

## A METHOD OF CALCULATING CREEP LIMITS

V. V. Nazarov<sup>1\*</sup>, A. R. Lepeshkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Institute of Mechanics Lomonosov Moscow State University*

<sup>2</sup>*Central Institute of Aviation Motors (CIAM)*

\*Corresponding author. E-mail: [inmec130@mail.ru](mailto:inmec130@mail.ru);

address for correspondence: Michurinsky prospekt, 1, 119192, Moscow, Russian Federation;  
tel.: +7 (977) 353 46 97

The paper reports a method for calculating creep limits. It presents results of the processing of experimental data obtained by different scientists on creep rupture under uniaxial tension. As a time approximation at the moment of fracture, a fractional power-law dependence with four material parameters is used, two of the parameters having a physical meaning of creep limits. The material parameters of the materials are computed from the condition of the minimum total discrepancies of the approximating values relative to the corresponding experimental data.

**Keywords:** *creep rupture, uniaxial tension, creep limit, ultimate short-term strength.*

**DOI:** 10.17804/2410-9908.2017.1.036-042

### References

1. Nazarov V.V. The creep rupture criterion for tube samples under tension and torsion. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2014, no. 12, pp. 57–59. (In Russian).
2. Shesterikov S.A., Yumasheva M.A. Specification of the equation of state in the theory of creep. *Mech. Solids*, 1984, no. 1, pp. 86–92. (In Russian).
3. Dyson B.F., McLean D. Creep of Nimonic 80A in torsion and tension. *Met. Sci.*, 1977, vol. 11, no. 2, pp. 37–45. DOI: 10.1179/msc.1977.11.2.37.
4. Brown R.J., Lonsdale D., Flewitt P.E.J. The role of stress state on the creep rupture of 1%Cr1/2%Mo and 12%Cr1%MoVW tube steels. In: *Proc. of International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures (CFEMS1)*, Swansea, 24–27 March 1981, Pineridge Press, Swansea U.K., pp. 545–558.
5. Cane B.J. Creep damage accumulation and fracture under multiaxial stresses. In: *Advances in Fracture Research: Proceedings of International Conference on Fracture (ICF5)*, Cannes, 1981, Pergamon Press, Oxford, United Kingdom, 1982, vol. 3, pp. 1285–1293.
6. Mozharovskaya T.N. Stress-rupture strength and creep criteria for metallic materials with a complex stressed state. *Strength of Materials*, 1988, vol. 20, iss. 2, pp. 201–205. DOI: 10.1007/BF01522924.
7. Nazarov V.V. Short-term creep of the VT5 and VT6 titanium alloys at high temperature. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2015, no. 6, pp. 57–60. (In Russian).

Подана в журнал: 06.02.2017  
УДК 620.172.2:620.162.3:539.376  
DOI: 10.17804/2410-9908.2017.1.036-042

## МЕТОДИКА ВЫЧИСЛЕНИЯ ПРЕДЕЛОВ ПОЛЗУЧЕСТИ

В. В. Назаров<sup>1\*</sup>, А. Р. Лепешкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт механики  
Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования  
«Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова»  
Мичуринский проспект, 1, Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>Государственный научный центр Федеральное государственное унитарное предприятие  
«Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова»,  
ул. Авиамоторная, 2, Москва, Российская Федерация

\*Ответственный автор. Электронная почта: inmec130@mail.ru;  
адрес для переписки: 119192, Мичуринский проспект, 1, Москва, Российская Федерация;  
тел.: +7 (977) 353-46-97

Изложена методика вычисления пределов ползучести. Приведены результаты обработки экспериментальных данных длительной прочности при одноосном растяжении, которые получены разными учеными. В качестве аппроксимации времени в момент разрушения использована дробно-степенная зависимость с четырьмя материальными параметрами, два из которых имеют физический смысл пределов ползучести. Материальные параметры исследуемых материалов вычислены из условия минимума суммарного расхождения аппроксимирующих значений относительно соответствующих опытных данных.

