

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ПРОВЕРКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО КРИТЕРИЯ УСТОЙЧИВОГО РАСТЯЖЕНИЯ ПРИ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ*

В.В. Терауд

В работе рассмотрен процесс потери устойчивости (локализации деформаций) при ползучести растягиваемых образцов. На основе постулата устойчивости Друккера получено математическое неравенство, характеризующее потерю устойчивости в процессе ползучести растягиваемого образца. На примере использования известных экспериментальных данных о ползучести различных материалов и применения теоретического критерия Друккера, были получены значения моментов начала неустойчивого растяжения (моментов образования шейки).

Ключевые слова: ползучесть, локализация деформаций, шейка, устойчивость, теория.

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF THE THEORETICAL CRITERION FOR THE STABILITY OF STRETCHING DURING CREEP FOR HARDENING MATERIALS

W.V. Teraud

The process of loss of stability (localization of deformations) in the creep of stretch samples is considered. On the basis of the Drucker stability postulate, a mathematical inequality is obtained for the stable stretching of the sample. Using the known experimental data on the creep of various materials and applying the theoretical Drucker criterion, the instants of instability of the beginning of the unstable stretching (the moment of neck formation) were obtained.

Keywords: creep, deformation localization, necking, stability, theory.

Введение

Растяжение металлических образцов в процессе ползучести в какой-то момент времени может приводить к потере устойчивости. В этот момент времени τ однородное деформирование переходит в неоднородное, с образованием локализации деформаций (шейки). После этого существенно уменьшается несущая способность образцов.

Одним из классических и самым простым подходом при нахождении τ является временной, согласно которому считается, что $\tau \approx (0,9 \div 0,95) \cdot t^*$, где t^* – длительность процесса ползучести вплоть до разрушения. Однако, отсутствие информации о величине t^* не позво-

ляет определять момент локализации непосредственно в момент проведения эксперимента.

При исследовании процесса ползучести металлов важное значение имеет не только определение накопления деформаций во времени, но и информация о времени до разрушения (т.е. длительная прочность). Для аналитического исследования длительной прочности в конце 50-х гг. XX в. двое выдающихся советских ученых Л.М. Качанов и Ю.Н. Работнов впервые ввели понятие параметра поврежденности и с его помощью описали длительную прочность металлов при одноосном растяжении. Возможности кинетической теории для опи-

* Работа проведена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований, проекты № 16-38-60200 и 17-08-00210.

сания длительной прочности при сложном напряженном состоянии с использованием параметров поврежденности различной природы описаны во многих монографиях [1–4] и др.

Следует отметить, что в ряде случаев до общего разрушения возможна неустойчивость процесса ползучести, при которой в некоторых сечениях образца или элемента конструкции появляется шейка.

Экспериментальное определение момента появления шейки рассмотрено в испытаниях различных авторов, например в работе [5].

Для определения момента появления шейки разными учеными используются различные подходы.

Критерии, использующие силовой подход для определения момента появления шейки, рассмотрены в работах [6–8].

Развитие деформационного подхода предложил Г.А. Малыгин [9], который заключил, что однородная деформация $\varepsilon_0 < n$ полностью определяется показателем степени n в степенном законе ползучести.

Испытания металлов на ползучесть при растяжении обычно проводятся при высокой температуре, т.е. внутри закрытой печи, поэтому единственная характеристика деформированного состояния, которую можно измерить в реальных опытах, – это зависимость деформации ползучести образца p от времени t . В работе [10] для измерения дополнительных параметров деформируемого образца предложено периодически останавливать испытания на ползучесть, однако охлаждение образцов и последующее нагревание могут оказывать значительное влияние на характер кривой ползучести. Поэтому важно, чтобы можно было только по классическим данным кривых ползучести $p(t)$ определять момент локализации деформаций.

Целью данной работы является нахождение теоретического момента появления локализации деформаций на основе стандартных экспериментальных данных $p(t)$, получаемых при высокотемпературной ползучести материала.

Конкретизация постулата Друккера в случае одноосного растяжения

При теоретическом исследовании явления устойчивости процесса ползучести часто используется постулат Друккера [11]. Различные особенности применения этого постулата в разных задачах изложены в статьях и в ряде монографий [12, 13] и др.

