

Received: 21.10.2021

Revised: 27.01.2022



Accepted: 25.02.2022

DOI: 10.17804/2410-9908.2022.1.038-051

A REVIEW OF EXPERIMENTAL STUDIES OF CREEP AND CREEP RUPTURE STRENGTH (2004–2021)

V. V. Nazarov

*Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University,
1 Michurinskiy Ave., Moscow, 119192, Russian Federation*

 <https://orcid.org/0000-0002-9234-3646>
 inmec130@mail.ru

Corresponding author. E-mail: inmec130@mail.ru

Address for correspondence: 1 Michurinskiy Ave., Moscow, 119192, Russian Federation

The paper reviews studies conducted between 2004 and 2021 for various metal materials (magnesium-lithium alloy, copper, aluminum alloy, titanium alloy, steel, nickel alloy) in the temperature range from 20 to 1100 °C. In those studies the test results were obtained for isothermal creep under uniaxial tension and complex stress. The number of such studies is limited. This review does not include studies dealing with the chemical interaction of the environment with a metal material. Among these studies there are little-known and unique results. In one of those studies, the creep of a magnesium-lithium alloy at normal temperature was considered for the first time. In another study, creep curves for heat-resistant steel were supplemented with experimental stress–strain diagrams in a wide range of high temperatures. Another distinctive study, for the characteristic times of the creep process, compares photographs of changes in the microstructure and the creep curve up to the rupture time. The review lists studies that found an ambiguity in the effect of biaxial tension on the rupture time in comparison with uniaxial tension. It enumerates complex equivalent stresses with the possibility of describing the relative difference in the rupture time under uniaxial tension, biaxial tension, and triaxial tension.

Keywords: creep, creep rupture, multiaxial tension, equivalent stress.

Acknowledgment

The work was partially financially supported by the Russian Foundation for Basic Research, grant 20-08-00387.

References

1. Navier C.L.M.H. Experiences sur la resistance de divers substances a la rupture causee par une tension longitudinale. *Annales de chimie et de physique*, 1826, vol. 33, pp. 225–40.
2. Vicat L.J. Note sur l'Allongement Progressif du Fil de Fer Soumis à Divers Tensions. *Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires*, first series, first semester, 1834, pp. 40–44.
3. Edward Neville Da Costa Andrade. On the Viscous Flow in Metals, and Allied Phenomena. *Proceedings of the Royal Society A* 1910, vol. 84, No. 567, pp. 1–12. DOI: 10.1098/rspa.1910.0050.
4. Norton F.H. *The Creep of steel at high temperatures*. New York, Mc. Graw-Hill Book Company, 1929.
5. Bailey R.W. Creep of steel under simple and compound stresses and the use of high initial temperature in steam power plant. *Transactions of the World Power Conference*. Tokyo, 1929, vol. 3.

6. Shesterikov S.A., Yumasheva M.A. Shesterikov S. A., Yumasheva M. A. More precise specification of the equation of state in creep theory. *Mechanics of Solids*, 1984. vol. 19, No. 1, pp. 81–85.
7. Nazarov V.V., Lepeshkin A.R. A method for calculating creep limits. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2017, iss. 1, pp. 36–42. DOI: 10.17804/2410-9908.2017.1.036-042. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2017_Nazarov_V.V._et_al._036_042.pdf
8. Nazarov V.V. Analysis of two methods for calculating the ultimate stresses of creep and creep rupture processes. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2019, iss. 2, pp. 28–36. DOI: 10.17804/2410-9908.2019.2.028-036. Available at: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2019_Nazarov_V.V._028_036.pdf
9. Koval'kov V.K., Nazarov V.V., Novotnyi S.V. Procedure of high-temperature within complex stressed state. *Zavod. Lab. Diagn. Mater.*, 2006, vol. 72, No. 4, pp. 42–44. (In Russian).
10. Manna G., Castello P., Harskamp F., Hurst R., Wilshire B. Testing of welded 2.25CrMo steel, in hot, high-pressure hydrogen under creep conditions. *Engineering Fracture Mechanics*, 2007, vol. 74, iss. 6, pp. 956–968. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.021.
11. Johnson A.E., Henderson J., Mathur V.D. Combined stress creep fracture of a commercial copper at 250° C. *Engineer*, 1956, vol. 202, No. 5248, pp. 261–265.
12. Johnson A.E., Henderson J., Mathur V.D. Complex Stress Creep Fracture of an Aluminium Alloy: An Investigation Conducted at an Elevated Temperature. *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 1960, vol. 32, No 6, pp. 161–170. DOI: 10.1108/eb033263.
13. Lokoshchenko A.M., Nazarov V.V. Choice of Long-Term Strength Criteria for Metals in Combined Stress State. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 2004, no. 7 (15), pp. 124–128. (In Russian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2004_7_27
14. Nazarov V.V., Lepeshkin A.R. Analysis of various equivalent stress options for describing the creep rupture process under a complex stress state. *AIP Conference Proceedings*, 2020, vol. 2315, pp. 020029. DOI: 10.1063/5.0037057.
15. Lokoshchenko A.M., Nazarov V.V. Kinetic approach of investigation of creep-rupture for metals under biaxial tension. *Aviatsionno-Kosmicheskaya Tekhnika i Tekhnologiya*, 2005, No. 10 (26), pp. 73–79. (In Russian). Available at: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2005_10_15
16. Kobayashi H., Ohki R., Itoh T., Sakane M. Multiaxial creep damage and lifetime evaluation under biaxial and triaxial stresses for type 304 stainless steel. *Engineering Fracture Mechanics*, 2017, vol. 174, pp. 30–43. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.01.001.
17. Sakane M., Kobayashi H., Ohki R., Itoh T. Creep void formation and rupture lifetime in multiaxial stress states. *Key Engineering Materials*, 2019, vol. 795, pp. 159–164. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.795.159.
18. Golubovskii E.R. and Demidov A.G. Estimation of Long-Term Strength of Alloy EI437BU-VD for Gas Turbine Disks in Combined Stress State. *Vestnik Dvigatelsestr.*, 2008, No. 3, pp. 106–110. (In Russian).
19. Ilyin S.I., Koryagin Yu.D., Lapina I.V. Creep of ultralight magnesium alloys at low temperatures. *Vestnik YuUGU. Seriya Metallurgiya*. 2012, No. 15. pp. 105–107. (In Russian).
20. Jiang Y., Lin Y., Phaniraj C., Xia Y., Zhou H. Creep and creep rupture behavior of 2124-T851 aluminum alloy. *High Temperature Materials and Processes*, 2013, vol. 32, iss. 6, pp. 533–540. DOI: 10.1515/htmp-2012-0172.
21. Nazarov V.V. Short-term creep of titanium alloys VT5 and VT6 at high temperature. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*. 2015, vol. 81, No. 6, pp. 57–60. (In Russian).
22. Zeng L.Y., Zhao Y.Q., Mao X.N., Hong Q., Qi Y.L. Creep features of Ti-600 alloy at the temperature of 650 C. *Materials Science Forum*, 2018, vol. 941, pp. 995–1003. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.995.
23. Niu L. B., Kobayashi M., Takaku H., Azuma T. Aging effect on creep rupture properties of super-clean 9%CrMoV steel for steam turbine rotors of combined cycle power plants. *Key Engi-*