*Ключевые слова: длительная прочность, одноосное растяжение, предел ползучести, предел кратковременной прочности.*

### 1. Введение

Свойство ползучести металлических материалов известно с первой половины XIX в. Первые результаты испытаний на ползучесть получены при нормальной температуре растянутых полос железа, меди, свинца, а также полых шаров, раздуваемых стационарным внутренним давлением (Л. Навье, 1826), однако измерение зависимостей перемещений от времени не производилось. В 1829 г. инженер Луи Жозефу Вика инспектировал восемь висячих мостов через р. Рона. При оценке деформаций, возникающих при стационарном нагружении, подвергли испытанию четыре отрезка железной проволоки длиной 1 м при различных стационарных усилиях, равных 1/4, 1/3, 1/2 и 3/4 от разрушающей кратковременной силы. Анализ опытных данных (Л. Вика, 1834) показал, что за 2 года эксперимента при усилии 3/4 от разрушающей кратковременной силы, относительное удлинение оказалось равным 30 % (т.е. за время эксперимента накопилась существенная деформация). Следует обратить внимание, что первые испытания на ползучесть металлических материалов проводились при нормальной температуре. Первые кривые ползучести при температуре выше нормальной получены при растяжении свинцовых образцов, нагретых до 165 °С, при постоянной силе и постоянном напряжении (Э.Н. да Коста Эндрейда, 1910). Эти опыты показали, что кривая ползучести при постоянной силе, описывающая процесс необратимого деформирования при непрерывном увеличении растягивающего напряжения за счет уменьшения площади поперечного сечения, располагается выше кривой при постоянном напряжении, разрушение при постоянной силе происходит раньше, чем при постоянном напряжении. В первой половине XX в. с развитием двигателей внутреннего сгорания опубликованы научные статьи, в которых изложены результаты экспериментальных исследований ползучести и длительной прочности при одноосном растяжении. В это же время были предложены различные зависимости

аппроксимации скорости деформации удлинения и времени в момент разрушения (одна из механических характеристик процесса ползучести) от растягивающего номинального напряжения, из числа которых нужно отметить степенную зависимость (Р. Бейли, 1935):

$$t_{**} = C_1 \sigma_{\max}^{-n_1}, \quad (1)$$

где  $t_{**}$  – время в момент разрушения;  $\sigma_{\max}$  – максимальное нормальное напряжение (при одноосном растяжении вместо максимального нормального напряжения используют номинальное напряжение  $\sigma = \sigma_{\max}$ ). Обратим внимание, что зависимость (1) не имеет ограничений по напряжению  $\sigma_{\max}$ . Из анализа [1] опытных данных при растяжении и кручении трубчатых образцов следует, что при описании длительной прочности в качестве характеристики тензора напряжений следует использовать сумму инвариантов  $\tau_{\max} + \beta \sigma_{\max}$  ( $\tau_{\max}$  – максимальное касательное напряжение;  $\beta$  – материальный параметр,  $0 \leq \beta \leq 1$ ). При одноосном растяжении сумма максимальных напряжений становится величиной  $[0,5 + \beta] \sigma_{\max}$ , при этом

$$t_{**} = C_2 [0,5 + \beta]^{-n_2} \sigma_{\max}^{-n_2}, \quad (2)$$

а также материальные параметры  $n_2 = n_1$ ,  $C_2 = C_1 [0,5 + \beta]^{n_1}$ . Это показывает, что при одноосном растяжении зависимости (1) и (2) приводят к одному и тому же значению погрешности  $\Delta = \sum |\lg(t_{**}^{\text{approx}} / t_{**}^{\text{exper}})| \rightarrow \min$  суммарного расхождения опытных данных относительно отрезка аппроксимирующей прямой в логарифмических осях  $\lg(t_{**}) - \lg(\sigma_{\max})$ .

