

Проблема длительной высокотемпературной прочности металлических материалов

д.ф.-м.н. проф. Арутюнян Р.А.
Санкт-Петербургский государственный университет
8 (812) 5266591, Robert.Arutyunyan@paloma.spbu.ru

Аннотация. Концепция хрупкого и вязко-хрупкого разрушения в условиях высокотемпературной ползучести Качанова-Работнова заложила основу континуальной механики поврежденности. В статье конкретизируется параметр поврежденности и формулируется система непротиворечивых взаимосвязанных кинетических уравнений скорости ползучести и поврежденности. Согласно полученным решениям, построены теоретические кривые изменения плотности, деформации ползучести и длительной прочности.

Ключевые слова: высокотемпературная ползучесть, длительная прочность, тепловая хрупкость, параметр сплошности и поврежденности Качанова-Работнова, разрыхление, закон сохранения массы.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект № 14-01-00823).

Введение

Концепция хрупкого и вязко-хрупкого разрушения в условиях высокотемпературной ползучести Качанова-Работнова [1-4] заложила основу континуальной механики поврежденности. После опубликования этих работ последовали многочисленные модификации и уточнения. Подход Качанова-Работнова является интуитивным и основан на здравых наблюдениях. Как отмечено в статье [5], подобно Роберту Гуку, Качанов не стал учитывать локальные микро-неоднородности и обратил внимание на макродефекты, которые поддаются измерению. В работах Качанова четко отмечены принятые предположения, указаны их ограничения и сформулирован критерий длительной прочности. Основываясь на тех же принципах, Работнов сформулировал взаимосвязанные уравнения ползучести и поврежденности [3]. В статье рассматриваются основные этапы исследований по высокотемпературной ползучести и длительной прочности металлических материалов. Основываясь на многочисленных экспериментальных исследованиях по изменению плотности в процессе ползучести, конкретизируется параметр поврежденности и формулируется система непротиворечивых взаимосвязанных кинетических уравнений скорости ползучести и поврежденности. Согласно полученным решениям, построены теоретические кривые изменения плотности, деформации ползучести и длительной прочности.

1. Основные этапы исследований ползучести и длительной прочности

Конец девятнадцатого и начало двадцатого веков характеризуются интенсивной эксплуатацией различных паросиловых машин и установок. Для увеличения коэффициента полезного действия постоянно повышаются рабочие температуры с выходом в область температур, при которых возможно проявление эффекта ползучести.

График роста рабочих температур по годам, начиная с 1800 г., показан на рисунке 1 [6]. Скачкообразный рост рабочих температур в 1920-1930 гг. был связан с использованием перегретого до 400°C пара в различных энергетических установках.

Первые экспериментальные исследования явления ползучести были выполнены Коста де Андраде в 1910 г. В этих работах, в частности, описаны все участки кривой ползучести и предложена соответствующая терминология, которая впоследствии стала общепризнанной.

Следующий значительный вклад в теорию ползучести был внесен Нортоном в 1929 г.

Изучая кривые ползучести для различных уровней напряжений, он сформулировал закон, по которому скорость установившейся ползучести $\dot{\epsilon}$ выражается соотношением $\dot{\epsilon} = B\sigma^m$, где: B , m – постоянные.

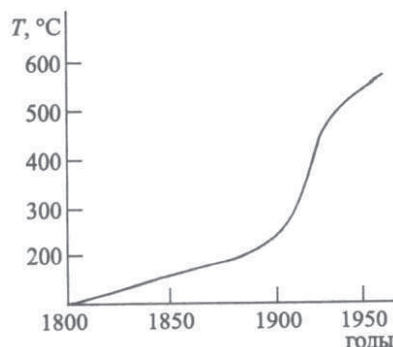


Рисунок 1. График роста рабочих температур по годам

В инженерной практике серьезное внимание на явление ползучести стали обращать в связи с аварийными разрушениями котлов, паровых и газовых турбин и т.д., работающих в условиях заметной ползучести. В сороковых-пятидесятых годах прошлого столетия были начаты длительные испытания на разрушение при ползучести в различных странах (США, СССР, Япония). В некоторых странах эти работы продолжают и в настоящее время.

