ՀԱՅԱՍՏԱՆԻ ԳԻՏՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԻ ԱԶԳԱՅԻՆ ԱԿԱԴԵՄԻԱՅԻ ՏԵՂԵԿԱԳԻՐ
ИЗВЕСТИЯ НАЦИОНАЛЬНОЙ АКАДЕМИИ НАУК АРМЕНИИ

Մեխանիկա 56, №1, 2003 Механика

УДК 539.32

ПОЛЗУЧЕСТЬ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ

Мурадян М. Л.

Մ. Լ. Մուրադյան

Ածխածնային պողպատների սողքը բարձր ջերմաստիճանային պայմաններում

Աշխատանքում դիտարկված է ածխածնային պողպատների սողքի երևույթը բարձր ջերմաստիճանային պայմաններում և առաջարկված են սողքի ռեոլոգիական հավասարումները, որոնց մեջ որպես պարամետր օգտագործվում է ածխածնի պարունակությունը տվյալ պողպատում: Բերված են կատարված փորձարարական հետազոտությունների արդյունքները և հավասարումներում մասնակցող հաստատունների թվային 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 $1100^{\circ}C$+$1200^{\circ}C$ 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 C, Mn, P, S.

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

Сера не растворима в железе и любое ее количество образует с железом сульфид железа, который входит в состав эвтектики, образующейся при 988°С. Легкоплавкая эвтектика расположена по границам зерен и при температуре выше 988°С оплавляется и создает предпосылки для ускорения процесса ползучести по границам зерен. Необходимо отметить, что обособленные округлые включения сульфида железа в процессе деформации при температуре ~1200°С тоже поглащаются границами зерен, тем самым увеличивая толщину границ, и следовательно, вклад зернограничной ползучести в общий процесс ползучести. При выборе выражения состояния для интервала температур 1000°С+1500°С необходимо учитывать вклад зернограничной 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 приближенно 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]:

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

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

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

где

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

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.

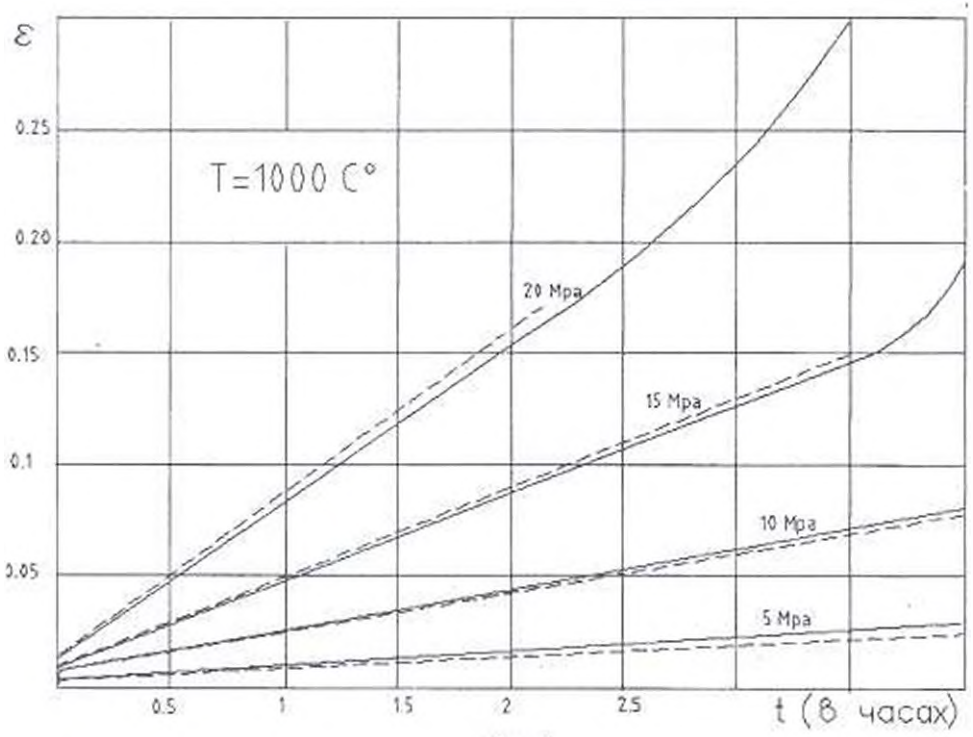
наук, профессора С.А. Шестерикова проведены эксперименты на ползучесть для стали марки Ст.3 и Ст.45 при температурах 1100^{0}С, 1200^{0}С, 1250^{0}С и 1300^{0}С.

Эксперименты проводились по стандартной методике в инертной среде (аргон), исключающей 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).

