–239.
25. Терауд В.В., Валисовский Н.Е. Экспериментальные исследования особенностей локализации деформаций плоских образцов, растягиваемых при высокотемпературной ползу-

чести. *Машиностроение и инженерное образование*. 2015. №2. С. 40–47.

26. Локощенко А.М., Терауд В.В. Метод регистрации и измерения деформаций при температуре на основе фотоаппарата. *Вестник двигателестроения*. 2012. №2. С. 61–64.

References

1. Rabotnov Yu.N. *Polzuchest elementov konstruksiy [Creep of Structural Elements]*. Moscow. Nauka Publ. 1966. 752 p. (In Russian).

2. Kachanov L.M. *Teoriya polzuchesti [Theory of Creep]*. Moscow. Fizmatgiz Publ. 1960. 456 p. (In Russian).

3. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied Theory of Plasticity and Creep]*. Moscow. Mashinostroenie Publ. 1975. 400 p. (In Russian).

4. Shesterikov S.A., Lebedev S.Yu., Yumasheva M.A. Novye funktsionalnye sootnosheniya dlya opisaniya protsessov polzuchesti i dlitelnoy prochnosti [New functionality in relation to the description of processes and creep rupture strength]. *Materialy IX konferentsii po prochnosti i plastichnosti [Proceedings of the IX Conference of Strength and Plasticity]*. Moscow. 1996. Vol. 3. P. 130–134 (In Russian).

5. Lokoschenko A.M. *Polzuchest i dlitelnaya prochnost metallov [Creep and Long-term Strength of Metals]*. Moscow. Fizmatlit Publ. 2016. 504 p. (In Russian).

6. Lyubashevskaya I.V., Sosnin O.V. Ob otsenkakh intensivnosti protsessov vysokotemperaturnoy polzuchesti elementov konstruksiy [Estimates of the intensity of the processes of high-temperature creep of structural elements]. *Matematicheskoe modelirovanie i kraevye zadachi. [Mathematical Modeling and Boundary Problems]*. 2004. Iss.1. P. 132–135 (In Russian).

7. Radchenko V.P., Nebogina E.V., Andreeva E.A. Strukturnaya model razuprochnyayushchegosya pri polzuchesti materiala v usloviyakh slozhnogo napryazhennogo sostoyaniya [Structural model of material softening at creep under complex stress conditions]. *Vestnik Samarskogo gos. tekhn. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki [Journal of Samara State Technical University. Ser. Physical and Mathematical Sciences]*. 2009. No 1 (18). P. 75–84 (In Russian).

8. Panin V.E., Grinyaev Yu.V., Panin A.V. Polevaya teoriya mnogourovnevnogo plasticheskogo techeniya v sheyke deformiruemogo tverdogo tela [Field theory of multilevel plastic flow in the neck of a deformed solid]. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2007. No 5. P. 5–16 (In Russian).

9. Stepanov S.L. Eksperimentalnye issledovaniya razrusheniya materialov pri sheykoobrazovanii i lokalizatsii plasticheskikh deformatsiy pozhestkoplasticheskoy skheme Onata i Pragera [Experimental study of fracture of materials under formation of neck and localization of plastic deformation for rigid-plastic diagram Onate and Prager]. *Vestnik Samarskogo gos. tekhn. un-ta. Ser. Fiz.-mat. nauki [Journal of Samara State Technical University, Ser. Physical and Mathematical Sciences]*. 2004. Iss. 26. P. 127–130 (In Russian).

10. Deryugin E.E., Panin V.E., Schmauder S., Storozhenko I.V. Effekty lokalizatsii deformatsii v kompozitakh na osnove Al s vklyucheniem Al_2O_3 [Effects of deformation localization in Al-based composites with Al_2O_3 inclusions]. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2001. Vol. 4. No 3. P. 35–47 (In Russian).

11. Danilov V.I., Zuev L.B., Letakhova E.V., Orlova D.V., Okhrimenko I.A. Tipy lokalizatsii plasticheskoy deformatsii i stadii diagramm nagruzheniya metallicheskikh materialov s razlichnoy kristallicheskoy strukturoy [Types of localization of plastic deformation and stages of loading diagrams of metallic materials with different crystalline structures]. *Prikladnaya mekhanika i tekhnicheskaya fizika [Journal of Applied Mechanics and Technical Physics]*. 2006. Vol. 47. No 2. P. 176–184 (In Russian).

12. Nikitin L.V., Ryzhik E.I. Ob osushchestvivosti sostoyaniya materiala, sootvetstvuyushchikh niskhodyashchemu uchastku diagrammy [On the feasibility of the state of the material corresponding to the downstream portion of the deformation diagram]. *Izvestiya AN SSSR. MTT [Mechanics of Solids]*. 1986. No 2. P. 155–161 (In Russian).

13. Lebedev A.A., Chausov N.G., Marusii O.I. et al. Kinematika razrusheniya listovoy austenitnoy stali na zaklyuchitelnoy stadii deformirovaniya [The kinematics of fracture of austenitic

steel sheet at the final stage of deformation]. *Problemy prochnosti [Strength of Materials]*. 1989. No 3. P. 16–21 (In Russian).

14. Ershov A.A. Lokalizatsiya deformatsiy pri razlichnykh skorostyakh nagruzheniya [Strain localization under various loading rates]. *Materialy XIV Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy Uralskoy shkoly-seminara metallovedov – molodykh uchenykh [Publication of XIV International Scientific and Technical the Ural School Seminar of Metallurgists – Young Scientists]*. Novosibirsk. UrFU Publ. 2013. P. 172–174 (In Russian).