В Советском Союзе опыты на ползучесть и длительную прочность продолжительностью до тридцати лет выполнялись в ЦКТИ (А.А. Чижик, Ю.К. Петреня).

На практике часто используются эмпирические критерии длительной прочности в виде степенной или экспоненциальной зависимости между временем до разрушения t_p и напряжением σ :

$$t_p = B \cdot \sigma^{-b}, \quad (1)$$

$$t_p = C \cdot \exp(-\beta\sigma), \quad (2)$$

где: B , b , C , β – постоянные.

Эти критерии описывают ограниченный участок кривой длительной прочности, которые обычно представляются в логарифмических или полулогарифмических координатах двумя ломаными линиями (участки вязкого и хрупкого разрушений).

Соотношение (2) было предложено Буссе по результатам испытаний на прочность хлопкового шнура. Исследуя зависимость долговечности от температуры для искусственного шелка, хлопка и нейлона, Буссе высказал предположение об активационной природе длительного разрушения и предложил зависимость от температуры следующего вида:

$$t_p = B \cdot \exp\left(\frac{U}{k \cdot T}\right), \quad B = B(\sigma), \quad (3)$$

где: k – постоянная Больцмана, B – функция, зависящая от напряжения, U – энергия активации разрушения.

Дальнейшие экспериментальные исследования показали, что энергия активации разрушения U является функцией напряжения. По результатам многочисленных экспериментальных исследований (Журков с сотрудниками [7-8]) для этой функции была предложена линейная зависимость от напряжения: $U(\sigma) = U_0 - \gamma \cdot \sigma$, где: U_0 , γ – постоянные.

Таким образом, был сформулирован модифицированный вариант критерия (3) в виде термофлуктуационной или кинетической концепции (формула Журкова [8]):

$$t_p = t_0 \cdot \exp\left(\frac{U_0 - \gamma \cdot \sigma}{k \cdot T}\right), \quad (4)$$

где: t_0 – постоянная величина, соответствующая периоду тепловых колебаний атомов $10^{-13} - 10^{-11}$ с, U_0 – начальная энергия активации, равная энергии активации распада межатомных связей, γ – структурно чувствительный коэффициент. Как показывают опыты, критерий (4) описывает ограниченный участок кривой длительной прочности.

Для более полного описания опытных кривых длительной прочности используется более общая эмпирическая формула:

$$t_p = \psi(\sigma, T) \cdot \exp(-\beta \cdot \sigma), \quad (5)$$

где: β – постоянная.

Участки вязкого и хрупкого разрушения на кривой длительной прочности определяют два предельных состояния металлических материалов, первое, близкое к вязкому течению, реализуется при воздействии относительно больших напряжений и высоких температур. Другой предельный случай реализуется при длительном воздействии малых напряжений и высоких температур. В этих условиях металлические материалы охрупчиваются [10] (эффект тепловой хрупкости). В результате, например, некоторые жаропрочные материалы разрушаются при длительных испытаниях с удлинением около одного процента.

До середины двадцатого века преобладало мнение, что эффект тепловой хрупкости связан с технологическими факторами. Однако, когда эффект был обнаружен на чистых металлах [10], были выполнены дополнительные структурные исследования и было установлено, что это явление тепловой хрупкости связано с физическими процессами накопления пористости по границам зерен по механизму диффузии вакансий и зернограничного проскальзывания.

Проблема ползучести и длительной прочности стала предметом многочисленных исследований методами физики, материаловедения, механики. Далее основное внимание уделяется механическим методам решения этой проблемы, с помощью которых были сформулированы критерии вязкого и хрупкого разрушений. Основоположниками этих работ являются Хофф, Качанов и Работнов.

2. Критерий вязкого разрушения Хоффа

Критерий вязкого разрушения был сформулирован Хоффом в 1953 г. [12]. Решается задача о растяжении цилиндрического стержня в условиях ползучести заданной нагрузкой P .

Обозначим через $\varepsilon_x = \ln \frac{l}{l_0}$ компоненту продольной деформации, где l_0 , l – соответственно начальные и текущие длина стержня.