## 2. Учет пределов ползучести материала в зависимости времени в момент разрушения от номинального растягивающего напряжения

При оценке ресурса эксплуатации элемента конструкции при повышенных температурах требуется знать пределы ползучести материала. С этой целью проводят соответствующие эксперименты на цилиндрических образцах, в которых пределу ползучести соответствует нормальное напряжение при определенной скорости деформации удлинения, а пределу кратковременной прочности – предельное растягивающее напряжение на диаграмме механического состояния материала. Этот способ определения пределов ползучести не является точным, так как при определении предела ползучести происходит незначительное деформирование, а при определении предела кратковременной прочности разрушение цилиндрического образца с шейкой происходит в условиях неоднородного напряженно-деформированного состояния. В качестве альтернативы рассмотрим другой способ определения предела ползучести и предела кратковременной прочности. С этой целью используем дробно-степенную зависимость [2]:

$$t_{**} = C_3 \left[ \frac{\sigma_b - \sigma_{\max}}{\sigma_{\max} - \sigma_c} \right]^{n_3}, \quad (3)$$

где  $\sigma_c$  – предел ползучести ( $t_{**}(\sigma_c) \rightarrow +\infty$ );  $\sigma_b$  – предел кратковременной прочности ( $t_{**}(\sigma_b) \rightarrow 0$ ) материала при температуре  $T$ .

### 3. Результаты и обсуждение

В расчетах использовались опытные данные (табл. 1 и 2), полученные при одноосном растяжении цилиндрических (трубчатых) образцов. Результаты испытаний [7] получены на цилиндрических образцах (опыты проводились на одноосное растяжение).

Таблица 1 – Условия испытаний используемых в работе опытных данных

| Источник опытных данных | Металлический материал      | $T, ^\circ\text{C}$ |
|-------------------------|-----------------------------|---------------------|
| Dyson [3]               | Никелевый сплав nimonic 80A | 750                 |
| Brown [4]               | Сталь 1CM                   | 575                 |
| Cane [5]                | Сталь 2,25Cr1Mo             | 565                 |
| Можаровская [6]         | Сталь 15X2МФА               | 550                 |
| Можаровская [6]         | Сталь 08X18Н9               | 600                 |
| Назаров [7]             | Титановый сплав BT6         | 650                 |

Таблица 2 – Опытные данные (за исключением [7])

| Материал,<br>температура<br>испытания | $y_{\max}$ , МПа | $t_{**}$ , ч | Материал            | $y_{\max}$ , МПа | $t_{**}$ , ч |
|---------------------------------------|------------------|--------------|---------------------|------------------|--------------|
| nimonic 80A<br>750 °C                 | 155              | 2100         | 2,25Cr1Mo<br>565 °C | 79               | 11110        |
|                                       | 155              | 1800         |                     | 92               | 6110         |
|                                       | 175              | 800          |                     | 109              | 3890         |
|                                       | 185              | 710          |                     | 123              | 2640         |
|                                       | 205              | 440          |                     | 146              | 1110         |
|                                       | 305              | 55           |                     | 179              | 306          |
|                                       | 375              | 13           | 15X2MФА<br>550 °C   | 340              | 290          |
|                                       | 470              | 5            |                     | 360              | 140          |
| 1CM<br>575 °C                         | 66               | 7902         | 15X2MФА<br>550 °C   | 380              | 74           |
|                                       | 70               | 6009         |                     | 400              | 35           |
|                                       | 130              | 802          |                     | 420              | 21           |
|                                       | 150              | 436          | 08X18H9<br>600 °C   | 200              | 150          |
|                                       | 160              | 341          |                     | 220              | 80           |
|                                       | 170              | 262          |                     | 240              | 46           |
|                                       |                  |              |                     | 260              | 26           |
|                                       |                  |              | 280                 | 14               |              |

Таблица 3 – Параметры и погрешности зависимостей (1) и (3)

| Материал,<br>температура<br>испытания | Степенная<br>зависимость (1) |       |      | Дробно-степенная<br>зависимость (3) |       |                |                |          |
|---------------------------------------|------------------------------|-------|------|-------------------------------------|-------|----------------|----------------|----------|
|                                       | $\lg C_1$                    | $n_1$ | $D$  | $C_3$                               | $n_3$ | $y_c$ ,<br>МПа | $y_b$ ,<br>МПа | $\Delta$ |
| nimonic 80A<br>750 °C                 | 15,1                         | 5,4   | 0,35 | 0,04                                | 4,4   | 10             | 1884           | 0,32     |
| 1CM<br>575 °C                         | 10,4                         | 3,6   | 0,13 | 970                                 | 0,9   | 55             | 191            | 0,12     |
| 2,25Cr1Mo<br>565 °C                   | 10,7                         | 3,5   | 0,48 | 1899                                | 1,1   | 55             | 202            | 0,15     |
| 15X2МФА<br>550 °C                     | 33,9                         | 12,4  | 0,06 | 54                                  | 1,4   | 300            | 480            | 0,08     |
| 08X18H9<br>600 °C                     | 17,2                         | 6,5   | 0,09 | 44                                  | 1,3   | 150            | 332            | 0,004    |
| BT6<br>650 °C                         | 6,2                          | 2,9   | 1,46 | 3                                   | 1,1   | 21             | 175            | 1,36     |

