

УДК 539.32

ПОЛЗУЧЕСТЬ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ
ТЕМПЕРАТУРАХ

Мурадян М. Л.

Մ. Լ. Մուրադյան

Ամխածնային պողպատների սողքը բարձր ջերմաստիճանային պայմաններում Աշխատանքում դիտարկված է ամխածնային պողպատների սողքի երևույթը բարձր ջերմաստիճանային պայմաններում և առաջարկված են սողքի ռեոլոգիական հավասարումներ, որոնց մեջ որպես պարամետր օգտագործվում է ամխածնի պարունակությունը տվյալ պողպատում: Բերված են կատարված փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները և հավասարումներում մասնակցող հաստատումների բվային արժեքները:

M. L. Muradyan

The creep of carbonaceous steel in the high temperatures

В работе рассматривается ползучесть углеродистых сталей при высоких температурах и предложены реологические зависимости ползучести, в которых как параметр, использовано содержание углерода в данной марке стали. Приведены экспериментальные результаты и определены значения постоянных аппроксимации.

В существующей методике решения инженерных задач высокотемпературной ползучести [4, 5, 6] используются реологические зависимости, полученные путем аппроксимации экспериментальных кривых ползучести для конкретных марок сталей, что существенно сужает возможности применения полученных теоретических результатов. Углеродистые стали не используются в конструкциях, работающих при высоких температурах и ползучесть этих сталей при высоких температурах стали исследовать в связи с внедрением технологии непрерывной разливки стали. Однако все экспериментальные исследования ползучести углеродистых сталей [5, 6, 9] проведены при постоянной скорости деформирования испытываемого образца, что затрудняет теоретическую обработку полученных результатов. Для оптимизации параметров некоторых технологических операций (непрерывная разливка, сварка, высокотемпературная пайка и т.д.) необходимо установить экспериментально обоснованные зависимости ползучести углеродистых сталей, чему и посвящена настоящая статья.

Для углеродистых сталей при температурах выше $1100^{\circ}\text{C}+1200^{\circ}\text{C}$ существенную роль играет ползучесть, связанная с процессами пластического течения по границам зерен, где с большой скоростью осуществляется самодиффузия. Если дисперсные частицы, выделившиеся на границах зерен у жаропрочных легированных сталей, являются тугоплавкими и практически полностью устраняют ползучесть по границам зерен, то у углеродистых сталей картина иная. Основные примеси, которые влияют на механические характеристики этих сталей, являются С, Мп, Р, S.

В разных марках углеродистых сталей содержание марганца, фосфора и серы примерно одинаково, а двухфазные зоны F_c -Mn и F_c -P на диаграммах состояния [1] расположены выше температуры солидуса сплава F_c -C и существенное влияние на скорость высокотемпературной ползучести эти элементы оказать не могут.

Серя не растворима в железе и любое ее количество образует с железом сульфид железа, который входит в состав эвтектики, образующейся при 988°C . Легкоплавкая эвтектика расположена по границам зерен и при температуре выше 988°C оплавляется и создает предпосылки для ускорения процесса ползучести по границам зерен. Необходимо отметить, что обособленные округлые включения сульфида железа в процессе деформации при температуре $\sim 1200^\circ\text{C}$ тоже поглощаются границами зерен, тем самым увеличивая толщину границ, и следовательно, вклад зернограницной ползучести в общий процесс ползучести. При выборе выражения состояния для интервала температур $1000^\circ\text{C} + 1500^\circ\text{C}$ необходимо учитывать вклад зернограницной ползучести в процесс деформации для всех марок углеродистых сталей.

Углерод является одним из двух основных компонентов углеродистых сталей, а его содержание и форма содержания определяют механические свойства данной марки стали.

Учет влияния междендритной и межкристаллитной ликвации на увеличение концентрации углерода (почти трехкратное) в межзеренных границах показывает, что интервалы резкого снижения допустимой деформации приблизительно совпадают с температурными интервалами существования двухфазной зоны в межзеренных областях. Следовательно, количество содержания углерода в стали является структурным параметром [2], который должен войти в выражение общего уравнения состояния для разных марок углеродистых сталей, что позволит однотипные задачи ползучести для разных марок углеродистых сталей свести к решению единого разрешающего уравнения.