Примем степенной закон ползучести, согласно которому связь между скоростью деформации $\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt}$ и напряжением σ имеет вид:

$$\frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} = B \cdot \sigma^m = B \cdot \sigma_0^m \left(\frac{F_0}{F} \right)^m, \quad (6)$$

где: $\sigma = \frac{P}{F} = \sigma_0 \frac{F_0}{F}$, $\sigma_0 = \frac{P}{F_0}$, F_0 , F – начальная и текущая площадь поперечного сечения стержня, σ – истинное, σ_0 – условное напряжение.

В случае несжимаемого материала $\rho = \rho_0$ и из закона сохранения массы $\rho_0 \cdot l_0 \cdot F_0 = \rho \cdot l \cdot F$ следует $\frac{F_0}{F} = \frac{l}{l_0}$. Подставляя последнее соотношение в уравнение (6), и

решая его при условии $t = 0$, $l = l_0$, получим:

$$\frac{1}{m} \cdot \left[1 - \left(\frac{l}{l_0} \right)^{-m} \right] = B \cdot \sigma_0^m \cdot t \quad (7)$$

Пусть при $t = t_p^B$, $l \rightarrow \infty$, тогда из формулы (7) следует критерий вязкого разрушения Хоффа:

$$t_p^B = \frac{1}{m \cdot B \cdot \sigma_0^m} \quad (8)$$

Критерий (8) совпадает с экспериментальным критерием длительной прочности (1) и на плоскости $\lg \sigma_0 - \lg t_p$ изображается в виде прямой линии, соответствующей области вязких разрушений.

Из соотношения (7) следует закон изменения площади поперечного сечения стержня в процессе ползучести:

$$\frac{F}{F_0} = \left(1 - \frac{t}{t_p^B} \right)^{\frac{1}{m}} \quad (9)$$

3. Параметры сплошности и поврежденности Качанова-Работнова и критерий чисто хрупкого разрушения

При формулировке критерия хрупкого разрушения принималось во внимание значительное накопление дефектов (пористость) в процессе длительной высокотемпературной ползучести. Степень деградации материала хорошо видна на рисунке 2.

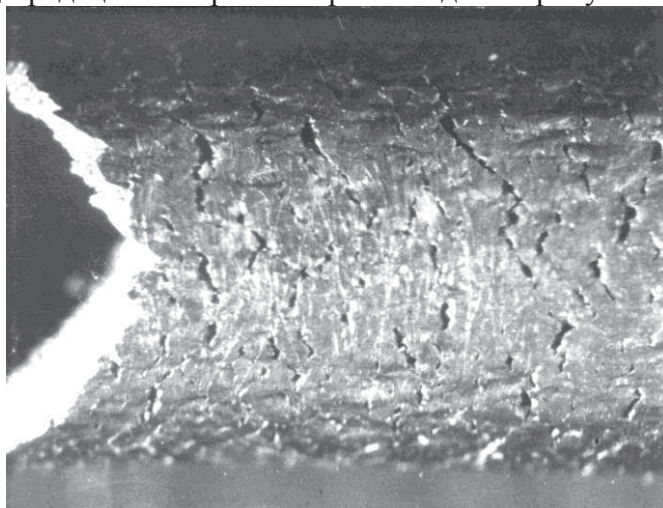


Рисунок 2. Фотография разрушенного образца из сплава ХН65ВМТЮ вследствие накопления пористости и хрупкого разрушения в процессе длительной высокотемпературной ползучести при $T = 550^\circ \text{C}$

Критерий чисто хрупкого разрушения был сформулирован Л.М. Качановым в 1958 г. [1] и Ю.Н. Работновым в 1959 г. [2] и 1963 г [3]. Вводились параметры сплошности ψ (Качанов) и параметр поврежденности $\omega = 1 - \psi$ (Работнов). Считается, что $1 \geq \psi \geq 0$ (соответственно $0 \leq \omega \leq 1$) и что моменту $\psi = 0$ ($\omega = 1$) соответствует предельное состояние, т.е. переход от скрытого к непосредственно наблюдаемому разрушению. Следует отметить, что параметрам сплошности и поврежденности не приписывается определенный физический

смысл и они определяются с помощью кинетического уравнения $\frac{d\omega}{dt} = f(\omega, \sigma)$.