Результаты экспериментальных исследований авторов [3–6] получены на трубчатых образцах: одна часть образцов испытана на одноосное растяжение, другая – на сложное напряженное состояние под действием растягивающей силы и крутящего момента. Расчетные параметры (табл. 3) получены для аппроксимаций (1) и (3) (рисунок) и вычислены итерационным методом последовательных приближений (Microsoft Excel, меню «поиск решения»). Анализ полученных погрешностей  $\Delta$  показывает, что аппроксимация опытных данных (табл. 2) наилучшим образом достигается дробно-степенной зависимостью (3) (исключение составляют опытные данные [6], полученные для стали 15X2МФА), при этом точность полученных значений  $\sigma_c$  и  $\sigma_b$  определяется не предложенной методикой, а опытными данными, полученными в диапазоне  $\sigma_1 \leq \sigma \leq \sigma_u$ , при этом наилучшая точность предложенного метода реализуется для опытных данных при  $\sigma_1 \rightarrow \sigma_c$  и  $\sigma_u \rightarrow \sigma_b$ .

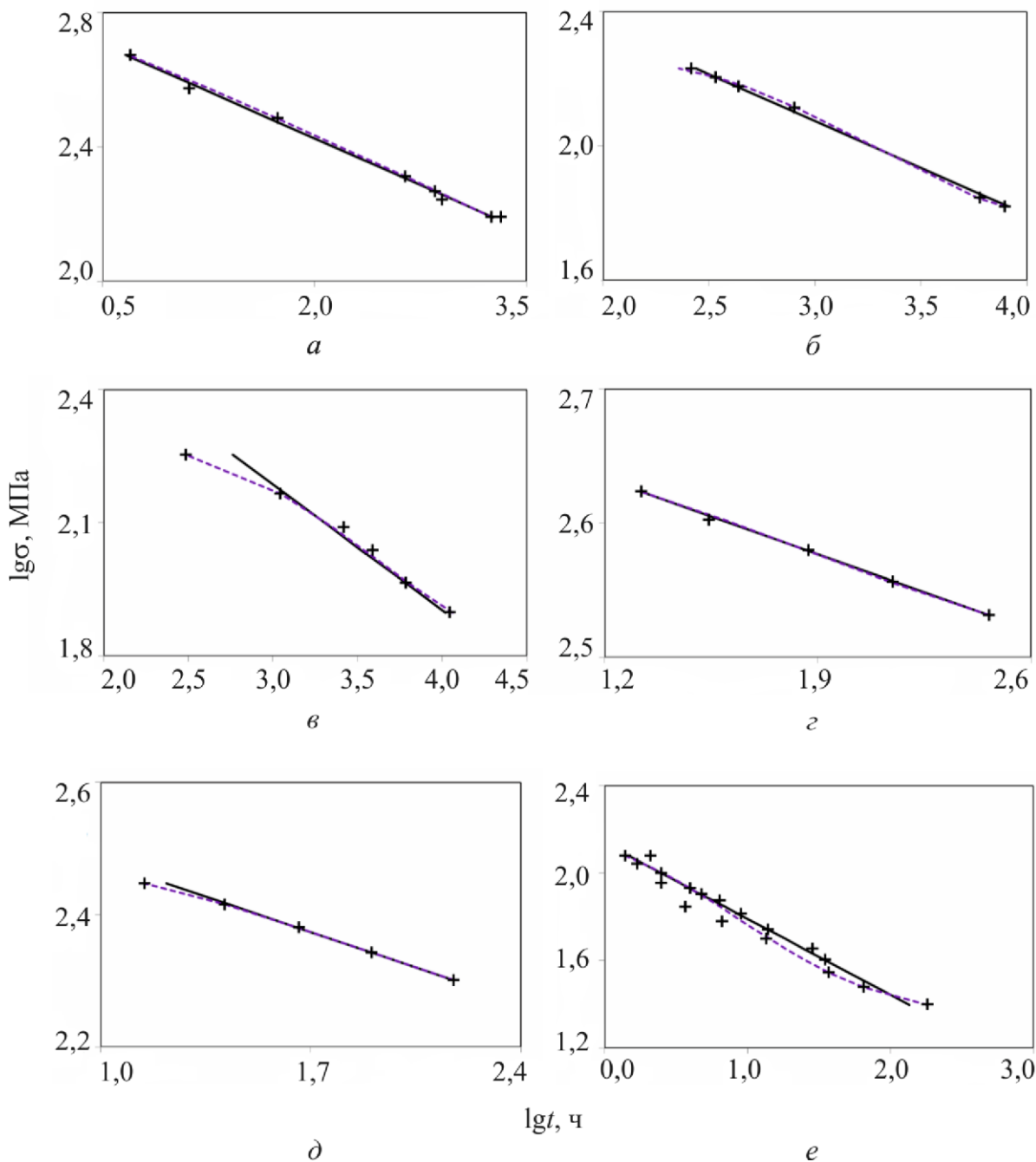


Рисунок. Опытные данные (значки) и аппроксимации (линии) длительной прочности:  
а – ni-monic 80A при 750 °C; б – 1СМ при 575 °C; в – 2,25Cr1Mo при 565 °C;  
г – 15X2МФА при 550 °C; д – 08X18Н9 при 600 °C; е – ВТ6 при 650 °C.

Сплошная линия –  $\lg t_{**} = \lg C_1 - n_1 \lg \sigma$ , пунктирная линия –  $\lg t_{**} = \lg C_3 + n_3 \lg \left( \frac{\sigma_b - \sigma}{\sigma - \sigma_c} \right)$

#### 4. Заключение

Предложена методика, позволяющая определить пределы ползучести материала при заданной температуре. Точность вычисления этих механических характеристик зависит от количества (минимальное количество опытов равно четырем) и частоты по напряжению опытов на длительную прочность. Для точного вычисления пределов ползучести потребуется диаграмма механического состояния материала при заданной температуре  $T$ , из которой следует определить текучести  $\sigma_y$  и предел прочности  $\sigma_s$ , после этого провести 4 опыта на длительную прочность при номинальном напряжении

