

В.Н. Ильин, С.В. Мордашов, С.В. Пузач
**О ЗАКОНАХ ПОЛЗУЧЕСТИ ДЛЯ РАСЧЁТА ОГНЕСТОЙКОСТИ
СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

Проведён обзор основных одномерных уравнений ползучести стали, указаны области их применения, рассмотрены теории ползучести и предложена наиболее приемлемая теория для решения задач огнестойкости стальных конструкций.

Ключевые слова: ползучесть, законы, теория, огнестойкость

V.N. Ilin, S.V. Mordashov, S.V. Pusach
**LAWS OF CREEP FOR COMPUTATION OF FIRE RESISTANCE
FOR STEEL EQUIPMENT**

The review of the basic one-dimensional equations for creep of steel was carried out and the range of application was specified. Also the theory of creep was considered and the most efficient theory for solving the problems of fire resistance for steel equipment was suggested.

Key words: creep, laws, theory, fire resistance

Реологические законы поведения стали

В соответствии с [1, 2], потеря несущей способности стальных конструкций (далее - СК) может возникнуть вследствие обрушения конструкций или возникновения предельных деформаций (прогиб конструкции или нарастание деформаций).

В работах [3-6] показана необходимость учета ползучести в расчётах огнестойкости СК, указаны недостатки концепции критической температуры. Для определения времени наступления предельного состояния "потеря несущей способности" вследствие возникновения предельных деформаций СК в расчетные соотношения необходимо включать реологические законы поведения материала при повышенных температурах.

Огромный вклад в развитие теории ползучести внес один из основоположников российской научной школы теории ползучести Работнов Ю.Н. Следует отметить и других ученых, работающих над развитием теории ползучести: Шестериков С.А., Соснин А.В., Качанов Л.М., Ф. Удквист, А. Надаи, Бойл Дж., Спенс Дж, Гарофало Ф., Малинин Н.Н., Розенберг В.М., Журков С.Н. и др. Однако в своих работах большее внимание ими уделялось легированным (жаростойким, жаропрочным, коррозионностойким) сталям, которые ввиду высокой стоимости не могут широко применяться в строительстве, поэтому исследовательские работы, испытания на ползучесть проводились по большей части только в отношении этих сталей, а данных о конструкционных сталях на сегодняшний день крайне мало.

В общем случае деформация ползучести ε_c является функцией напряжения σ , времени t , и температуры T [7, 8]:

$$\varepsilon_c = f(t, \sigma, T). \quad (1)$$

При математическом описании первой и второй стадий ползучести может использоваться предположение о подобии кривых ползучести с разделением переменных [7, 8, 12], при котором деформация ползучести может быть представлена следующим образом:

$$\varepsilon_c = f_1(t) f_2(\sigma) f_3(T). \quad (2)$$

Описание третьей стадии ползучести в практических расчётах на ползучесть не рассматривается, так как считается, что к началу третьей стадии конструкции теряют несущую способность.

Функциональные зависимости деформации ползучести от времени $f_1(t)$ для первой стадии ползучести (неустановившаяся ползучесть):

$$f_1(t) = Bt^{m_1} - \text{закон Бейли};$$

$$f_1(t) = a_1(1 + b_1 t^{1/3}) \exp(k_1 t) - \text{закон Андраде};$$

$$f_1(t) = \sum_j a_j t^{m_j} - \text{закон Грэхема и Уоллеса};$$

$$f_1(t) = 1 - e^{-b_2 t} - \text{закон Мак-Ветти};$$

$$f_1(t) = \frac{t}{a_2 + t} - \text{закон Одинга};$$

$$f_1(t) = \frac{1}{1 + a_3 t^{b_3}} - \text{закон Работнова};$$

$$f_1(t) = \frac{a_4 t}{1 + b_4 t} - \text{закон Фройденталю};$$

$$f_1(t) = a_5 t + b_5 [1 - \exp(-c_1 t)] - \text{закон Содерберга};$$

$$f_1(t) = a_6 + b_6 \lg t - \text{Филипс, Боас и Шмид, Смит, Шевенар, Доре и Оде};$$

$$f_1(t) = a_7 [\lg(1 + b_7 t)]^{2/3} - \text{закон Мотта и Наббаро};$$

$$f_1(t) = a_8 [1 - \exp(-b_8 t)] + c_2 [1 - \exp(-dt)] - \text{закон Мак Хенри};$$

$$f_1(t) = a_9 \lg t + b_9 t^{m_2} + c_3 t;$$

$$f_1(t) = a_{10} \lg t + b_{10} t + c_4 - \text{закон Вефера};$$

$$f_1(t) = \frac{a_{11} t}{b_{11} + t}, \quad f_2(t) = a_{12} (1 - e^{-b_{12} t}), \quad f_3(t) = a_{13} \ln(1 + \frac{t}{b_{13}}) - \text{зависимости, предложенные в работе [9]},$$

где t – время;

другие параметры являются постоянными свойств материала, полученные эмпирическим путём.