Согласно постулату устойчивости, предложенному Друккером для реономных сред [11], деформирование материала в изотермических условиях устойчиво в малом, если мощность бесконечно малых приращений обобщенных сил dQ_i на бесконечно малых приращениях соответствующих скоростей обобщенных перемещений dv_i неотрицательна:

$$dQ_i dv_i \geq 0. \quad (1)$$

В общем случае неустойчивость деформирования всего тела и неустойчивость деформирования наиболее напряженного элемента заготовки (локальная неустойчивость) наступают не одновременно. Если под Q_i понимать внешние обобщенные силы, то постулат Друккера позволяет проанализировать устойчивость всего тела.

Авторы работы [12] при рассмотрении простого нагружения в условиях плоского напряженного состояния представили компоненты тензоров напряжений и скоростей деформаций ползучести через соответствующие интенсивности σ_n и $\dot{p}_n$:

$$\sigma_i = \varphi_i \cdot \sigma_n, \quad \dot{p}_i = \psi_i \cdot \dot{p}_n \quad (i=1, 2),$$

где φ_i, ψ_i – некоторые функции времени.

На основе неравенства (1) они получили условие устойчивого деформирования:

$$1/(z_1 \cdot z_2) + \Phi_1 \dot{p}_n (1/z_1 - 1/z_2) - \Phi_2 \dot{p}_n^2 \geq 0, \quad (2)$$

где $\Phi_1 = \psi_i^2 \varphi_i$, $\Phi_2 = \psi_i^3 \varphi_i$, $\frac{1}{z_1} = \frac{d\sigma_n}{\sigma_n dt}$, $\frac{1}{z_2} = \frac{d\dot{p}_n}{\dot{p}_n dt}$.

При одноосном напряженном состоянии условие устойчивого деформирования (1) имеет вид $d(\sigma F) \geq 0$, где F – площадь поперечного сечения. Неравенство (2) в этом случае преобразуется к следующему виду:

$$\frac{1}{z_1 z_2} + \dot{p} \left(\frac{1}{z_1} - \frac{1}{z_2} \right) - \dot{p}^2 \geq 0. \quad (3)$$

В случае малых деформаций ползучести $\sigma = \sigma_0 (1 + p)$, тогда

$$\frac{1}{z_1} = \frac{d\sigma}{\sigma dt} = \frac{\dot{p}}{1+p}, \quad \frac{1}{z_2} = \frac{d\dot{p}}{\dot{p} dt}.$$

Подставляя эти выражения в неравенство (3), получаем

$$\frac{\dot{p}}{1+p} \cdot \frac{\ddot{p}}{\dot{p}} + \dot{p} \left[\frac{\dot{p}}{1+p} - \frac{\ddot{p}}{\dot{p}} \right] - \dot{p}^2 \geq 0.$$

После проведения необходимых преобразований получаем, что устойчивое деформирование при одноосном растяжении характеризуется следующим неравенством:

$$\ddot{p} + \dot{p}^2 \leq 0. \quad (4)$$

Для удобства введем функцию

$$\Theta = \ddot{p} + \dot{p}^2, \quad (5)$$

тогда условие устойчивости (4) преобразуется к виду:

$$\Theta \leq 0. \quad (6)$$

Экспериментальная проверка

Для существования решения неравенства (4) необходимо, чтобы кривая $p(t)$ имела выпуклость вверх. Это соответствует экспериментальным данным, согласно которым имеется развитая неустановившаяся стадия ползучести – стадия упрочнения. Рассмотрим различные экспериментальные данные и вычислим теоретические значения времен, при которых появляется локализация деформаций.

Экспериментальные данные в литературе обычно представлены в виде графических зависимостей $p(t)$. Для применения неравенства (4) необходимо иметь точные численные значения времени t и соответствующие значения деформации ползучести p . Процесс преобразования графических данных (оцифровка) выглядит следующим образом. Отсканированный график распознавался в программе *GetData* [14], с помощью которой получались численные значения пар (t', p') . В зависимости от качества напечатанного графика с кривыми, полученные

пары имели различный уровень микроколебаний. Поэтому по парам (t', p') строилась интерполяционная кривая, по которой затем вычислялись новые пары точек (t, p) , в среднем по 200 пар на каждую кривую. В дальнейшем именно пары (t, p) были использованы при вычислении момента локализации. Это позволило практически полностью исключить случайные колебания кривой при печати и ошибки распознавания графиков.