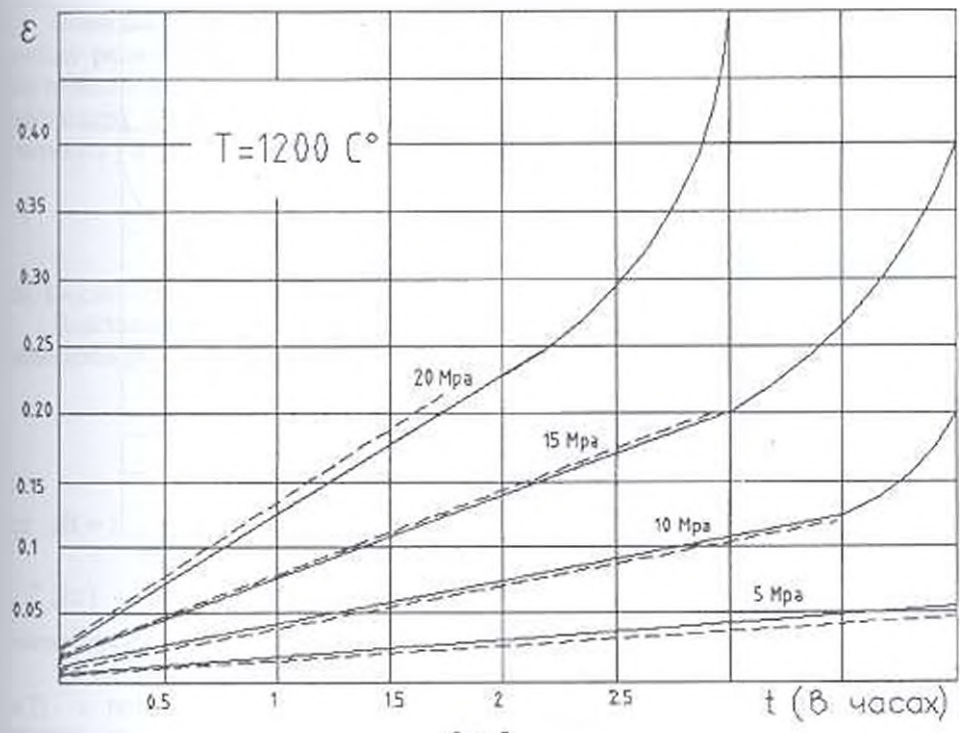
Как видно из приведенных графиков, начальную стадию ползучести невозможно было регистрировать из-за невысокой точности использованной испытательной техники. Поэтому кривые ползучести в начальный момент имеют деформацию намного превышающие чисто упругие деформации.

Как показывают экспериментальные результаты, при температурах до 1300^{0}С 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^{0}С÷1200^{0}С).

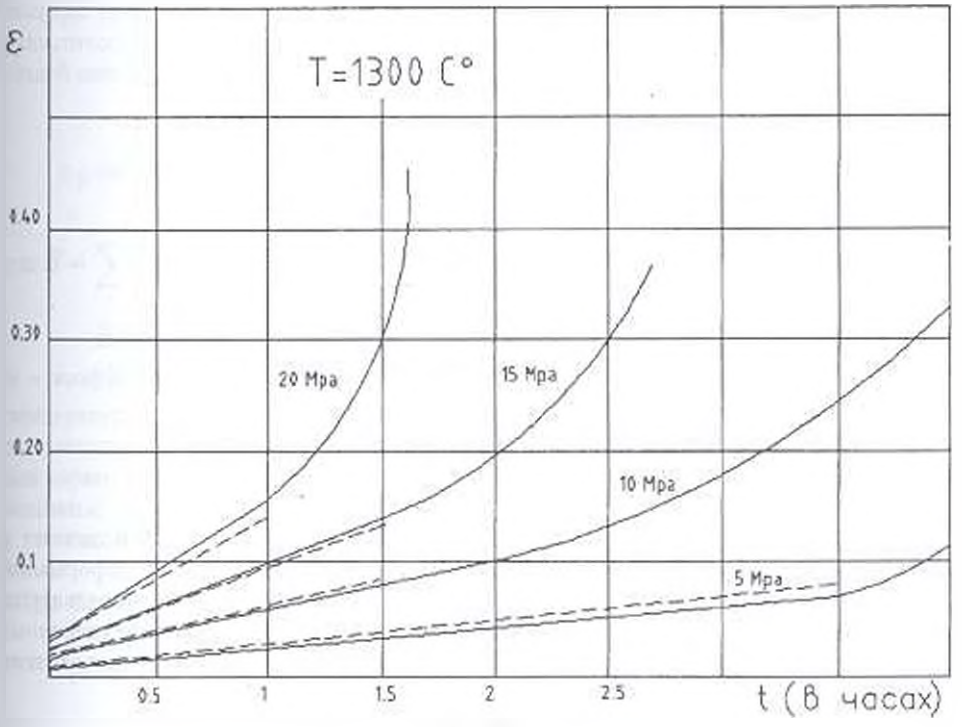
При более высоких температурах установившийся участок ползучести на экспериментальных кривых значительно сокращается, и долговечность испытуемых образцов составляет не более 1-2 часа. Практически вблизи температуры плавления долговечность углеродистых сталей стремится к нулю.