Для второй стадии ползучести (установившаяся ползучесть) функциональная зависимость деформации ползучести от времени имеет вид $f_1(t) = t$.

Функциональные зависимости деформации от напряжения $f_2(\sigma)$:

$f_2(\sigma) = B_1 \sigma^{n_1}$ – закон Нортон (Бейли), показатель n_1 для сталей колеблется от 3 до 8, иногда оказывается более 8 [7], для чистых металлов $n_1 \approx 4$ [10]. Анализ экспериментальных данных показал, что степенной закон справедлив при малых напряжениях [7, 11]. Автор [10] отмечает, что закон справедлив при напряжениях в диапазоне $10^{-4}E \div 10^{-6}E$, а при повышении температуры к значениям, близким к температуре плавления ($0,8T_{пл}$) для напряжений порядка $10^{-6}E$ постоянная n_1 приближается к единице. При больших напряжениях установившаяся ползучесть описывается экспоненциальным законом Людвига [7, 10];

$f_2(\sigma) = B_2 e^{\sigma/\mu}$ – закон Людвига (Дорна). Недостаток зависимости в том, что она дает отличную от нуля скорость ползучести при $\sigma = 0$, и, следовательно, не может давать удовлетворительных результатов при малых σ . Закон справедлив при напряжениях порядка $10^{-4}E$ и более и при температурах ниже $0,5T_{пл}$ [10]. Для исправления этого недостатка Надаи предложил заменить экспоненциальную функцию гиперболическим синусом;

$f_2(\sigma) = 2B_3 sh(\sigma/\mu_1)$ – закон Надаи (закон Прандтля). Дальнейшие исследования показали, что этот закон выполняется не всегда;

$f_2(\sigma) = 2B_4 (sh(\sigma/\mu_2))^{n_2}$ – закон Гарофало, содержит как частные случаи законы Нортон, Надаи и Людвига [7, 8, 10]. Как отмечает автор [11], зависимость мало пригодна для практического применения и не всегда соответствует экспериментальным данным;

$f_2(\sigma) = B_5 (e^{\sigma/\mu_3} - 1)$ – закон Содерберга, который предложил исправить закон Людвига в области малых σ ;

$f_2(\sigma) = B_6 \sigma e^{\sigma/\mu_4}$ – закон Одинга;

$f_2(\sigma) = \frac{1}{t_0 E} (\sigma - \sigma_r) e^{\frac{\sigma - \sigma_r}{b}}$ – закон Одинга, справедлив при $\sigma > \sigma_r$ [9];

$f_2(\sigma) = B_7 (\sigma - \mu_5)^{n_4}$ – закон, предложенный в работе [8];

$f_2(\sigma) = B_8 e^{-\mu_6/\sigma}$ – закон Ардела, для случая, когда график зависимости скорости установившейся ползучести от напряжения имеет точку перегиба. В работе [11] отмечается, что данная зависимость плохо описывает указанную кривую ползучести;

$f_2(\sigma) = \sum_{k=1}^n a_k \sigma^k$ – зависимость, предложенная Русовым [11], может

аппроксимировать наиболее известные уравнения (законы Нортон, Людви-ка, Надаи), получить решения в тех случаях, когда этого не удастся сделать при использовании даже степенного закона,

другие параметры являются постоянными свойств материала, полу-ченные эмпирическим путём.

По мнению автора [8], закон Нортон вытекает из физических сооб-ражений и очень широко используется на практике. По мнению автора [9, 12], наиболее экспериментально проверенными являются закон Нортон, удобный для расчёта, и закон Надаи. Однако, по мнению Мак-Ветти [7], за-кон Надаи дает более точные результаты, чем закон Нортон. Также авторы книги [13] считают, что закон Людвига для скорости ползучести является более точным, чем закон Нортон [7].

Функциональные зависимости деформации ползучести от температу-ры $f_3(T)$:

$f_3(T) = A_1 \exp(-\frac{U_0}{RT})$ - закон Аррениуса, наиболее приемлем для чис-

тых металлов [7];

где U_0 - энергия активации;

γ - структурно-чувствительный элемент;

R - универсальная газовая постоянная;

A_1, D_0 - материальные константы, полученные эмпирическим путём;

T - температура, К.