Основываясь на приведенных рассуждениях в рамках феноменологической теории ползучести, можно предложить уравнение состояния при высоких температурах для углеродистых сталей следующего вида [2]:

$$\dot{\epsilon} = f(\sigma, T, C) \cdot \varphi(t) \quad (1)$$

Можно удовлетворить приведенным физическим требованиям, выбирая выражение для $f(\sigma, T, C)$ в следующем виде:

$$f(\sigma, T, C) = A[\sigma + (1 - \theta)^m \sigma^n] \quad (2)$$

где
$$\theta = \frac{T}{T_1(kc)} \quad (3)$$

T_1 – температура ликвидуса при заданной концентрации углерода в стали, T – температурная функция, c – средняя концентрация углерода в стали, A , m , n – постоянные, которые определяются на основе экспериментальных результатов, $k = c/c_3$ – коэффициент распределения углерода в межзеренных границах, c_3 – реальная концентрация углерода в межзеренных границах.

Для уточнения полученных результатов и определения постоянных аппроксимации нами совместно со специалистами Института Механики МГУ им. Ломоносова в лаборатории ползучести металлов под руководством д-ра физ.-мат.

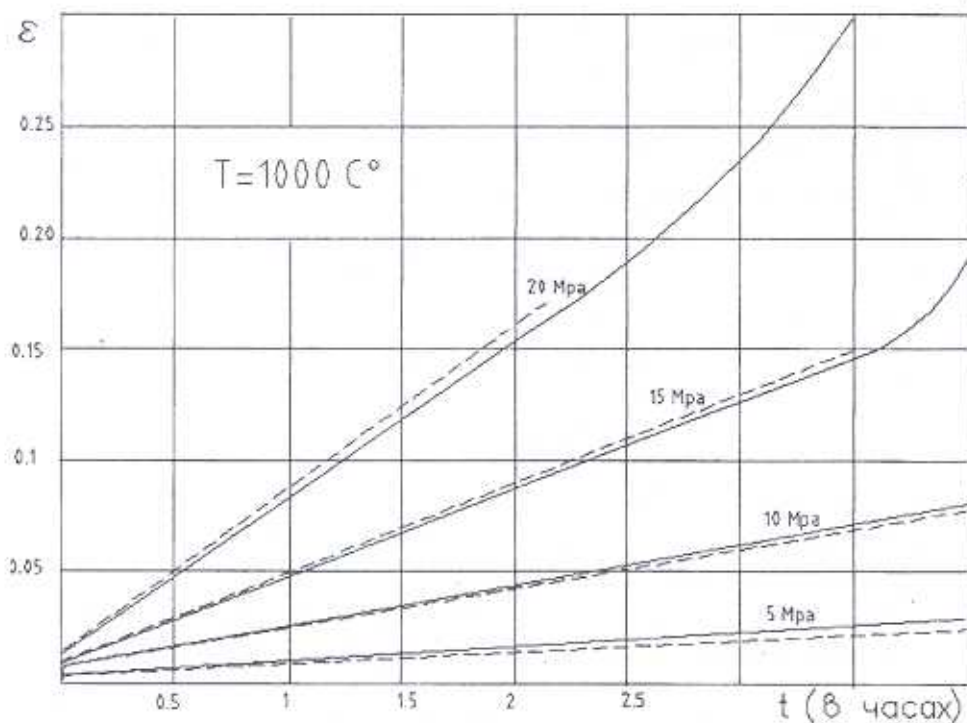
наук, профессора С.А. Шестерикова проведены эксперименты на ползучесть для стали марки Ст.3 и Ст.45 при температурах 1100°C , 1200°C , 1250°C и 1300°C .

Эксперименты проводились по стандартной методике в инертной среде (аргон), исключаяющей окисление поверхности испытуемого образца. Образцы нагревались до температуры испытания, а потом в стационарном температурном режиме нагружались. Фиксировали величину деформации в течении времени испытания. На основе полученных экспериментальных результатов построены некоторые кривые ползучести для Ст.3 (фиг.1, 2 и 3).