При формулировке критерия длительной прочности функция $f(\omega, \sigma)$ принимается в виде степенной зависимости, и кинетическое уравнение поврежденности записывается в виде:

$$\frac{d\omega}{dt} = A \cdot \sigma^n = A \cdot \left(\frac{\sigma_0}{1-\omega} \right)^n \cdot \left(\frac{F_0}{F} \right)^n, \quad (10)$$

где: A, n – постоянные.

Далее принимается предположение, что в области хрупкого разрушения ползучесть отсутствует, тогда $F = F_0$ и решение уравнения (10) при начальном условии $t = 0, \omega = 0$ записывается в виде:

$$\omega = 1 - \left[1 - A \cdot (n+1) \cdot \sigma_0^n \cdot t \right]^{1/(n+1)}. \quad (11)$$

Отметим, что условие $F = F_0$ не означает, что деформация ползучести отсутствует, так как согласно закону сохранения массы деформация определяется величиной разрыхления материала и равна $\varepsilon = \ln(\rho_0 / \rho) \approx (\rho_0 - \rho) / \rho_0$.

Время чисто хрупкого разрушения следует из (11) при условии $\omega = 1$:

$$t_p^x = \frac{1}{(n+1) \cdot A \cdot \sigma_0^n}. \quad (12)$$

По конструкции формула (12) аналогична критерию вязкого разрушения Хоффа. Однако $m \neq n$ и на плоскости $\lg \sigma_0 - \lg t_p$ критерий (12) изображается в виде прямой линии, наклон которой отличен от наклона прямой Хоффа.

Для описания участка вязко-хрупкого разрушения Качанов [1] предложил теорию, в которой учитывается взаимное влияние процессов деформирования и разрушения.

Принимается взаимосвязанная система из двух уравнений:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} = B \cdot \sigma^m = B \cdot \sigma_0^m \cdot \left(\frac{F_0}{F} \right)^m, \quad (13)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = A \cdot \left(\frac{\sigma}{1-\omega} \right)^n = A \cdot \left(\frac{\sigma_0}{1-\omega} \right)^n \cdot \left(\frac{F_0}{F} \right)^n. \quad (14)$$

Рассматривая эти уравнения по отдельности, и принимая указанные выше предположения, можно получить критерии чисто вязкого (8) и хрупкого (12) разрушений.

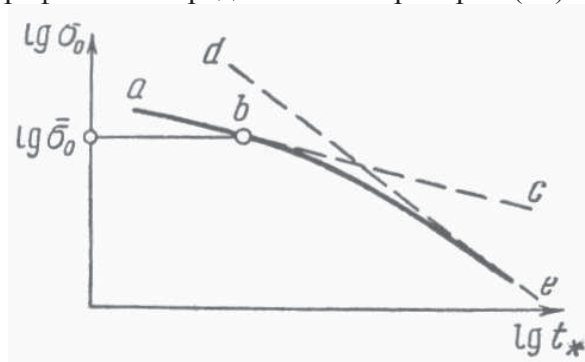
Для получения общего критерия вязко-хрупкого разрушения в кинетическое уравнение поврежденности (14) вносится выражение для площади поперечного сечения стержня (9): $F / F_0 = (1 - t / t_p^B)^{1/m}$, полученного из решения Хоффа для случая чисто вязкого течения. С учетом этой формулы и условия $\omega = 1$ критерий вязко-хрупкого разрушения следует из решения уравнения (14) и имеет вид:

$$t_p = t_p^B \left[1 - \left(1 - \frac{(m-n)}{m} \cdot \frac{t_p^x}{t_p^B} \right)^{m/(m-n)} \right]. \quad (15)$$

При выводе формулы (15) принимаются следующие противоречивые предположения: считается, что текущая площадь поперечного сечения стержня на всем интервале вязко-хрупкого разрушения определяется из чисто вязкого решения; критерий вязко-хрупкого разрушения (15) выводится с использованием условия $\omega = 1$, которое по первоначальному

определению является условием чисто хрупкого разрушения.

На рисунке 3 дано графическое представление критерия (15).