Для области малых температур Моттом и Наббаро была предложена модель, для которой скорость ползучести пропорциональна $T^{2/3}$ [7].

Используя степенной закон для напряжения и закон Аррениуса для температуры, можно получить следующую зависимость для скорости пол-зучести:

$$\dot{\epsilon}_c = B \sigma^n \exp(-\frac{U_0}{RT}). \quad (3)$$

Однако предположение о подобии кривых ползучести с разделением переменных может использоваться не всегда, деформация может представ-ляться в виде зависимости от напряжения и температуры $f(\sigma, T)$, например:

$$f(\sigma, T) = a_{15} T e^{\frac{-b_{15}}{T}} \operatorname{sh} \frac{c_5 \sigma}{T} - \text{зависимость, предложенная в работе [9];}$$

$$f(\sigma, T) = A_2 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right) \text{ - закон Каузмана и Махлина;}$$

$f(\sigma, T) = \kappa \exp(\eta\sigma + \mu T)$ – формула Милейко, проверенная на многих сплавах в случае кратковременной ползучести [7, 14],

где ϑ – температура, °C;

T_{nl} – температура плавления, K;

A_2 – постоянная свойств материала, полученная эмпирическим путём.

Автор [7] предполагает, что формула Каузмана и Махлина даст лучшие результаты в области умеренных температур, при более высоких температурах следует пользоваться зависимостью Аррениуса.

Розенберг В. М [10] для различных напряжений и температур предлагает следующие зависимости для скорости ползучести:

при низких температурах и высоких напряжениях

$$\dot{\varepsilon}_c = A_2 \exp\left(-\frac{U_0 - \gamma\sigma}{RT}\right); \quad (4)$$

при $T > 0,5T_{nl}$

$$\dot{\varepsilon}_c = A_3 \exp\left(-\frac{U_0}{RT}\right) \sigma^{n_6}; \quad (5)$$

при $T \rightarrow T_{nl}$

$$\dot{\varepsilon}_c = A_4 \exp\left(-\frac{U_0}{RT}\right) \sigma; \quad (6)$$

универсальная, пригодная для всех напряжений и температур

$$\dot{\varepsilon}_c = A_5 \exp\left(-\frac{U_0}{RT}\right) sh(\beta\sigma)^{n_7}. \quad (7)$$

Следует отметить и другие зависимости:

$f(\sigma, T) = a_{16} e^{\frac{-b_{16}}{T}} \sigma e^{\varphi(\sigma)}$, $f(\sigma, T) = a_{17} e^{b_{17}\vartheta} \sigma^{c_6}$ - зависимости, предложенные в работе [9];

$f(\sigma, T) = D_0 \exp(-U_0 / RT) \sigma / T$ - справедлив для диффузионной ползучести, при температурах, близких к T_{nl} [7].

Выбор той или иной зависимости, описывающей ползучесть, определяется теорией ползучести, применяемой в каждом конкретном случае. Основная задача теории ползучести состоит в том, чтобы связать измеряемые величины: напряжения, деформации, температуру и время – с помощью некоторого уравнения или системы уравнений, носящих универсальный характер [7]. Можно выделить следующие теории ползучести: теория старения, теория течения, теория упрочнения, наследственная теория ползучести, теория структурных параметров.

Наиболее общей, включающей как частные случаи теории, упомянутые выше, является теория структурных параметров, согласно которой

$\dot{\varepsilon}_c = f(\sigma, T, q_1, q_2, \dots, q_n)$, где $q_i = f(\varepsilon_c, \sigma, t, T)$ - некоторые структурные параметры материала. Достаточно общее предположение состоит в том, что изменения параметров q_i описывается кинетическими уравнениями вида $dq_i = a_i d\varepsilon + b_i d\sigma + c_i dt + k_i dT$, где a_i, b_i, c_i, k_i - некоторые функции от $\varepsilon_c, \sigma, t, T$, а также $q_1, q_2, \dots, q_n$ [7].

При решении задач огнестойкости с учетом реологических свойств стали для стадии установившейся ползучести предлагается [14] использовать теорию структурных параметров, что приводит к следующей зависимости между скоростью деформации, напряжением и температурой:

$$\dot{\varepsilon}_c = V(\sigma, T).$$

К тому же, наиболее достоверные результаты испытаний имеются в основном для участка установившейся ползучести [7]. Согласно этой теории наличием первого участка на кривой ползучести можно пренебречь. Кривые ползучести заменяются прямыми, проходящими через начало координат.

