

8. *Itoh R., Hikida T., Ogawa F., Itoh T., Sakane M., Zhang S.* Biaxial tensile creep damage of Mod.9Cr–1Mo steel using cruciform specimen // Proc. 9th China Japan Bilateral Symp. High Temp. Strength Mater. 2016. P. 60–66.

9. *Kobayashi H., Ohki R., Itoh T., Sakane M.* Multiaxial creep damage and lifetime evaluation under biaxial and triaxial stresses for type 304 stainless steel // Engin. Fract. Mech. 2017. 174. P. 30–43.

10. *Голубовский Е.Р., Демидов А.Г.* Оценка длительной прочности при сложном напряженном состоянии сплава ЭИ437БУ-ВД для дисков ГТД // Вестн. двигателестроения. 2008. 3. С. 106–110.

References

1. *Kovalkov V.K., Nazarov V.V., Novotny S.V.* Methods of conducting high-temperature tests under complex stress state // Industr. lab. Diagn. mater. 2006. 72(4). P. 42–44.

2. *Manna G., Castello P., Harskamp F., Hurst R., Wilshire B.* Testing of welded 2.25CrMo steel, in hot, high-pressure hydrogen under creep conditions // Engin. Fract. Mech. 2007. 74(6). P. 956–968.

3. *Itoh R., Hikida T., Ogawa F., Itoh T., Sakane M., Zhang S.* Biaxial tensile creep damage of Mod.9Cr–1Mo steel using cruciform specimen // Proc. 9th China Japan Bilateral Symp. High Temp. Strength Mater. 2016. P. 60–66.

4. *Kobayashi H., Ohki R., Itoh T., Sakane M.* Multiaxial creep damage and lifetime evaluation under biaxial and triaxial stresses for type 304 stainless steel // Engin. Fract. Mech. 2017. 174. P. 30–43.

5. *Golubovsky E.R., Demidov A.G.* Evaluation of long-term strength under complex stress state of the EI437BU-VD alloy for GTD disks // Vestn. engine building. 2008. 3. P. 106–110.

ВЫБОР АППРОКСИМАЦИИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ПРОЦЕССОВ УСТАНОВИВШЕЙСЯ ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ

В.В. Назаров

¹НИИ механики МГУ им. М.В. Ломоносова, Россия
E-mail: inmec130@mail.ru

Ключевые слова: установившаяся ползучесть, длительная прочность, напряжение стартовой ползучести, предел кратковременной прочности.

Аннотация. Рассмотрены две аппроксимации экспериментальных данных по установившейся ползучести и длительной прочности. Первая аппроксимация с двумя материальными параметрами используется в механике деформируемого твердого тела. Вторая аппроксимация с четырьмя материальными параметрами не получила применения в механике деформируемого твердого тела по причине определения двух материальных параметров из специального эксперимента. Предложено вычислить эти два материальных параметра (напряжение стартовой ползучести, предел кратковременной прочности) из минимизации суммарной погрешности разности экспериментальных и аппроксимирующих значений. В качестве примера рассмотрены экспериментальные данные для титанового сплава ВТ5 при 650°C, которые получены при одноосном растяжении цилиндрических образцов при различных значениях номинального напряжения.

THE SELECTION OF AN APPROXIMATION FOR DESCRIBING THE PROCESSES OF SECONDARY CREEP AND CREEP RUPTURE

V. Nazarov¹

Institute of Mechanics, Lomonosov Moscow State University, Russian Federation

E-mail: inmec130@mail.ru

Keywords: secondary creep, creep rupture, starting creep stress, break creep stress.

Abstract. Two approximations of experimental data on secondary creep and creep rupture are considered. The first approximation with two material parameters is used in the mechanics of solid. The second approximation with four material parameters is not used in the mechanics of solid due to the determination of two material parameters from a special experiment. It is proposed to calculate these two material parameters (starting creep stress, break creep stress) from the minimum total error of the difference between experimental and approximating values. As an example, experimental data for the VT5 titanium alloy at 650°C are considered, which are obtained with uniaxial tension of cylindrical specimens at different values of nominal stress.