Далее приведены результаты трех серий экспериментов на ползучесть, анализ которых позволяет с помощью неравенства (5)–(6) определить время появления локализации деформаций ползучести.

В работе В.П. Радченко с соавторами [15] приведены результаты испытаний на ползучесть при растяжении упрочненных цилиндрических полых образцов из сплава Д16Т при 125 °С. На рис. 1, а представлены кривые ползучести при трех значениях начального напряжения σ_0 : 353, 385 и 406 МПа (кривые 1, 2 и 3 соответственно).

По оцифрованным данным кривых на рис. 1, а построены пары точек (t, p) для каждой кривой. Численное дифференцирование производилось по первому порядку точности, как для первой, так и для второй производной. Полученные зависимости Θ изображены на рис. 1, б. В момент времени t , при котором $\Theta = 0$, по теоретической модели происходит потеря устойчивого растяжения, и образуется шейка. Для трех приведенных значений σ_0 моменты локализации t следующие: 45, 70 и 100 ч соответственно.

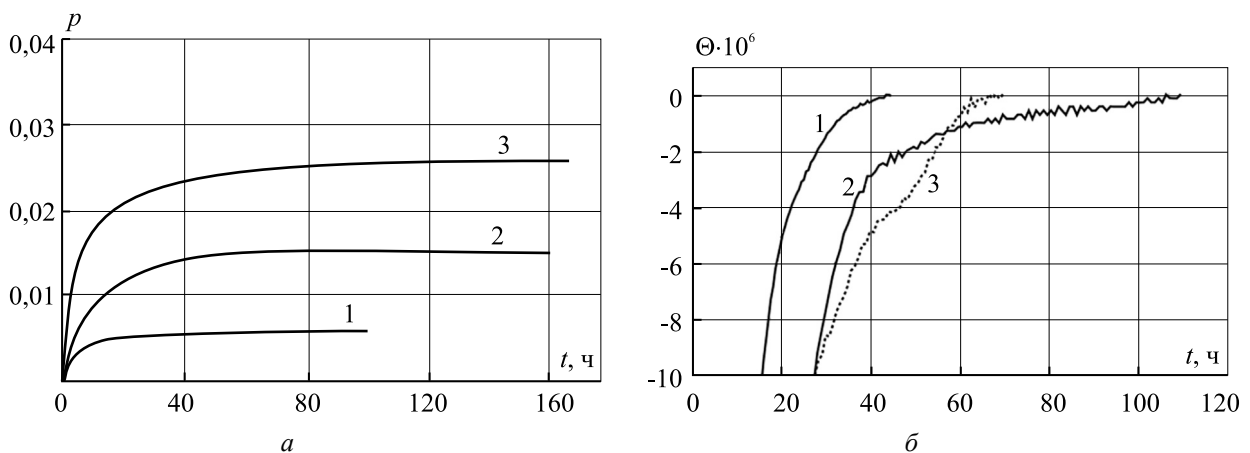


Рис. 1. Среднеинтегральные экспериментальные кривые ползучести образцов сплава Д16Т при температуре 125 °С [15] (а) и зависимости $\Theta(t)$ (б) при различных значениях σ_0 : 1 – 353 МПа, 2 – 385 МПа, 3 – 406 МПа

Авторы статьи [16] представили данные деформации ползучести (одноосное растяжение) и микроструктурной эволюции модифицированной стали 9Cr-1M при 550 °C на цилиндрических образцах (с рабочей длиной 32 мм и диаметром 6,25 мм). В работе [16] приведены зависимости $p(t)$ и $\dot{p}(t)$ для трех значений σ_0 : 250, 260 и 275 МПа. Расчеты теоретического момента τ потери устойчивого растяжения производились по зависимости $\dot{p}(t)$, так как ошибка вычисления в этом случае ниже, чем при вычислениях по $p(t)$, эти данные представлены на рис. 2, а. На рис. 2, б представлены зависимости $\Theta(t)$, вычисленные с помощью выражения (5). Вычисления показали, что для трех приведенных значений σ_0 величины τ , характе-

ризующие появление локализации: 300, 53,5, 21,3 ч соответственно. Зависимость $\tau(\sigma_0)$ имеет убывающий характер.