**Рисунок 3. Кривая длительной прочности abe согласно критерию (15):
 ac – по критерию Хоффа, de – по критерию Качанова-Работнова**

Прямая ac на рисунке 3 описывает разрушение по критерию Хоффа, прямая de – по критерию чисто хрупкого разрушения Качанова-Работнова. Постоянные A , n можно определить по данным обычных испытаний на длительную прочность по начальному участку прямой de .

При напряжениях $\sigma > \sigma_0^*$ разрушение является вязким и время до разрушения соответствует критерию Хоффа. Критерий (15) дает качественно правильную картину процессов разрушения при ползучести. Как отмечает Качанов [4], в количественном отношении эти результаты могут существенно отклоняться от опытных.

В статье Качанова [1] имеется следующее замечание: «Полезно отметить, что предположение о влиянии ψ (или ω) на деформацию ползучести (включение $1 - \omega = \psi$ в знаменатель правой части уравнения (10)) усложняет анализ и приводит к заключениям, противоречащим опытным данным; так при $m - n - 1 > 0$ разрушение всегда будет вязким». Пренебрегая этим замечанием, Работнов [3] вводит систему из двух взаимосвязанных уравнений для деформации ползучести и параметра поврежденности:

$$\dot{\varepsilon} = b \cdot \sigma^m \cdot (1 - \omega)^{-q}, \quad (16)$$

$$\dot{\omega} = c \cdot \sigma^n \cdot (1 - \omega)^{-r}, \quad (17)$$

где: b, c, m, n, q, r – постоянные.

В случае чисто хрупкого разрушения и малых деформаций можно считать $F \approx F_0$, $\sigma = \sigma_0 = \text{const}$. Из решения системы уравнений (16) и (17) следуют критерии чисто вязкого и хрупкого разрушения и соотношение для деформации ползучести (согласно обозначениям в уравнениях (16) и (17)):

$$t_p^x = \frac{1}{c \cdot (1 + r) \cdot \sigma_0^n}, \quad t_p^B = \frac{1}{b \cdot m \cdot \sigma_0^m}, \quad \varepsilon = \frac{k}{m} \cdot \frac{t_p^x}{t_p^B} \cdot \left[1 - \left(1 - \frac{t}{t_p^x} \right)^{1/k} \right], \quad (18)$$

$$\text{где: } k = \frac{r + 1}{r + 1 - g}.$$

Далее принимается условие несжимаемости, тогда напряжение выражается следующей формулой: $\sigma = \sigma_0 \cdot \exp(\varepsilon)$, а система уравнений (3.7) и (3.8) записывается в виде:

$$\dot{\varepsilon} = b \cdot \sigma_0^m \cdot (1 - \omega)^{-q} \cdot \exp(m \cdot \varepsilon), \quad (19)$$

$$\dot{\omega} = c \cdot \sigma_0^n \cdot (1 - \omega)^{-r} \cdot \exp(n \cdot \varepsilon). \quad (20)$$

Разделив уравнение (19) на (20), можно получить дифференциальное уравнение с разделяющимися переменными:

$$\frac{d\varepsilon}{d\omega} = \frac{r+1}{m} \cdot \frac{t_p^x}{t_p^b} \cdot (1-\omega)^{r-g} \cdot \exp[(m-n) \cdot \varepsilon]. \quad (21)$$

Принимая начальное условие $\varepsilon = 0$ при $\omega = 0$, решение уравнения (3.12) записывается в виде:

$$\varepsilon = \frac{1}{m-n} \cdot \ln[1 - v + v \cdot (1-\omega)^{r-g+1}], \quad m \neq n, \quad (22)$$

где: $v = \frac{m-n}{r-g+1} \cdot \frac{b}{c} \cdot \sigma_0^{m-n}$.

Эти решения, полученные при предположении о несжимаемости среды, противоречат самой концепции поврежденности, которое предполагает наличие дефектного состояния и его эволюцию в процессе высокотемпературной ползучести.

4. Критерий хрупкого (квазихрупкого) разрушения, основанный на разрыхлении материала

Были предложены различные варианты материализации параметра повреждаемости непосредственно в физических опытах. Наиболее распространенными можно считать опыты, в которых изучается число, размер и распределение пор в процессе ползучести. Согласно этим исследованиям в качестве параметра поврежденности рассматривалась относительная величина пор – число пор, отнесенное к площади поперечного сечения образца, или отношение суммарной длины поперечных границ, занятых порами и микротрещинами, к длине всех поперечных границ между зёрнами (А.М. Локощенко [13]). Другие авторы считают необратимое изменение объема (разрыхление по терминологии В.В. Новожилова [14]) или плотности наиболее представительной характеристикой поврежденности и в опытах на долговременную прочность и ползучесть изучаются изменения этих характеристик.