Как правило, при определении механических и физических характеристик процессов установившейся ползучести и длительной прочности для исследуемого металлического материала проводят длительные испытания на одноосное растяжение при разных значениях номинального напряжения. По причине того, что количество таких экспериментов ограничено, в качестве аппроксимации используют степенную зависимость [1, 2] с двумя материальными параметрами. Очевидный недостаток этой аппроксимации заключается в том, что она не ограничена пределами по номинальному напряжению, где таковыми являются напряжение стартовой ползучести – максимальное номинальное напряжение, при котором скорость деформации равна нулю, предел кратковременной прочности – минимальное номинальное напряжение, при котором происходит мгновенное хрупкое разрушение.

$$A_1 v_{\text{sec}}^{\text{app}} = \left[\frac{\sigma_{\text{nom}}}{\sigma_{\text{dim}}} \right]^{n_1} \quad A_1 > 0 \quad n_1 > 0 \quad (1)$$

$$\frac{t_{\text{rupt}}^{\text{app}}}{B_1} = \left[\frac{\sigma_{\text{nom}}}{\sigma_{\text{dim}}} \right]^{-m_1} \quad B_1 > 0 \quad m_1 > 0 \quad (2)$$

Чтобы исправить этот недостаток, в качестве аппроксимации в [3] рассмотрена дробно-степенная зависимость с четырьмя материальными параметрами, два из которых имеют определенный физический смысл напряжения стартовой ползучести и предела кратковременной прочности.

$$A_2 V_{\text{sec}}^{\text{app}} = \left[\frac{\sigma_{\text{nom}} - \sigma_{\text{start}}}{\sigma_{\text{break}} - \sigma_{\text{nom}}} \right]^{n_2} \quad \sigma_{\text{start}} < \sigma_{\text{nom}} < \sigma_{\text{break}} \quad A_2 > 0 \quad n_2 > 0 \quad (3)$$

$$\frac{t_{\text{rupt}}^{\text{app}}}{B_2} = \left[\frac{\sigma_{\text{break}} - \sigma_{\text{nom}}}{\sigma_{\text{nom}} - \sigma_{\text{start}}} \right]^{m_2} \quad \sigma_{\text{start}} < \sigma_{\text{nom}} < \sigma_{\text{break}} \quad B_2 > 0 \quad m_2 > 0 \quad (4)$$

Различие этих двух аппроксимаций можно представить на графике.