- neering Materials*, 2004, vol. 274–276, pp. 931–936. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.274-276.931.
24. Niu L.B., Matsushima I., Akiu T. Influence of aging on creep rupture properties of heat resistant steels for steam turbine rotors of thermal power plants. *Advanced Materials Research*, 2011, vol. 291–294, pp. 1122–1125. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.274-276.931.
 25. Thomas A., Seliger P. Creep properties and damage behaviour of component-like tubes of Vm12-materials. *Materials at High Temperatures*, 2011, vol. 28, No 2, pp. 114–119. DOI: 10.3184/096034011X13059086139272.
 26. Goyal S., Laha K., Selvi S.P., Mathew M.D. Mechanistic approach for prediction of creep deformation, damage and rupture life of different Cr–Mo ferritic steels. *Materials at High Temperatures*, 2014, vol. 31, iss. 3, pp. 211–220. DOI: 10.1179/1878641314Y.0000000016.
 27. Wang Y., Zhang W., Wang Y., Lim Y. C., Yu X., Feng Z. Experimental evaluation of localized creep deformation in grade 91 steel weldments. *Materials Science and Engineering: A*, 2021, vol. 799, pp. 140356. DOI: 10.1016/j.msea.2020.140356.
 28. Nguyen T.T., Jeong T.M., Erten D.T., Yoon K.B. Creep deformation and rupture behaviour of service-exposed super 304H steel boiler tubes. *Materials at High Temperatures*, 2021, vol. 38, iss. 1, pp. 61–72. DOI:10.1080/09603409.2020.1830609.
 29. Xie Z.G., He Y.M., Yang J.G., Gao Z.L. Microstructural evolution of nuclear power steel A508-III in the creep process at 800°C. *Applied Mechanics and Materials*, 2017, vol. 853, pp. 153–157. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.853.153.
 30. Mohta K., Gupta S. K., Cathirvolu S., Jaganathan S., Chattopadhyaya J. High temperature deformation behavior of Indian PHWR Calandria material SS 304L. *Nuclear Engineering and Design*, 2020, vol. 368, pp. 110801. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110801.
 31. Kim S.J., Kong Y.S., Roh Y.J., Jung W.T. On statistical properties of high temperature creep rupture data in STS304 stainless steels. *Key Engineering Materials*, 2006, vol. 326–328, pp. 553–556. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.553.
 32. Nai Q.Z., Hong X., Xue P.M., Gang W. Study on high temperature creep behaviors of P92 steel. *Key Engineering Materials*, 2011, vol. 452–453, pp. 521–524. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.521.
 33. Facai R., Xiaoying T. Mechanical properties of Grade 91 steel at high temperatures. *Journal of Physics: Conference Series*, 2019, vol. 1168, iss. 2, pp. 022013. DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022013.
 34. Dao V.H., Yoon K.B., Yang G., Oh J.S. Determination of creep constitutive model for 28–48WCo alloy based on experimental creep tests at 817–982°C. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2018, vol. 32, pp. 4201–4208. DOI: 10.1007/s12206-018-0818-0.
 35. Chu Z., Yu J., Sun X., Guan H., Hu Z. High-temperature creep deformation and fracture behavior of a directionally solidified Ni-base superalloy DZ951. *Metallurgical and Materials Transactions: A*, 2009, vol. 40, pp. 2927. DOI: 10.1007/s11661-009-0001-4.
 36. Nomura K., Kubushiro K., Nakagawa H., Murata Y. Creep rupture strength for weld joint of 23Cr–45Ni–7W alloy. *Materials Transactions*, 2016, vol. 57, iss. 12, pp. 2097–2103. DOI: 10.2320/matertrans.M2016242.
 37. Naprienko S.A., Orlov M.R. Destruction of single-crystal turbine blades of ground-based GTU. *Proceedings of VIAM*, 2016, No. 2 (38), pp. 20–31. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-3-3. (In Russian).
 38. Nazarov V.V. Determination of creep properties under tension and torsion of copper tubular specimens. *Inorganic Materials*, 2014, vol. 50, pp. 1514–1515. DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-3-3.
 39. Nazarov V.V. Mechanical properties of a VT1-0 titanium alloy creep under tension and torsion of tubular specimens. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika materialov*, 2017, vol. 83, No. 2, pp. 66–68. (In Russian).