Существенное усовершенствование теории установившейся ползучести принадлежит Одквисту [7], который предложил учитывать первый участок ползучести, заменив кривую ползучести ломанной OAB (рис.1). Величина e_0 есть функция от σ и T , тогда

$$\dot{\varepsilon}_c = \dot{e}_0(\sigma, T) + V(\sigma, T). \quad (8)$$

Деформация e_0 включает в себя упругую деформацию, мгновенную пластическую и деформацию ползучести, накопленную на первом участке кривой.

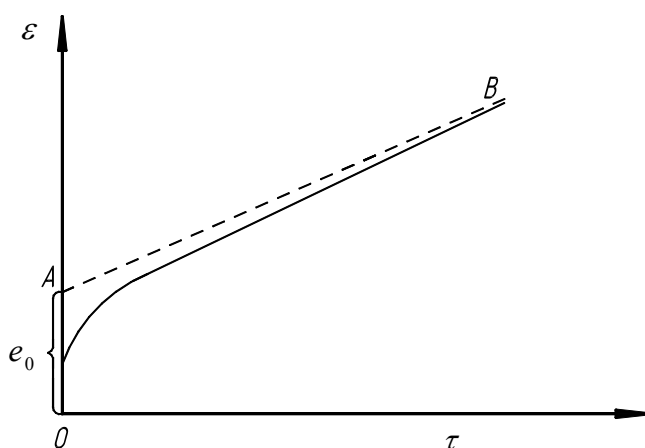


Рис. 1

Выбор того или иного закона связан, прежде всего, с его применимостью для решения задачи с заданными условиями. Расчет конструкций на огнестойкость с учетом ползучести можно считать надежным только в том случае, если имеются опытные данные по ползучести рассматриваемого материала во всем диапазоне рабочих напряжений и температур [7].

Заключение

Авторами приведены основные одномерные законы ползучести (зависимости деформации ползучести от времени, напряжения и температуры), при этом каждый закон справедлив в определенном диапазоне рабочих напряжений и температур. Наиболее достоверные результаты испытаний на ползучесть только для участка установившейся ползучести.

Для решения задач огнестойкости с учетом свойств ползучести стали наиболее приемлемым является использование теории структурных параметров для стадии установившейся ползучести с учетом первого участка кривой ползучести в форме Одквиста.

Литература

1. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования.
2. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции.
3. Ильин В.Н., Парцевский В.В. Расчет несущей способности металлоконструкций при пожаре с учетом ползучести // Тезисы 4-й Всесоюзной конференции "Пожаровзрывоопасность производственных процессов в металлургии". -М.:, 1991. -С. 180-183.
4. Ильин В.Н. О деформативных критериях в расчётах фактических пределов огнестойкости несущих металлоконструкций // Материалы 13-й научно-технической конференции "Системы безопасности" – СБ-2004. –М.: Академия ГПС МЧС России, 2004.
5. Ильин В.Н. Концепция предельных деформаций в расчётах фактических пределов огнестойкости несущих металлоконструкций // Вестник Академии Государственной противопожарной службы, № 4. -М.: Академия ГПС МЧС России, 2005. - С.71-77.
6. Мордашов С.В., Пузач С.В., Ильин В.Н. Оценка огнестойкости стальных конструкций // Вестник Академии Государственной противопожарной службы, № 5. -М.: Академии ГПС МЧС России, 2006.
7. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. -М.: Наука, 1966. - 752 с.
8. Бойл Дж., Спенс Дж. Анализ напряжений в конструкциях при ползучести: Пер. с англ. – М.: Мир, 1986. – 360 с.
9. Малинин Н.Н. Основы расчетов на ползучесть. -М., Машгиз, 1948, 120 с.
10. Розенберг В.М. Основы жаропрочности металлических материалов. -М.: Металлургия, 1973. – 324 с.
11. Русов Б.П. Методы расчёта конструкций на ползучесть: Учебное пособие. – Новосибирск: НГАСУ, 1998. – 88 с.
12. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. –М. Машиностроение, 1975. – 400 с.
13. Одинг И.А. и др. Теория ползучести и длительной прочности металлов. –М.: Металлургиздат, 1959.
14. Ильин В.Н., Парцевский В.В. Ползучесть металлических элементов конструкций в условиях пожара: Лекции. - М.: ВИПТШ МВД СССР, 1990. – 56 с.
15. Гарофало Ф. Законы ползучести и длительной прочности металлов и сплавов. –М.: Металлургия, 1968. – 304 с.
16. Аршакуни А.Л., Локощенко А.М., Киселевский В.Н., Шестериков С.А. и др. Закономерности ползучести и длительной прочности: Справочник / Под общ. ред. С.А. Шестерикова. – М.: Машиностроение, 1983. – 101 с., ил.