$$\sigma = \frac{k[\sigma_s - \sigma_y]}{4} + \sigma_y, \text{ где } k - \text{номер опыта.}$$

#### Благодарность

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты: № 16-08-00014, № 17-08-00210).

#### Литература

1. Назаров В. В. Критерий длительной прочности при растяжении и кручении трубчатых образцов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2014. – № 12. – С. 57–59.
2. Shesterikov S. A., Yumasheva M. A. Specification of the equation of state in the theory of creep // Mech. Solids. – 1984. – No.1. – P. 86–92.
3. Dyson B. F., McLean D. Creep of Nimonic 80A in torsion and tension // Met. Sci. – 1977. – No.2. – P. 37–45. – DOI: 10.1179/msc.1977.11.2.37.
4. Brown R. J., Lonsdale D., Flewitt P. E. J. The role of stress state on the creep rupture of 1%Cr1/2%Mo and 12%Cr1%MoVW tube steels // International Conference on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures (CFEMS1), Swansea, 24–27 March 1981 : Proceedings. – Swansea, U.K. : Pineridge Press, 1981. – P. 545–558.
5. Cane B. J. Creep damage accumulation and fracture under multiaxial stresses. // International Conference on Fracture “Advances in Fracture Research” (ICF5), Cannes, 1981 : Proceedings. – Oxford : Pergamon Press, 1982. – Vol. 3. – P. 1285–1293.
6. Mozharovskaya T. N. Stress-rupture strength and creep criteria for metallic materials with a complex stressed state // Strength of Materials. – 1988. – Vol. 20, iss. 2. – P. 201–205. – DOI: 10.1007/BF01522924.
7. Назаров В. В. Кратковременная ползучесть титановых сплавов BT5 и BT6 при высокой температуре // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2015. – № 6. – С. 57–60.