40. Golubovsky E.R., Demidov A.G. Creep-rupture strength and equivalence criterion of stress states of EI698VD alloy for GTD disks. *Vestnik Dvigatelsestroeniya*, 2012, No. 2, pp. 264–268. (In Russian).
41. Himeno T., Chuman Y., Tokiyoshi T., Fukahori T., Igari T. Creep rupture behaviour of circumferentially welded mod. 9Cr–1Mo steel pipe subject to internal pressure and axial load. *Materials at High Temperatures*, 2016, vol. 33, iss. 6, pp. 636–643. DOI: 10.1080/09603409.2016.1226703.
42. Itoh R., Hikida T., Ogawa F., Itoh T., Sakane M., Zhang S. Biaxial tensile creep damage of Mod.9Cr–1Mo steel using cruciform specimen. *Proceedings of 9th China–Japan Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials*, 2016, pp. 60–66.
43. Lokoshchenko A.M. Estimation of equivalent stresses in the analysis of long-term strength of metals under combined stress state. *Mechanics of Solids*, 2010, vol. 45, pp. 633–647. DOI: 10.3103/S0025654410040126.

Подана в журнал: 21.10.2021
УДК 539.376
DOI: 10.17804/2410-9908.2022.1.038-051

ОБЗОР ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ (2004–2021 гг.)

В. В. Назаров

*Научно-исследовательский институт механики
Федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования Московский государственный университет
Мичуринский проспект, 1, Москва, 119192, Российская Федерация*

 <https://orcid.org/0000-0002-9234-3646>  inmec130@mail.ru

Ответственный автор. Электронная почта: inmec130@mail.ru
Адрес для переписки: Мичуринский проспект, 1, Москва, 119192, Российская Федерация

Рассмотрены работы 2004–2021 гг. для различных металлических материалов (магниево-литиевый сплав, медь, алюминиевый сплав, титановый сплав, сталь, никелевый сплав) в температурном диапазоне 20–1100 °С. В этих работах получены результаты испытаний для изотермической ползучести при одноосном растяжении и сложном напряженном состоянии. Количество таких работ ограничено. В данный обзор не вошли работы, в которых рассмотрено химическое взаимодействие окружающей среды с металлическим материалом. В представленных работах присутствуют малоизвестные и уникальные результаты, впервые рассмотрена ползучесть магниево-литиевого сплава при комнатной температуре, впервые кривые ползучести для жаропрочной стали дополнены экспериментальными диаграммами напряжение – деформация в широком диапазоне значений высокой температуры. Для характерных моментов времени процесса ползучести сделано сопоставление фотоснимков изменения микроструктуры и кривой ползучести до момента времени разрушения. Перечислены работы, в которых из эксперимента по сравнению с одноосным растяжением обнаружена неоднозначность во влиянии двухосного растяжения на время в момент разрушения. В обзоре перечислены сложные эквивалентные напряжения с возможностью описания относительного различия значений времени в момент разрушения при одноосном растяжении, двухосном растяжении и трехосном растяжении.

Ключевые слова: ползучесть, длительная прочность, многоосное растяжение, эквивалентное напряжение.

1. Введение

Впервые свойство ползучести обнаружено на основе анализа результатов механических испытаний на растяжение медных и свинцовых пластин под действием стационарной осевой силы, а также надутых полых медных шариков под действием внутреннего давления, при этом точные измерения не проводились [1]. Кривые ползучести (зависимость удлинения от времени) впервые получены при растяжении отрезков железной проволоки с различными стационарными осевыми силами, при этом за 2 года максимальное относительное удлинение оказалось равным 30 % [2]. Эти результаты механических испытаний были получены при нормальной температуре. При нагревании до высокой температуры результаты таких механических испытаний впервые получены в первой половине XX в. при растяжении отрезков проволоки при 165 °С либо при постоянной осевой силе, либо при постоянном растягивающем напряжении [3]. На основе анализа экспериментальных данных было установлено, что кривая ползучести при постоянной осевой силе расположена выше и разрушение происходит раньше, чем при постоянном растягивающем напряжении. После завершения Второй миро-

вой войны (1941–1945 гг.) и появления первых реактивных авиационных двигателей потребовалось прикладное исследование свойств ползучести при высоких температурах. В послевоенный период разными учеными были получены механические характеристики для различных марок сталей и никелевых сплавов. На сегодняшний день экспериментальные исследования свойства ползучести не прекратились. За последние годы получены принципиально новые экспериментальные результаты в области влияния многоосного растяжения на время разрушения и процесс образования микропор.