Исследования по изменению плотности в условиях ползучести показали, что залечивание пор однократным и многократным наложением гидростатического давления [15, 16] приводит к резкому торможению деформации ползучести и значительному увеличению времени до разрушения. Эти опыты указывают на определяющую роль разрыхления на процессы длительного разрушения металлических материалов.

Далее считаем, что пористость является основной характеристикой поврежденности, а в качестве интегральной меры пористости принимается изменение плотности, разрыхление материала. В соответствии с этими представлениями, параметр поврежденности можно определить соотношением $\omega = 1 - \rho / \rho_0$, где ρ_0 – начальная, ρ – текущая плотность. В начальном состоянии $\rho = \rho_0$, $\omega = 0$, в момент разрушения $\rho \rightarrow 0$, $\omega = 1$, таким образом, параметр ω изменяется в пределах $0 \leq \omega \leq 1$. Рассмотрим задачу о ползучести стержня под воздействием постоянной растягивающей нагрузки. Учитывая закон сохранения массы $\rho_0 \cdot l_0 \cdot F_0 = \rho \cdot l \cdot F$ в соотношении Нортона и вышеуказанное замечание Качанова получим:

$$\frac{1}{l} \cdot \frac{dl}{dt} = B \cdot \sigma_0^m \cdot \left(\frac{l}{l_0} \right)^m \cdot (1-\omega)^m, \quad (23)$$

где: B , m – постоянные, $\sigma = \sigma_0 \frac{F_0}{F}$, $\sigma_0 = \frac{P}{F_0}$, l_0 , F_0 – начальные, l , F – текущие длина и

площадь поперечного сечения стержня.

В случае несжимаемой среды $\rho = \rho_0$, $\omega = 0$ из решения уравнения (23) (при условии $t = t_p^b$, $\varepsilon \rightarrow \infty$) следует критерий вязкого разрушения Хоффа (2.3).

Следуя Качанову-Работнову, введенный нами параметр поврежденности зададим следующим кинетическим уравнением:

$$\frac{d\omega}{dt} = A \cdot \left(\frac{\sigma_0}{1-\omega} \right)^n \cdot \left(\frac{F_0}{F} \right)^n, \quad (24)$$

где: A, n – постоянные.

Принимая условие $F \approx F_0$, которое означает, что деформация ползучести согласно закону сохранения массы определяется величиной разрыхления материала $\varepsilon = \ln(\rho_0/\rho) \approx (\rho_0 - \rho)/\rho_0$, решение уравнения (24) при начальном условии $t = 0, \omega = 0$ запишется в виде:

$$\omega = 1 - \rho/\rho_0 = 1 - \left[1 - \frac{t}{t_p^x} \right]^{1/n+1}, \quad (25)$$

где: $t_p^x = \frac{1}{(n+1) \cdot A \cdot \sigma_0^n}$.

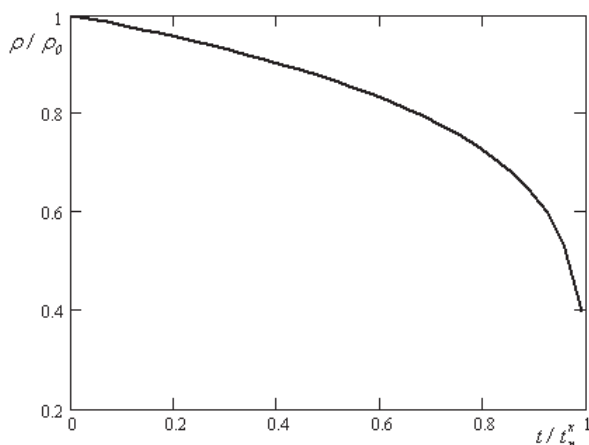


Рисунок 4. Кривые изменения плотности согласно соотношению (25)

Как показывают результаты многочисленных опытов [15, 17-24], кривые изменения плотности, полученные в процессе ползучести для различных металлических материалов (магний, медь, алюминий, жаропрочные сплавы и др.), полностью соответствуют теоретической кривой, показанной на рисунке 4.