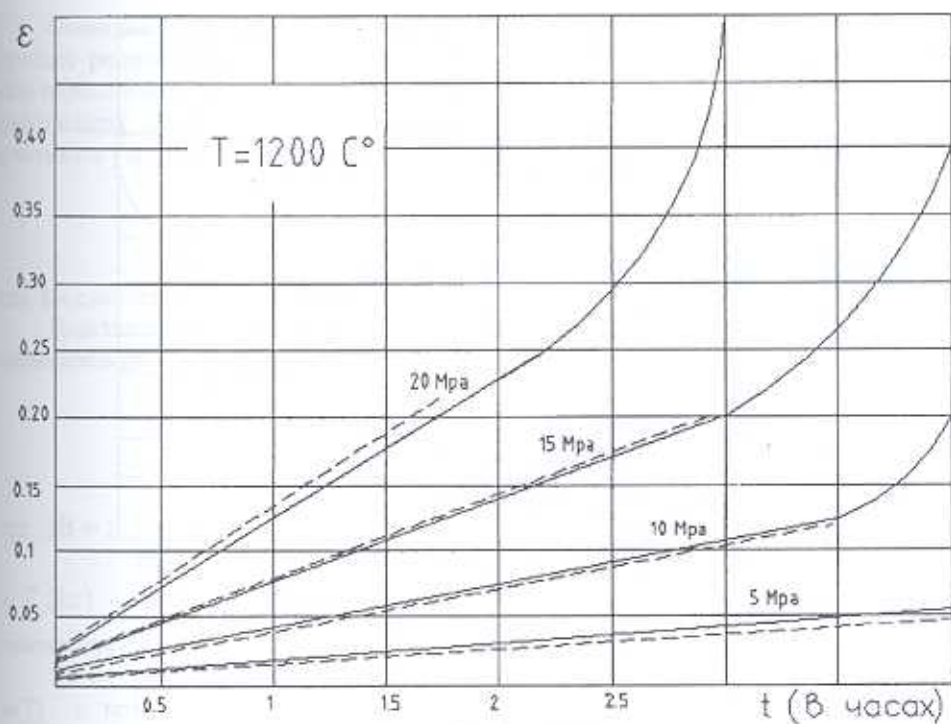
Как видно из приведенных графиков, начальную стадию ползучести невозможно было регистрировать из-за невысокой точности использованной испытательной техники. Поэтому кривые ползучести в начальный момент имеют деформацию намного превышающую чисто упругие деформации.

Как показывают экспериментальные результаты, при температурах до 1300°C на кривых ползучести четко выделяется участок установившейся ползучести, когда скорость деформации при постоянном напряжении является неизменной величиной и определяется величиной приложенного напряжения и температурой. При этом начальный неустановившийся участок сравнительно невелик и поэтому им можно пренебречь в диапазоне температур ($200^{\circ}\text{C}+1200^{\circ}\text{C}$).

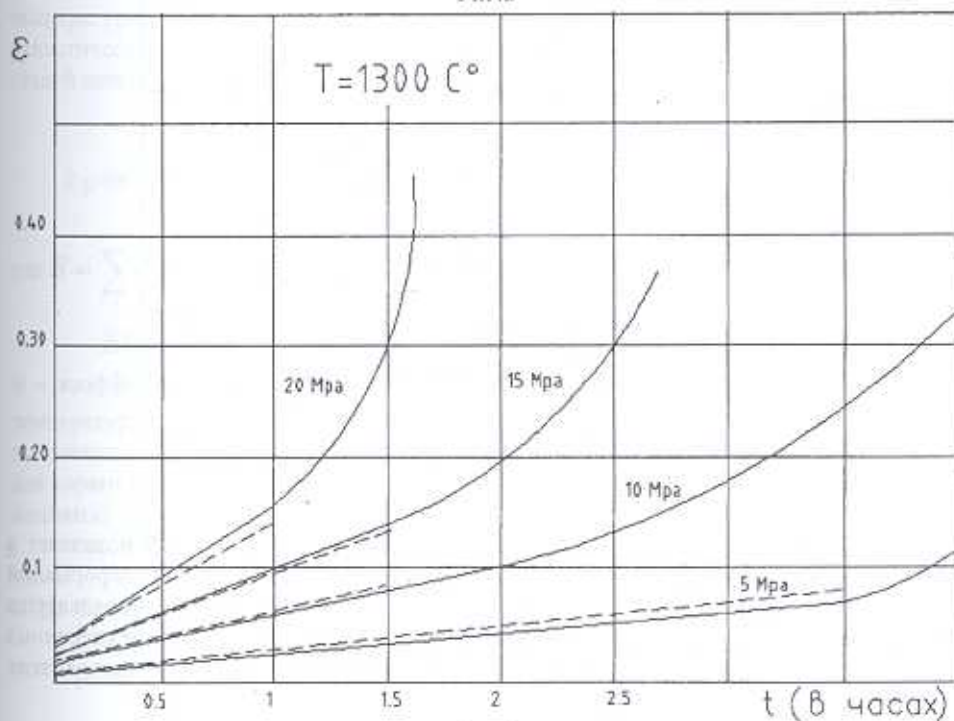
При более высоких температурах установившийся участок ползучести на экспериментальных кривых значительно сокращается, и долговечность испытуемых образцов составляет не более 1-2 часа. Практически вблизи температуры плавления долговечность углеродистых сталей стремится к нулю.