В зависимости от условий проведения эксперимента кривая ползучести характеризуется тремя последовательными интервалами во времени: убывающая ползучесть (скорость деформации убывает со временем), установившаяся ползучесть (скорость деформации не меняется со временем) и возрастающая ползучесть (скорость деформации возрастает со временем). Из анализа экспериментальных кривых ползучести определяют зависимость (набор экспериментальных значений) скорости удлинения при установившейся ползучести от номинального напряжения (напряжение в начальный момент воздействия осевой стационарной силы), а также зависимость (набор экспериментальных значений) времени в момент разрушения от номинального напряжения. Для аппроксимации этих наборов экспериментальных значений используют степенную зависимость с двумя материальными параметрами [4, 5] либо дробно-степенную зависимость с четырьмя материальными параметрами [6], два из которых принимают определенный физический смысл предельных напряжений процесса ползучести. Под предельными напряжениями понимаются напряжение стартовой ползучести (максимальное возможное напряжение, при котором процесс ползучести отсутствует) и предел кратковременной прочности (минимальное возможное напряжение, при котором происходит мгновенное разрушение). В работе [7] на примере экспериментальных данных по длительной прочности, полученных для различных металлических материалов при разных значениях высокой температуры, показано, что минимальная суммарная погрешность дробно-степенной зависимости [6] с четырьмя материальными параметрами меньше минимальной суммарной погрешности степенной зависимости [4, 5] с двумя материальными параметрами. Напряжение стартовой ползучести и предел кратковременной прочности можно либо измерить из эксперимента, либо вычислить [8] вместе с остальными двумя материальными параметрами дробно-степенной зависимости [6].

Механические испытания на ползучесть и длительную прочность проводят на цилиндрических образцах (подвергаются одноосному растяжению), прямоугольных плоских образцах (подвергаются одноосному растяжению), квадратных пластинах (подвергаются двухосному растяжению), трубчатых образцах (подвергаются одновременно кручению и растяжению либо испытывают под воздействием внутреннего давления и осевой силы), а также на кубических образцах (подвергаются трехосному растяжению). Из анализа экспериментальных данных, полученных при одноосном растяжении, определяют материальные параметры, которые затем используются в расчетных моделях на ползучесть или длительную прочность. При потребности реализации реальных условий эксплуатации элемента конструкции проводят испытания на сложное напряженное состояние [9, 10], где такие результаты испытаний (трубчатые образцы подвергались одновременно кручению и растяжению) впервые получены для меди [11] при 250 °С и авиационного алюминиевого сплава RR59 [12] при 200 °С.

2. Эквивалентные напряжения

Для описания процесса длительной прочности при сложном напряженном состоянии используют два подхода, где в первом рассматривают различные эквивалентные напряжения σ_{eq} [13, 14], а во втором – кинетику накопления рассеянных повреждений под воздействием растягивающих главных напряжений (под воздействием сжимающих главных напряжений повреждения не накапливаются) [15]. Для описания влияния многоосного растяжения на

время в момент разрушения предложено эквивалентное напряжение с двумя материальными параметрами [16, 17]:

$$\sigma_{\text{eq}}^1 = \sigma_1 \left\{ 1 + \beta_1 \left[\frac{\sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_1} \right]^{\beta_2} \right\}, \quad \beta_1 > 0, \quad \beta_2 > 0, \quad (1)$$

где главные напряжения $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$, при этом утверждается, что по сравнению с одноосным растяжением трехосное растяжение, приводит к заметному уменьшению времени в момент разрушения. Другое эквивалентное напряжение, позволяющее описать влияние многоосного растяжения на время в момент разрушения, рассмотрено в работе [18]:

$$\sigma_{\text{eq}}^2 = [1 - \beta_3] \sigma_{\text{mises}} + 3\beta_3 \sigma_h, \quad 2/3 \leq \beta_3 \leq 2, \quad (2)$$

где σ_{mises} – напряжение Мизеса; $\sigma_h = [\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3]/3$ – гидростатическое давление. Чтобы установить влияние каждого из двух максимальных напряжений σ_{max} и $2\tau_{\text{max}}$ на время в момент разрушения t_{rupt} , в статье [14] рассмотрено эквивалентное напряжение с одним материальным параметром:

$$\sigma_{\text{eq}}^3 = [1 - \beta_4] 2\tau_{\text{max}} + \beta_4 \sigma_{\text{max}}, \quad 0 \leq \beta_4 \leq 1, \quad (3)$$

где σ_{max} – максимальное нормальное напряжение; $2\tau_{\text{max}}$ – удвоенное максимальное касательное напряжение.

Ниже представлен обзор, в котором автор сделал попытку объединить и систематизировать работы, в которых приведены малоизвестные экспериментальные данные для ползучести и длительной прочности под действием стационарных сил для различных металлических материалов, полученные разными учеными за последние полтора десятка лет. Некоторые из них являются принципиально новыми и содержат уникальные результаты при одноосном, двухосном и трехосном растяжениях.

3. Одноосное растяжение

Отличительная особенность современных экспериментальных данных (табл. 1) в том, что опыты на ползучесть и длительную прочность, за исключением [19], проводили при высокой температуре.

Уникальность работы [19] состоит в том, что рассмотрена ползучесть самого легкого металлического материала при нормальной температуре (20 °C).