15. Kolupaeva S.N., Petelin A.E. Lokalizatsiya deformatsiy v zone sdviga v GTsK materialakh [Localization of deformation in slip zone of FCC materials]. *Vestnik Tambovskogo universiteta. Ser. Estestvennye i tekhnicheskie nauki [Vestnik TSU. A Series of Natural and Technical Sciences]*. 2013. Vol. 18. No 4-2. P. 1560–1561 (In Russian).

16. Belikova A.F., Buravova S.N., Gordoplov Yu.A. Lokalizatsiya deformatsii i svyaz ee s deformirovannym sostoyaniem materiala [Localization of deformation and its connection with the strain of the material]. *Zhurnal tekhnicheskoy fiziki [Technical Physics. The Russian Journal of Applied Physics]*. 2013. Vol. 83. No 2. P. 153–155 (In Russian).

17. Ivanova L.A., Travin V.V., Benemanskaya G.V., Makarenko I.V., Petrov V.N. Evolyutsiya struktury titanovogo splava pri uprugoplasticheskom nagruzhenii [Evolution of titanium alloy structure under elastoplastic loading]. *Voprosy materialovedeniya [Inorganic Materials: Applied Research]*. 2016. No 1. P. 11–21 (In Russian).

18. Rusin N.M., Poletika T.M., Girsova S.L., Danilov V.I. Osobennosti lokalizatsii plasticheskoy deformatsii pri intensivnom deformirovanii metallov [Distinctive features of plastic strain localization under severe plastic deformation of metals]. *Izvestiya vyzov. Fizika [Russian Physics Journal]*. 2007. Vol. 50. No 11. P. 43–49 (In Russian).

19. Davidenkov N.N., Spiridonova N.I. Analiz napryazhennogo sostoyaniya v sheyke rastyanutogo obraztsa [An analysis of the state of stress in the neck of the stretched sample]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov [Industrial Laboratory. Material Diagnostics]*. 1945. No 6. P. 583–593 (In Russian).

20. Bridgman P.W. *Studies in Large Plastic Flow and Fracture: with Special Emphasis on the Effects of Hydrostatic Pressure*. New York. McGraw-Hill. 1952. 444 p.

21. Akhmetzyanov M.Kh., Albaut G.N., Baryshnikov V.N. Issledovanie lokalizatsii deformatsiy i napryazheniy v sheyke tonkoy polosy metodom fotouprugikh pokrytiy [A study of strain and stress localization in the neck of a flat bar by means of photoelastic coating method]. *Fizicheskaya mezomekhanika [Physical Mesomechanics]*. 2004. Vol. 7. Special issue. Part 1. P. 347–350 (In Russian).

22. Deryugin E.E. Analiticheskoe opisaniye raspredeleniya plasticheskoy deformatsii v sheyke ploskogo obraztsa pri rastyazhenii [Analytical description of the distribution of plastic deformation in the neck of the flat tensile sample]. *Pisma o materialakh [Letters on Materials]*. 2011. Vol. 1. No 4. P. 231–237 (In Russian).

23. Kazakov D.A., Zhegalov D.V. Ispolzovanie tekhnologiy tsifrovoy fotos"emki dlya izucheniya polya deformatsiy [Using digital photography techniques for studying strain fields]. *Problemy prochnosti i plastichnosti [Problems of Strength and Plasticity]*. 2007. Iss. 69. P. 99–105 (In Russian).

24. Teraud W.V. Rastyazhenie tsilindricheskikh obraztsov pri vysokoy temperature, izmeryaemoe na osnove fotoregistratora [Stretching of the cylinder specimen under high temperature measured based on the camera]. *Vestnik dvigatelestroeniya [Herald Engine]*. 2013. No 2. P. 236–239 (In Russian).

25. Teraud W.V., Valisovskiy N.E. Eksperimentalnye issledovaniya osobennostey lokalizatsii deformatsiy ploskikh obraztsov, rastyagivaemykh pri vysokotemperaturnoy polzuchesti [Experimental research of particularities of strain localization in the plane tensile specimens at high temperature creep]. *Mashinostroenie i inzhenernoe obrazovanie [Engineering and Engineering Education]*. 2015. No 2. P. 40–47 (In Russian).

26. Lokoshchenko A.M., Teraud W.V. Metod registratsii i izmereniya deformatsiy pri vysokoy temperature na osnove fotoapparata [The method of registration and measurement of deformations under high temperature based on the camera]. *Vestnik dvigatelestroeniya. [Herald Engine]*. 2012. No 2. P. 61–64 (In Russian).

**ESTIMATING THE MOMENT OF FORMATION OF CREEP LOCALIZATION
IN SPECIMENS OF A CIRCULAR CROSS-SECTION
BASED ON GEOMETRICAL CRITERIA**

Teraud W.V.

Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

The results of experimentally investigating creep in cylindrical specimens of an aluminum alloy loaded in tension under the temperature of 400 °C are presented. The problem of localization of deformations in such specimens for different initial tensile stresses is considered. The use of a non-contact measuring system developed by the author made it possible to derive relations for the change of form of the specimens and the stress in the specimen as a function of time, which were then used for formulating criteria for the evaluation of the time of deformation localization in specimens. A relative time interval of damping during which the specimen is uniformly deformed in tension is evaluated. It is shown that the moment of formation of localization evaluated using the criteria formulated in the present article is underestimated as compared with the realistic time of necking in the specimen.

Keywords: experiment, tension, creep, high temperature, deformation localization, thinning, neck.