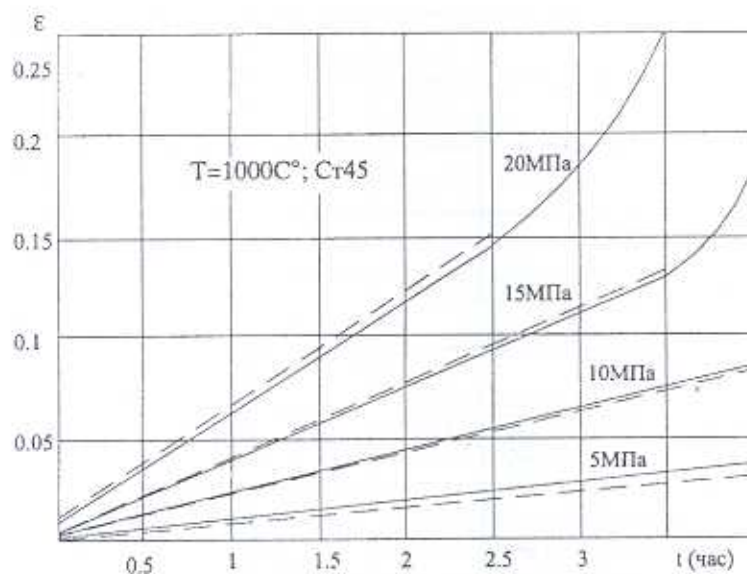
Фиг.1



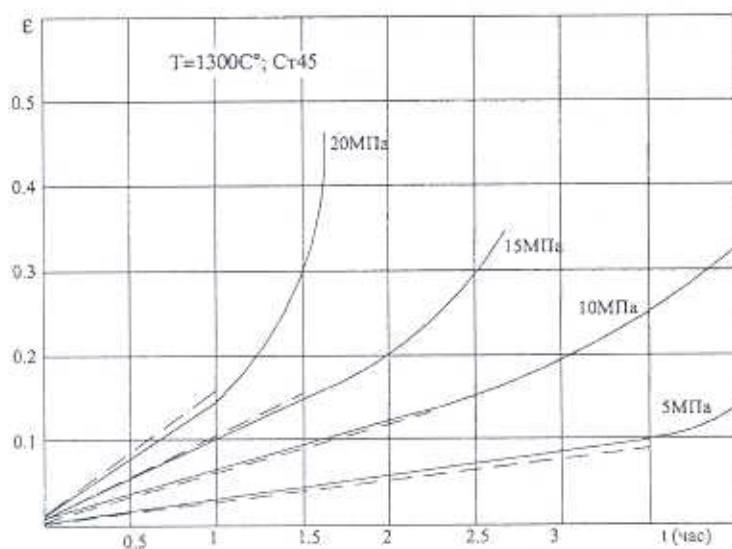
Фиг.2



Фиг.3



Фиг. 4



Фиг. 5

Сравнение результатов полученных для образцов Ст. 3 и Ст. 45 позволяет в пределах точности проведения экспериментов утверждать зависимость деформации ползучести от концентрации углерода в стали. Приблизительно он определяется температурой ликвидуса и солидуса для концентрации углерода в межзеренных границах. Это более четко проявляется при температуре 1000°C и при низких напряжениях.

Очевидно, что теорией установившейся ползучести мы не можем описать процесс релаксации, что может привести к сравнительно существенным ошибкам при определении напряженно-деформированного состояния элементов конструкции, работающих при высоких температурах. Поэтому, согласно [3], необходимо учитывать упругую деформацию, т.е. уравнение (1.1) заменить следующим:

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{E(T)} + \dot{\epsilon}_n \quad (4)$$

где $\dot{\epsilon}$ – скорость общей деформации, а $\dot{\epsilon}_n$ – скорость деформации ползучести.