Сплавы на основе цветного металла (магния, алюминия, меди и титана) хорошо проявляют свойство ползучести при нагреве, что заметно ограничивает их использование на практике, и таких экспериментальных работ сравнительно мало [19–22; 38,39]. В статье [20] приведены кривые ползучести авиационного алюминиевого сплава 2124–T851 (применяется в авиастроении) при трех разных значениях высокой температуры (200, 230 и 260 °C). В статьях [21, 22] приведены скорости деформации при установившейся ползучести и время в момент разрушения при разных номинальных напряжениях для двух разных титановых сплавов (применяются в авиастроении) при одной и той же высокой температуре (650 °C).

Таблица 1

Сводная таблица публикаций экспериментальных данных при одноосном растяжении

Ссылка на публикацию	Материал	Температура, °С
[19]	МА21 (магниево-литиевый сплав)	20
[20]	2124–Т851 (алюминиевый сплав)	200
		230
		260
[21]	BT5 (титановый сплав)	650
	BT6 (титановый сплав)	
[22]	Ti–600 (титановый сплав)	650
[23]	9%CrMoV (сталь)	566
[24]	1%CrMoV (сталь)	
[25]	VM12 (сталь)	625
[26]	2.25Cr1Mo (сталь)	600
	9Cr1Mo (сталь)	
	Mod.9Cr1Mo (улучшенная сталь)	
[27]	9Cr1MoVNb (сталь)	600
[28]	Super304H (сталь)	650
	после эксплуатации 54750 ч	
	после эксплуатации 68550 ч	
[29]	A508–III (сталь)	800
[30]	SS304L (сталь)	550
		700
		850
		975
		1100
[31]	STS304 (сталь)	600
		650
		700
[32]	P92 (сталь)	595
		610
		640
		670
[33]	9Cr1MoVNb (сталь)	565
		650
[34]	28–48WCo (сталь)	817
		871
		927
		982
[35]	DZ951 (никелевый сплав)	700
		800
		900
		1000
[36]	23Cr–43Ni–7W (никелевый сплав)	700
		750
		800
[37]	ЖС32–ВИ (никелевый сплав)	570

В статьях [23–34] приведены экспериментальные данные разных жаропрочных сталей (применяются на электростанциях). В работах [23, 24] приведены результаты исследования влияния старения на скорость деформации при установившейся ползучести двух жаропрочных сталей. В статье [27] при исследовании локализованной деформации ползучести в сварном шве установлено, что разрушение приходится на границу между областью высокотемпературного нагрева от газовой сварки и основным материалом. В статье [28] исследовано влияние времени эксплуатации на механические свойства стали Super304H. Рассмотрена первичная сталь, эта же сталь – после эксплуатации в течение 54 750 ч, а также после эксплуатации – 68 550 ч, в результате установлено, что после эксплуатации на протяжении 54 750 ч сталь Super304H не претерпевает критических прочностных изменений (за исключением заметного увеличения предела текучести), а после эксплуатации 68 550 ч происходит критическое снижение времени и деформации в момент разрушения.

В работе [29] представлена схема эволюции микроструктуры стали A508–III (применяется в сосудах высокого давления на атомных электростанциях) в процессе ползучести при температуре фазового перехода, равной 800 °С, таким образом установлено, что на стадии установившейся ползучести происходит рост зерен матрицы с растворением частиц вторичной фазы. После этого на стадии ускоряющейся ползучести происходит выделение карбидных частиц, возле которых протекает процесс образования микропор. Процесс разрушения начинается с образования микротрещин, которые соединяют близлежащие микропоры и затем сливаются в магистральную трещину.

Еще одна уникальная работа [30], в которой рассмотрена ползучесть жаропрочной стали SS304L (применяется в энергетике) в широком диапазоне значений высокой температуры (550, 700, 850, 975 и 1100 °С). Уникальность этой работы состоит в том, что кривые ползучести дополнены экспериментальными зависимостями напряжения от деформации в широком диапазоне значений высокой температуры (25, 170, 300, 425, 550, 700, 850, 970 и 1100 °С), а также результатами металлографического исследования, из которых установлено образование коррозионных микротрещин на поверхности образцов, испытанных на ползучесть при температуре выше 700 °С.

В статьях [35–37] представлены экспериментальные данные, полученные в результате испытаний разных жаропрочных сплавов на основе никеля. В работе [36] приведены результаты исследования прочности сварного шва из никелевого сплава 23Cr–43Ni–7W при трех разных значениях высокой температуры (700, 750 и 800 °С), и установлено, что разрушение приходится на область высокотемпературного нагрева от газовой сварки. В статье [37] приведены экспериментальные данные по исследованию механизма разрушения монокристаллического никелевого сплава ЖС32–ВИ (применяется в авиастроении) при контакте с водяным паром при 570 °С.

4. Сложное напряженное состояние

Отличительная особенность экспериментальных данных (табл. 2) в том, что как минимум два из трех главных напряжений отличны от нуля. При реализации сложного напряженного состояния проводили разные опыты, в которых трубчатые образцы подвергались одновременному кручению и растяжению [18, 38–40] либо воздействию внутреннего давления и осевой силы [41]. Кроме обычных опытов [18, 38–41] экспериментальные данные были получены из уникальных опытов, в которых квадратные плоские образцы подвергались одновременному двухосному растяжению [16, 17; 42] либо кубические образцы – воздействию трех взаимно ортогональных сил [16, 17].