В работе [17] представлены результаты испытаний на ползучесть при растяжении циркониевого сплава R60702 при температуре 200 °C, для испытаний были использованы образцы прямоугольного сечения 10×3 мм. На рис. 3 приведены кривая ползучести $p(t)$ и соответствующая этому процессу ползучести зависимость $\Theta(t)$. Вычисления, проведенные с помощью выражений (5)–(6), показали, что неравенство $\Theta < 0$ выполняется при любом значении $t \geq 0$. Это означает, что в данном испытании момент потери устойчивости τ по выражениям (5)–(6) совпадает со временем начала деформирования.

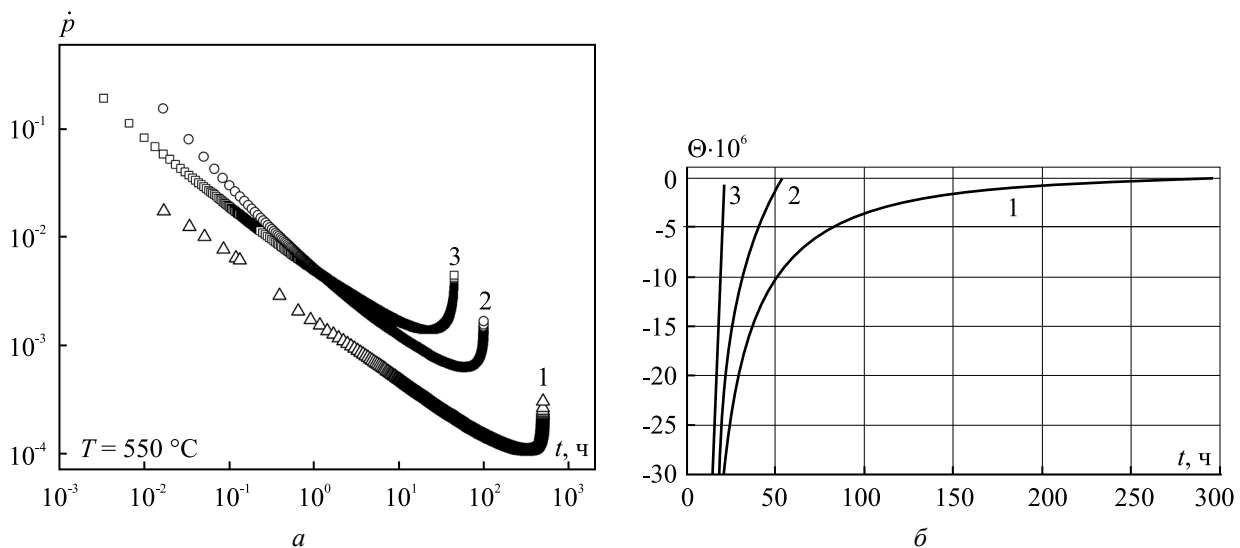


Рис. 2. Экспериментальные зависимости $\dot{p}(t)$ [6] при трех значениях σ_0 (а) и зависимости $\Theta(t)$ (б):
1 – 250 МПа, 2 – 260 МПа, 3 – 275 МПа