Внося (25) в уравнение (23) и принимая начальное условие $t = 0, \varepsilon = 0$, из решения уравнения (4.1) получим соотношение для деформации ползучести

$$\varepsilon = \frac{1}{m} \cdot \ln \left\{ 1 + \frac{t_p^x \cdot (n+1)}{t_p^B \cdot (m+n+1)} \cdot \left[\left(1 - \frac{t}{t_p^x} \right)^{\frac{m+n+1}{n+1}} - 1 \right] \right\}^{-1}. \quad (26)$$

Кривые ползучести согласно соотношению (26) для разных уровней напряжений показаны на рисунке 5. Как показывают расчеты при соответствующем выборе коэффициентов можно описать более точно экспериментальные кривые ползучести для различных материалов. При расчетах по формуле (26) были использованы следующие коэффициенты: $m = 4, n = 2, A = 10^{-10} [\text{МПа}]^{-2} [\text{ч}]^{-1}, B = 10^{-12} [\text{МПа}]^{-4} [\text{ч}]^{-1}$.

Критерий длительной прочности для хрупких материалов можно получить из решения (26) при предположении, что деформация ползучести в момент разрушения постоянна $\varepsilon = \varepsilon_* = \text{const}$. Как показывают опыты [25], для горных пород это условие выполняется: предельная деформация составляет порядка двух процентов и определяется величиной разрыхления, инвариантной относительно приложенных напряжений. Принимая это условие из (26)

следует критерий длительной прочности, показанный на рисунке 6.

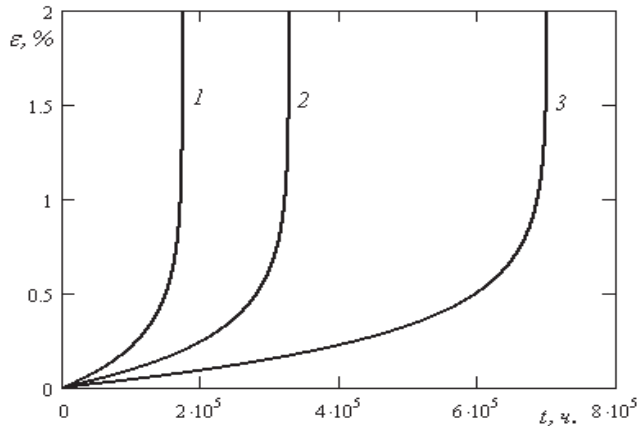


Рисунок 5. Кривые ползучести согласно соотношению (26) для разных уровней напряжений: 1 – 35 МПа, 2 – 30 МПа, 3 – 25 МПа

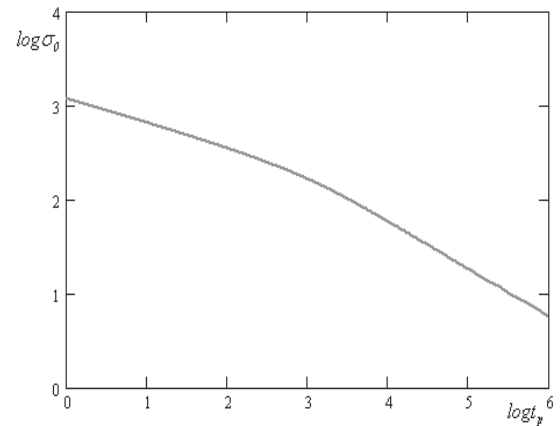


Рисунок 6. Кривая длительной прочности согласно соотношению (26) ($\varepsilon_* = 2\%$)

Выводы

1. При формулировке взаимосвязанных уравнений ползучести и поврежденности принимается условие несжимаемости. Такое предположение противоречит самому понятию поврежденности.
2. В уравнениях Качанова-Работнова для скоростей ползучести и поврежденности входят от четырех до шести постоянных. Часть постоянных можно определить из опытов на ползучесть, а остальные из опытов на длительную прочность (по начальному участку кривой длительной прочности). По найденным величинам постоянных прогнозируется весь участок кривой длительной прочности. При таком подходе нельзя рассчитывать на достоверность прогнозирования в области хрупких разрушений.
3. С учетом закона сохранения массы сформулированы кинетические уравнения для деформации ползучести и поврежденности. В уравнения входят четыре постоянные, которые могут быть определены из независимых физических опытов на ползучесть и разрыхление.