Таблица 2

**Сводная таблица публикаций экспериментальных данных
при сложном напряженном состоянии**

Ссылка на публикацию	Материал	Температура, °С	Главные напряжения
[38]	Медь (после отжига)	264	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 = 0$ $\sigma_3 < 0$
[39]	BT1-0 (титановый сплав)	550	
[18]	ЭИ437БУ-ВД (никелевый сплав)	650	
[40]	ЭИ698ВД (никелевый сплав)	650 750	
[41]	9Cr1MoVNb (сталь)	650	$\sigma_1 > 0$ $\sigma_2 > 0$ $\sigma_3 \geq 0$
[16]	SUS304 (сталь)	650	
[17]		700	
[42]	Mod.9Cr1Mo (сталь)	650	

В статье [38] приведены экспериментальные данные по установившейся ползучести и длительной прочности медных трубчатых образцов с внешним граничным диаметром 16 мм и толщиной 1 мм при 264 °С, где опыты на одновременное кручение и растяжение проводились при условии $\sigma = 2\tau$. Перед испытаниями, чтобы убрать прочностную анизотропию в материале, трубчатые образцы подвергались термической операции отжига при 800 °С.

В работе [39] приведены зависимости компонент тензора скоростей деформаций при установившейся ползучести от компонент тензора напряжений, полученных в результате испытаний титановых трубчатых образцов с внешним граничным диаметром 16 мм и толщиной 1 мм при 550 °С, где опыты на одновременное кручение и растяжение проводились при условии $\tau_{\max} = 50$ МПа либо при $\sigma_{\max} = 100$ МПа. Уникальность экспериментальных данных [39] заключается в том, что впервые на практике получены большие углы поворота в диапазоне значений 80 ÷ 260 град.

В работах [18, 40] рассмотрена длительная прочность двух разных никелевых сплавов (применяются в авиастроении) при двух разных значениях (650, 750 °С) высокой температуры и приведены фотоснимки разрушенных трубчатых образцов. На этих фотоснимках показаны особенности разрушения в зависимости от вида воздействия внешних сил. В статье [41] приведены экспериментальные данные по длительной прочности при двухосном растяжении стального сварного кольцевого шва, где трубчатые образцы с внешним диаметром 36 мм и толщиной 5 мм подвергались одновременно воздействию внутреннего давления и осевой силы при разных значениях $k = \sigma_z / \sigma_\theta$, где σ_z – осевое напряжение; σ_θ – тангенциальное напряжение. Из-за того, что прочность основного материала оказалась выше, чем прочность сварного материала, разрушение трубчатых образцов при $k \geq 0,8$ происходило по сварному шву.

В статьях [16,17, 42] рассмотрена длительная прочность двух разных сталей при одноосном, двухосном и трехосном растяжениях при одном и том же значении высокой температуры (650 °С). В экспериментальных данных [16, 17, 42], полученных при одноосном и двухосном растяжениях, наблюдается относительное различие значений времени в момент разрушения при одноосном и двухосном растяжениях. По сравнению с одноосным растяжением ($\sigma_1 = \sigma > 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$), двухосное растяжение ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma > 0$, $\sigma_3 = 0$) приводит

либо к увеличению времени в момент разрушения $\frac{t_{rupt}^2}{t_{rupt}^1} = 1,8 \div 2,3$ (сталь SUS304 при 650 °C), либо к его уменьшению $\frac{t_{rupt}^1}{t_{rupt}^2} = 1,0 \div 1,9$ (сталь Mod.9Cr1Mo при 650 °C), при этом трехосное растяжение ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma > 0$) всегда приводит к уменьшению времени в момент разрушения [16, 17], где t_{rupt}^1 – время в момент разрушения при одноосном растяжении; t_{rupt}^2 – время в момент разрушения при двухосном растяжении. Измерения удлинений [16, 17] при растяжении стали SUS304 при 700 °C показали, что при одноосном растяжении деформация в момент разрушения оказалась равной 52 %, при двухосном растяжении деформации достигли значений 30 и 28 %, а при трехосном растяжении процесс длительной прочности протекает при отсутствии деформаций ползучести и всегда завершается хрупким разрушением, при котором микропоры и микротрещины образуются исключительно на границах зерен.

5. Заключение

В обзоре (сравнение проводится с экспериментальными данными, используемыми в анализе [43]) рассмотрена ползучесть магниево-литиевого сплава [19], а также различных титановых сплавов [21, 22, 39]. В некоторых современных работах [20, 30–36] приведены экспериментальные данные по ползучести при разных значениях высокой температуры, при этом результаты длительных испытаний [30] дополнены экспериментальными зависимостями напряжения от деформации. Рассмотрены работы [16, 17, 42], в которых представлены уникальные экспериментальные данные по длительной прочности при одноосном, двухосном и трехосном растяжениях. В экспериментальных данных [16, 17, 42] наблюдается относительное различие значений времени в момент разрушения, которое не представляется возможным описать обычными эквивалентными напряжениями [43]. Для описания влияния многоосного растяжения на время в момент разрушения следует использовать эквивалентные напряжения (1) и (2).

Благодарность

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (грант 20–08–00387).