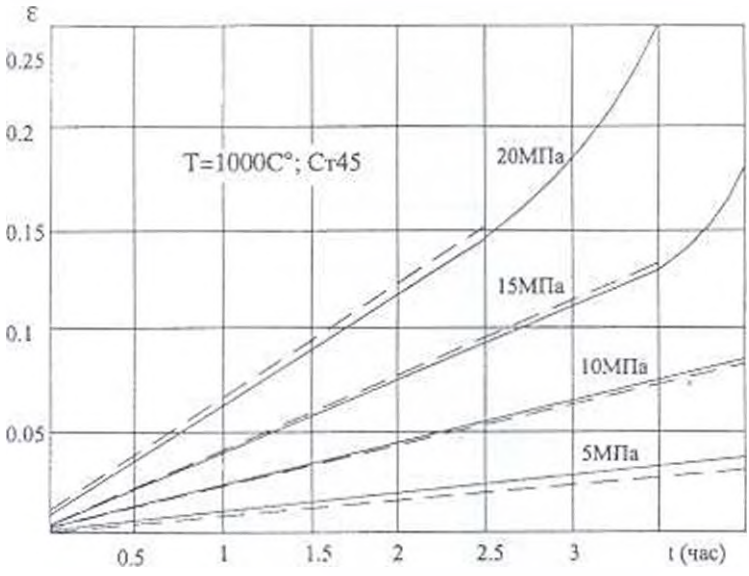
Фиг.1


ε
T=1200 C°
0.40
0.35
0.30
0.25
0.20
0.15
0.1
0.05
20 Mpa
15 Mpa
10 Mpa
5 Mpa
0.5
1
1.5
2
2.5
t (в часах)

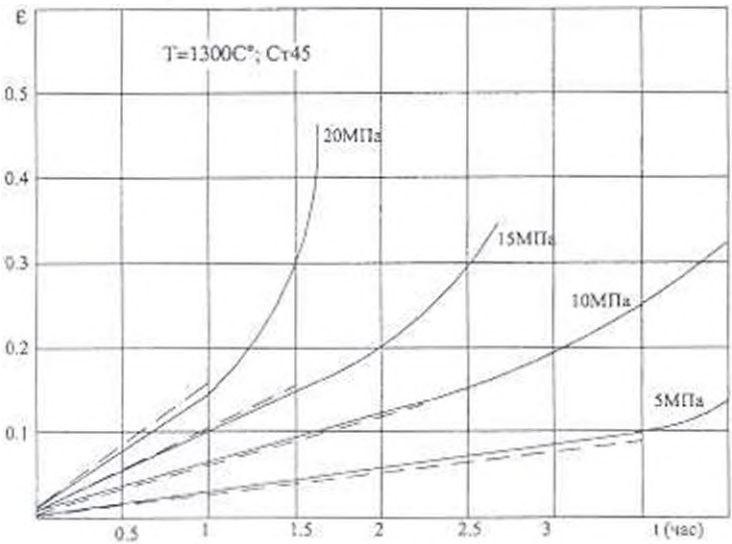
Фиг.2


ε
T=1300 C°
0.40
0.30
0.20
0.1
20 Mpa
15 Mpa
10 Mpa
5 Mpa
0.5
1
1.5
2
2.5
t (в часах)

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. Приближенно он определяется температурой ликвидуса и солидуса для концентрации углерода в межзеренных границах. Это более четко проявляется при температуре 1000°С 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:

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E(T)} + \dot{\varepsilon}_{n} \qquad (4)$$

где $\dot{\varepsilon}$ – скорость общей деформации, а $\dot{\varepsilon}_{n}$ – скорость деформации ползучести.

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

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

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

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 рассматривающих 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:

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

где $S = \sum_{i} \sigma_{ij} \delta_{ij}$; $\sigma_0^2 = \frac{3}{2}\left(\sigma_{ij} - S^{*}\delta_{ij}\right) \cdot \left(\sigma_{ij} - S\delta_{ij}\right)$;

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

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:

δ=0,0038 1/гр; A_0=2,412·10^{-5} МПа$^{-1}$; m=2,65; β_0=0,364 МПа$^{1-m}$;
β=0,0031 1/гр; E_0=1,996·10^{5} МПа; λ=0,00245 1/гр.

И для Ст. 45

δ=0,00385 1/гр; A_0=3,618·10^{-5} МПа$^{-1}$; m=2,65; β_0=0,121 МПа$^{1-m}$;
β=0,00326 1/гр; E_0=1,996·10^{5} МПа; λ=0,00245 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. П. 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 stranggieen von sthal. //Archiv fur das Eisenhuttenvesen. 1980. 2. pp. 61-72.

Армянский государственный
Инженерный университет

Поступила в редакцию
21.01.2003