Литература

1. Качанов Л.М. О времени разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. ОТН. 1958. № 8. С. 26-31.
2. Работнов Ю.Н. О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР. 1959. С. 5-7.
3. Работнов Ю.Н. О разрушении вследствие ползучести // ПМТФ. 1963. № 2. С. 113-123.
4. Качанов Л.М. Основы механики разрушения. М.: Наука. 1974. 311с.
5. Penny R.K. The use of damage concepts in component life assessment // Int. J. Pres. Ves. & Piping. 1966. v. 66. P. 263-280.
6. Арутюнян Р.А. Проблема деформационного старения и длительного разрушения в механике материалов. СПб.: Изд-во СПбГУ. 2004. 252с.
7. Журков С.Н., Нарзуллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // Журнал технической физики. 1953. том 23. вып. 10. С. 1677-1689.
8. Журков С.Н. К вопросу о физической основе прочности // Физика твердого тела. 1980. том 22. вып. 11. С. 3344-3349.
9. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.В. Кинетическая природа прочности твердых тел. М.: Наука. 1974. 550с.
10. Арутюнян Р.А. Проблема охрупчивания в механике материалов. // Вестн. С.-Петербург. ун-та. 2009. сер.1. вып. 1. С. 54-57.
11. Чадек Й. Ползучесть металлических материалов. М.: Мир. 1987. 304с.

12. Hoff N.J. The necking and rupture of rods subjected to constant tensile loads // Jour.appl.mech. 1953. vol. 20. № 1. P.105-108.
13. Локощенко А.М. Исследование повреждаемости материала при ползучести и длительной прочности // ПМТФ. 1982. № 6. С.129-133.
14. Новожилов В.В. О пластическом разрывлении // Прикладная математика и механика. 1965. № 4. С. 681-689.
15. Ratcliffe R.T., Greenwood G.W. Mechanism of cavitation in magnesium during creep // Phil. Mag. 1965. vol. 12. P. 59-69.
16. Betekhtin V.I. Porosity of solids // Trans. St.-Petersburg Acad. Sci. for strength problems. 1997. vol. 1. P. 202-210.
17. Hanson D., Wheller M. The deformation of metals under prolonged loading. Part 1. The flow and fracture of aluminum // The Journal of the Institute of Metals. 1931. vol. 45. P. 229-264.
18. Boethner R.C, Robertson W.D. A study of the growth of voids in copper during the creep process by measurement of the accompanying change in density // Trans. of the Metallurg. Society of AIME. 1961. vol. 221. № 3. P. 613-622.
19. Beghi C., Geel C., Piatti G. Density measurements after tensile and creep tests on pure and slightly oxidised aluminium // J. Mat. Sci. 1970. vol. 5. № 4. P. 331-334.
20. Brathe L. Macroscopic measurements of creep damage in metals // Scand. J. Metal. 1978. vol. 7. № 5. P. 199-203.
21. Woodford D.A. Density changes during creep in nickel // Metal science journal. 1969. vol. 3. № 11. P. 234-240.
22. Куманин В.И., Ковалева Л.А., Алексеева С.В. Долговечность металла в условиях ползучести. М.: Металлургия. 1988. 223с.
23. Bowring P., Davies P.W., Wilshire B. The strain dependence of density changes during creep // Metal science journal. 1968. vol. 2. № 9. P. 168-171.
24. Brace W.F., Pauling B.W., Scholz C.H. Dilatancy in the fracture of crystalline rocks // J. Geoph. Res. 1966. vol. 71. № 16. P. 3939-3953.
25. Kranz R.L., Scholz C.H. Critical dilatant volume of rocks at the onset of tertiary creep // J. Geoph. Res. 1977. vol. 82. № 30. P. 4893-4898.