Литература

1. Navier C. L. M. H. Experiences sur la resistance de divers substances a la rupture causee par une tension longitudinale // Annales de chimie et de physique. – 1826. – Vol. 33. – P. 225–240.
2. Vicat L. J. Note sur l'allongement progressif du fil de fer soumis a divers tensions // Annales des ponts et chaussées – 1834. – P. 40–44.
3. Edward Neville Da Costa Andrade. On the viscous flow in metals and allied phenomena // Proceedings of the Royal Society. – 1910. – Vol. 84, No. 567. – P. 1–12. – DOI: 10.1098/rspa.1910.0050.
4. Norton F. H. Creep of Steel at high temperatures // New York : Mc. Graw-Hill Book Company, 1929.
5. Bailey R. W. Creep of steel under simple and compound stresses and the use of high initial temperature in steam power plant // Transactions of the World Power Conference. – Tokyo, 1929. – Vol. 3.
6. More precise specification of the equation of state in creep theory / S. A. Shesterikov, M. A. Yumasheva, S. A. Shesterikov, M. A. Yumasheva // Mechanics of Solids. – 1984. – Vol. 19, No. 1. – P. 81–85.
7. Nazarov V. V., Lepeshkin A. R. A method for calculating creep limits // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. – 2017. – Iss. 1. – P. 36–42. –

- DOI: 10.17804/2410-9908.2017.1.036-042 – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_1_2017_Nazarov_V.V._et_al._036_042.pdf
8. Nazarov V. V. Analysis of two methods for calculating the ultimate stresses of creep and creep rupture processes // *Diagnosics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2019. – Iss. 2. – P. 28–36. – DOI: 10.17804/2410-9908.2019.2.028-036. – URL: https://dream-journal.org/DREAM_Issue_2_2019_Nazarov_V.V._028_036.pdf
 9. Ковальков В. К., Назаров В. В., Новотный С. В. Методика проведения высокотемпературных испытаний при сложном напряженном состоянии // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2006. – Т. 72, № 4. – С. 42–44.
 10. Testing of welded 2.25CrMo steel, in hot, high-pressure hydrogen under creep conditions / G. Manna, P. Castello, F. Harskamp, R. Hurst, B. Wilshire // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2007. – Vol. 74. – Iss. 6. – P. 956–968. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2006.08.021.
 11. Johnson A. E., Henderson J., Mathur V. D. Combined stress creep fracture of a commercial copper at 250°C // *Engineer*. – 1956. – Vol. 202, No. 5248. – P. 261–265.
 12. Johnson A. E., Henderson J., Mathur V. D. Complex stress creep fracture of an aluminium alloy: An Investigation Conducted at an Elevated Temperature // *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*. – 1960. – Vol. 32, No. 6. – P. 161–170. – DOI: 10.1108/eb033263.
 13. Локощенко А. М., Назаров В. В. Выбор критериев длительной прочности металлов при сложном напряженном состоянии // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2004. – № 7 (15). – С. 124–128. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2004_7_27
 14. Nazarov V. V., Lepeshkin A. R. Analysis of various equivalent stress options for describing the creep rupture process under a complex stress state // *AIP Conference Proceedings*. – 2020. – Vol. 2315. – 020029. – DOI: 10.1063/5.0037057.
 15. Локощенко А. М., Назаров В. В. Кинетический подход исследования длительной прочности металлов при двухосном растяжении // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2005. – № 10 (26). – С. 73–79. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/aktit_2005_10_15
 16. Multiaxial creep damage and lifetime evaluation under biaxial and triaxial stresses for type 304 stainless steel / H. Kobayashi, R. Ohki, T. Itoh, M. Sakane // *Engineering Fracture Mechanics*. – 2017. – Vol. 174. – P. 30–43. – DOI: 10.1016/j.engfracmech.2017.01.001.
 17. Creep void formation and rupture lifetime in multiaxial stress states / M. Sakane, H. Kobayashi, R. Ohki, T. Itoh // *Key Engineering Materials*. – 2019. – Vol. 795. – P. 159–164. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.795.159.
 18. Голубовский Е. Р., Демидов А. Г. Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ437БУ-ВД для дисков ГТД // *Вестник двигателестроения*. – 2008. – № 3. – С. 106–110.
 19. Ильин С. И., Корягин Ю. Д., Лапина И. В. Ползучесть ультралегких магниевых сплавов при низких температурах // *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Metallurgy*. – 2012. – № 15. – С. 105–107. – URL: <https://vestnik.susu.ru/metallurgy/article/view/1371>
 20. Creep and creep rupture behavior of 2124-T851 aluminum alloy / Y. Jiang, Y. Lin, C. Phaniraj, Y. Xia, H. Zhou // *High Temperature Materials and Processes*. – 2013. – Vol. 32. – Iss. 6. – P. 533–540. – DOI: 10.1515/htmp-2012-0172.
 21. Назаров В. В. Кратковременная ползучесть титановых сплавов ВТ5 и ВТ6 при высокой температуре // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. – 2015. – Т. 81, № 6. – С. 57–60.
 22. Creep features of Ti-600 alloy at the temperature of 650°C / L. Y. Zeng, Y. Q. Zhao, X. N. Mao, Q. Hong, Y. L. Qi // *Materials Science Forum*. – 2018. – Vol. 941. – P. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.941.995.
 23. Niu L. B., Kobayashi M., Takaku H., Azuma T. Aging effect on creep rupture properties of superclean 9%CrMoV steel for steam turbine rotors of combined cycle power plants // *Key Engineering Materials*. – 2004. – Vol. 274–276. – P. 931–936. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.274-276.931.