Подставляя в уравнение (1) значение скорости ползучести (4), получим окончательное выражение реологической зависимости для одномерных задач

$$\dot{\epsilon} = \frac{\sigma}{E(T)} + [\sigma + (1-\theta)^m \cdot \sigma^n] \frac{\Delta\theta}{1-\theta} \cdot \varphi(T) \quad (5)$$

где $\Delta\theta = 1 - \frac{T_s(kc)}{T_1(kc)}$,

а $T_s(kc)$ – температура солидуса стали с концентрацией углерода kc ; и $T_1(kc)$ – температура ликвидуса стали с концентрацией углерода kc .

По имеющимся экспериментальным результатам, выбирая выражение функции $\varphi(T)$ и проведя некоторые математические упрощения, окончательно получим зависимости, описывающие деформацию рассматриваемых сталей при высоких температурах. Основываясь на допущениях, принятых Работновым Ю.Н. [7], реологические зависимости при сложном напряженном состоянии для углеродистых сталей можно представить в следующем виде:

$$\dot{\epsilon}_{ij} = (\alpha T) \cdot \delta_{ij} + \frac{(1+\gamma)\dot{\sigma}_{ij} - \gamma\dot{S}}{E(T)} + A(T) \cdot [\sigma_0 + B(T) \cdot \sigma_0^m] \cdot \frac{(1+\gamma)\sigma_{ij} - \gamma S \delta_{ij}}{\sigma_0} \quad (6)$$

где $S = \sum_j \sigma_{ij} \delta_{ij}$; $\sigma_0^2 = \frac{3}{2} (\sigma_{ij} - S \delta_{ij}) \cdot (\sigma_{ij} - S \delta_{ij})$;

$$E(t) = E_0 e^{-\lambda t}; \quad A(t) = A_0 e^{-\delta t}; \quad B(t) = \beta_0 e^{-\beta_0 t}$$

α – коэффициент линейного расширения; ν – коэффициент Пуассона. При высоких температурах, как уже говорилось, можно принимать $\nu = 1/2$. Используя полученные экспериментальные результаты, нами определены численные значения для параметров аппроксимации (на графиках результаты представлены пунктирными линиями) для Ст. 3:

$$\delta = 0,0038 \text{ 1/гр}; \quad A_0 = 2,412 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}; \quad m = 2,65; \quad \beta_0 = 0,364 \text{ МПа}^{1-m}; \\ \beta = 0,0031 \text{ 1/гр}; \quad E_0 = 1,996 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \lambda = 0,00245 \text{ 1/гр}.$$

И для Ст. 45

$$\delta = 0,00385 \text{ 1/гр}; \quad A_0 = 3,618 \cdot 10^{-5} \text{ МПа}^{-1}; \quad m = 2,65; \quad \beta_0 = 0,121 \text{ МПа}^{1-m}; \\ \beta = 0,00326 \text{ 1/гр}; \quad E_0 = 1,996 \cdot 10^5 \text{ МПа}; \quad \lambda = 0,00245 \text{ 1/гр}.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.П. *Металловедение*. М.: *Металлургия*, 1977. 646 с.
2. Мурадян Л.М., Варданян В.А. О ползучести углеродистой стали при высоких температурах // *Изв. АН Арм ССР. Сер. техн. н.* 1991. Т. XLIV. N 4. С. 1-5.
3. Odqvist F.K.G. *Mathematical theory of creep and creep rupture*. Oxford: Clarendon Press, 1974. 376 с.
4. Пуарье Ж. П. *Ползучесть кристаллов*. М.: *Мир*, 1988. 287с.
5. Пальмерс А. Механические свойства сталей при высоких температурах как средство контроля за процессом непрерывного литья// *Мет. Обоз.* 1978. 53. С. 23-32.
6. Пюрингер О.П. Формирование непрерывнолитой заготовки на МНЛЗ// *Черные металлы*. 1976. N 6-7. С. 3-8.
7. Работнов Ю. Н. *Ползучесть элементов конструкций*. М.: Изд. «Наука». 1966. 752с.
8. Работнов Ю.Н., Милейко С.Т. *Кратковременная ползучесть*. М.: Изд. «Наука». 1970. 222 с.
9. Rammerstorfer F.G., Fischer D.F. Verfahren zur Berechnung der thermischen und thermo-viscoelastic-blastischen vorgange beim stranggießen von sthal. // *Archiv fur das Eisenhüttenwesen*. 1980. 2. pp. 61-72.

Армянский государственный
Инженерный университет

Поступила в редакцию
21.01.2003