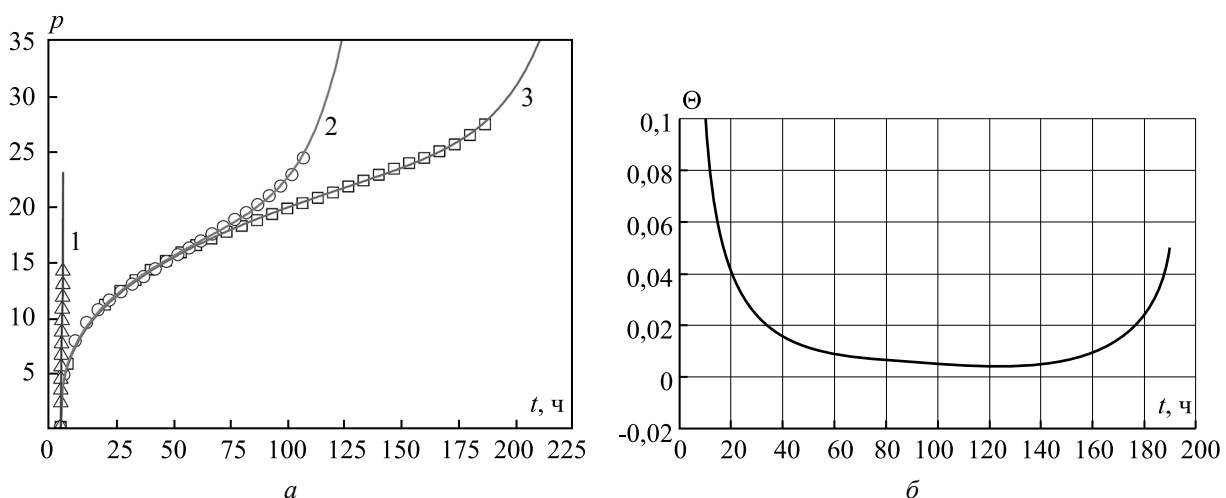


Рис. 3. Ползучесть сплава R60702 при 200 °C [17] (а) и зависимость $\Theta(t)$ при $\sigma_0 = 145$ МПа (б):
1 – 180 МПа, 2 – 162 МПа; 3 – 145 МПа

Заключение

Проведен анализ устойчивого растяжения образца (без локализации деформаций) в условиях ползучести на основе постулата устойчивости Друккера. Приведены примеры расчета для нескольких серий экспериментов, для которых потеря устойчивого растяжения происходит в процессе ползучести или с самого начала деформирования.

Автор выражает благодарность А.М. Локощенко за полезное обсуждение полученных результатов.

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966. – 752 с.
2. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука, 1974. – 312 с.
3. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: Ин-т гидродин. им. М.А. Лаврентьева, 1986. – 96 с.
4. Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов. М.: Физматлит, 2016. 504 с. (перевод: Lokoshchenko A.M. Creep and long-term strength of metals. CISP. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca. Raton. London. New York. 2018. 545 p.).
5. Терауд В.В. Экспериментальные критерии образования локализации деформаций ползучести в прямоугольных образцах при высокой температуре // Вестник машиностроения. 2017. № 7. С. 28–34.
6. Swift H. Plastic instability under plane stress // J. Mechanics Physics Solids. 1952. Vol. 1. P. 1–18.
7. Hill R. On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets // J. Mechanics Physics Solids. 1952. Vol. 1. P. 19–30.
8. Hora P., Tong L., Reissner J. A prediction method for ductile sheet metal failure in FE-simulation // Proc. of NUMISHEET'96 Conference. MI. USA. 1996. P. 252–256.
9. Malygin G.A. Influence of the grain size on the resistance of micro and nanocrystalline metals against the neck like localization of plastic deformation // Physics of the Solid State. 2011. Vol. 53. No. 2. 363–368.
10. Nirmal K. Constant-load tertiary creep in nickel-base single crystal superalloys // Materials Science and Engineering. 2006. Vol. 432. P. 129–141.
11. Drucker D. A definition of stable inelastic material // Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech. 1959. Vol. 6. No. 1. P. 101. (рус. перев.: Механика. Сб. перев., 1960. № 2. С. 55).
12. Малинин Н.Н., Романов К.И. Устойчивость двухосного растяжения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1981. № 1. С. 133–136.
13. Цвелодуб И.Ю. Постулат устойчивости и его приложения в теории ползучести металлических материалов. Новосибирск: Институт гидродинамики СО РАН, 1991. – 100 с.
14. Digitize scanned graphs and get original (x, y) data. URL: <http://getdata-graph-digitizer.com> (дата обращения: 15.06.2018).
15. Экспериментальное исследование кинетики остаточных напряжений в упрочненных полых цилиндрических образцах из сплава Д16Т при осевом растяжении в условиях ползучести / В.П. Радченко, В.А. Курпичев, В.В. Лунин, А.П. Филатов, А.П. Морозов // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки. 2016. Т. 20. № 2. С. 290–305.
16. Guguloth K., Roy N. Creep deformation behavior of 9Cr1MoVNb (ASME Grade 91) steel // Materials Science & Engineering. 2017. Vol. 680. P. 388–404.
17. Yang X., Ling X. Application of a composite model in the analysis of creep deformation at low and intermediate temperatures. Preprints 2017, 2017050188 (doi: 10.20944/preprints201705.0188.v1). P. 1–9.

**ТЕРАУД
Валентин Викторович**

E-mail: ldrnww@gmail.com
Тел.: (495) 939-52-78

Кандидат технических наук, старший научный сотрудник НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова и Института проблем управления им. В.А.Трапезникова РАН. Сфера научных интересов: технологические процессы, осуществляемые в условиях высокотемпературной ползучести. Автор 50 научных работ.