24. Niu L. B., Matsushima I., Akiu T. Influence of aging on creep rupture properties of heat resistant steels for steam turbine rotors of thermal power plants // *Advanced Materials Research.* – 2011. – Vol. 291–294. – P. 1122–1125. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.291-294.1122.
25. Thomas A., Seliger P. Creep properties and damage behaviour of component-like tubes of Vm12-materials // *Materials at High Temperatures.* – 2011. – Vol. 28. – No 2. – P. 114–119. – DOI: 10.3184/096034011X13059086139272.
26. Mechanistic approach for prediction of creep deformation, damage and rupture life of different Cr–Mo ferritic steels / S. Goyal, K. Laha, S. P. Selvi, M. D. Mathew // *Materials at High Temperatures.* – 2014. – Vol. 31, iss. 3. – P. 211–220. – DOI: 10.1179/1878641314Y.0000000016.
27. Experimental evaluation of localized creep deformation in grade 91 steel weldments / Y. Wang, W. Zhang, Y. Wang, Y. C. Lim, X. Yu, Z. Feng // *Materials Science and Engineering: A.* – 2021. – Vol. 799. – P. 140356. – DOI:10.1016/j.msea.2020.140356.
28. Creep deformation and rupture behaviour of service-exposed super 304H steel boiler tubes / T. T. Nguyen, T. M. Jeong, D. T. Erten, K. B. Yoon // *Materials at High Temperatures.* – 2021. – Vol. 38, iss. 1. – P. 61–72. – DOI:10.1080/09603409.2020.1830609.
29. Microstructural evolution of nuclear power steel A508-III in the creep process at 800°C / Z. G. Xie, Y. M. He, J. G. Yang, Z. L. Gao // *Applied Mechanics and Materials.* – 2017. – Vol. 853. – P. 153–157. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.853.153.
30. High temperature deformation behavior of Indian PHWR Calandria material SS 304L / K. Mohta, S. K. Gupta, S. Cathirvolu, S. Jaganathan, J. Chattopadhyaya // *Nuclear Engineering and Design.* – 2020. – Vol. 368. – P. 110801. – DOI: 10.1016/j.nucengdes.2020.110801.
31. On statistical properties of high temperature creep rupture data in STS304 stainless steels / S. J. Kim, Y. S. Kong, Y. J. Roh, W. T. Jung // *Key Engineering Materials.* – 2006. – Vol. 326–328. – P. 553–556. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.326-328.553.
32. Nai Q. Z., Hong X., Xue P. M., Gang W. Study on high temperature creep behaviors of P92 steel // *Key Engineering Materials.* – 2011. – Vol. 452–453. – P. 521–524. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.452-453.521.
33. Facai R., Xiaoying T. Mechanical properties of Grade 91 steel at high temperatures // *Journal of Physics: Conference Series.* – 2019. – Vol. 1168, iss. 2. – P. 022013. – DOI: 10.1088/1742-6596/1168/2/022013.
34. Determination of creep constitutive model for 28–48WCo alloy based on experimental creep tests at 817–982°C / V. H. Dao, K. B. Yoon, G. Yang, J. S. Oh // *Journal of Mechanical Science and Technology.* – 2018. – Vol. 32. – P. 4201–4208. – DOI: 10.1007/s12206-018-0818-0.
35. High-temperature creep deformation and fracture behavior of a directionally solidified Ni-base superalloy DZ951/ Z. Chu, J. Yu, X. Sun, H. Guan, Z. Hu // *Metallurgical and Materials Transactions: A.* – 2009. – Vol. 40. – P. 2927. – DOI: 10.1007/s11661-009-0001-4.
36. Creep rupture strength for weld joint of 23Cr–45Ni–7W alloy / K. Nomura, K. Kubushiro, H. Nakagawa, Y. Murata // *Materials Transactions.* – 2016. – Vol. 57, iss. 12. – P. 2097–2103. – DOI: 10.2320/matertrans.M2016242.
37. Наприенко С. А., Орлов М. Р. Разрушение монокристаллических лопаток турбины наземных ГТУ // *Труды ВИАМ.* – 2016. – № 2 (38). – С. 20–31. – DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-2-3-3.
38. Nazarov V. V. Determination of creep properties under tension and torsion of copper tubular specimens // *Inorganic Materials.* – 2014. – Vol. 50. – P. 1514–1515. – DOI:10.1134/S0020168514150138.
39. Назаров В. В. Механические характеристики ползучести титанового сплава ВТ1–0 при растяжении и кручении трубчатых образцов // *Заводская лаборатория. Диагностика материалов.* – 2017. – Т. 83, № 2. – С. 66–68.
40. Голубовский Е. Р., Демидов А. Г. Длительная прочность и критерий эквивалентности напряженных состояний сплава ЭИ698ВД для дисков ГТД // *Вестник двигателестроения.* – 2012. – № 2. – С. 264–268.

41. Creep rupture behaviour of circumferentially welded mod. 9Cr–1Mo steel pipe subject to internal pressure and axial load / T. Himeno, Y. Chuman, T. Tokiyoshi, T. Fukahori, T. Igari // *Materials at High Temperatures*. – 2016. – Vol. 33, iss. 6. – P. 636–643. – DOI: 10.1080/09603409.2016.1226703.
42. Biaxial tensile creep damage of Mod.9Cr–1Mo steel using cruciform specimen / R. Itoh, T. Hikida, F. Ogawa, T. Itoh, M. Sakane, S. Zhang // *Proceedings of 9th China–Japan Bilateral Symposium on High Temperature Strength of Materials*. – 2016. – P. 60–66.
43. Lokoshchenko A. M. Estimation of equivalent stresses in the analysis of long-term strength of metals under combined stress state // *Mechanics of Solids*. – 2010. – Vol. 45. – P. 633–647. – DOI: 10.3103/S0025654410040126.