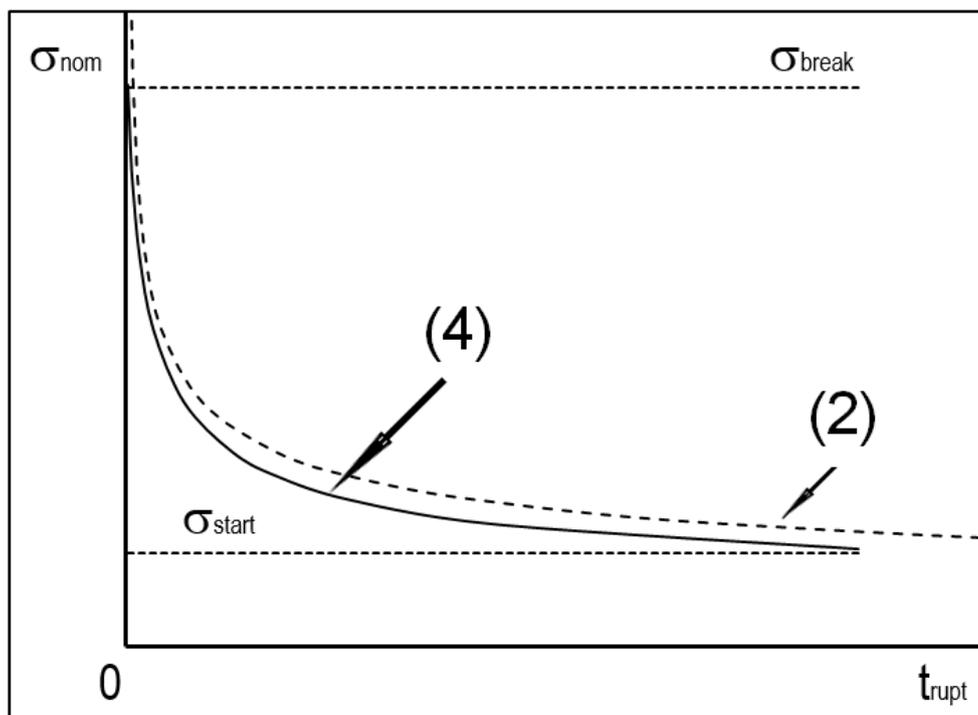


Рис. 1. Различие аппроксимаций [1–2] и [3] при описании длительной прочности

Несмотря на очевидное преимущество зависимостей над зависимостями широкого применения на практике аппроксимация [3], так и не получила по причине измерения напряжения стартовой ползучести и предела кратковременной прочности из специального эксперимента. Еще одна причина – большинство экспериментальных данных получают при значениях номинального напряжения заметного отличия от значений напряжения стартовой ползучести и предела кратковременной прочности – при этих условиях различие между аппроксимациями [1–2] и [3] малозаметно. В [4] вместо измерения напряжения стартовой ползучести и предела кратковременной прочности из специального эксперимента предложено их вычислить для минимальной суммарной погрешности разности экспериментальных и аппроксимирующих соответствующих значений.

В [4] рассмотрены экспериментальные данные (всего 6 различных серий механических испытаний на длительную прочность при одноосном растяжении) для различных металлических материалов таких, как никелевый сплав, нержавеющая сталь и титановый сплав. Анализ суммарных погреш-

ностей показал, что в 4 сериях испытаний аппроксимации [1–2] и [3] приблизительно одинаково хорошо описывают длительную прочность, а в оставшихся 2 сериях испытаний аппроксимация [3] проявила себя заметно лучше, чем аппроксимация [1–2].

Данная работа является продолжением [4], в которой кроме экспериментальных данных по длительной прочности рассмотрены экспериментальные данные [5] по установившейся ползучести для двух разных марок титановых сплавов, испытанных при одной и той же высокой температуре. В данной статье в качестве примера приведены аппроксимации [1–2] и [3] только для титанового сплава VT5 (93% Ti, 5% Al, 1% Fe, 1% Zr) при 650°C, откуда можно видеть, что аппроксимации [1–2] и [3] приблизительно одинаково хорошо описывают процессы установившейся ползучести и длительной прочности.

Это заключение еще предварительное и следует из анализа суммарных погрешностей для экспериментальных данных [5]. В дальнейшем предполагается продолжить исследование в этом направлении и рассмотреть другие экспериментальные данные, которые получены для других металлических материалов, чтобы можно уверенно подтвердить превосходство аппроксимации [3] над аппроксимацией [1–2].

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского Фонда фундаментальных исследований, проект 20–08–00387.

Литература

1. *Norton F.H.* Creep of Steel at high temperatures // New York: Mc. Graw-Hill Book Company. 1929.
2. *Bailey R.W.* Creep of steel under simple and compound stresses and the use of high initial temperature in steam power plant // Trans. World Power Conf. Tokyo. 1929. 3.
3. *Шестериков С.А., Юмашева М.А.* Конкретизация уравнения состояния ползучести // Изв. АН СССР. Механика твердого тела. 1984. 1. С. 86–92.
4. *Nazarov V.V., Lepeshkin A.R.* A Method for calculating creep limits // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2017. 1. P. 36–42.
5. *Назаров В.В.* Кратковременная ползучесть титановых сплавов VT5 и VT6 при высокой температуре // Завод. лаб. Диагн. матер. 2015. 81(6). С. 57–60.

References

- 1 *Norton F.H.* Creep of Steel at high temperatures // New York: Mc. Graw-Hill Book Company. 1929.
2. *Bailey R.W.* Creep of steel under simple and compound stresses and the use of high initial temperature in steam power plant // Trans. World Power Conf. Tokyo. 1929. 3.
3. *Shestikov S.A., Yumasheva M.A.* Concretization of the creep equation of state // Mech. Sol. 1984. 1. P. 86–92.
4. *Nazarov V.V., Lepeshkin A.R.* A Method for calculating creep limits // Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures. 2017. 1. P. 36–42.
5. *Nazarov V.V.* Short-term creep of titanium alloys VT5 and VT6 at high temperature // Industr. lab. Diagn. mater. 2015. 81(6). P. 57–60.