

УДК 539.374+376

О НЕКОТОРЫХ ОСОБЕННОСТЯХ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ

О. В. Соснин, Б. В. Горев, И. В. Любашевская

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН, 630090 Новосибирск

Приведены результаты экспериментов по высокотемпературному деформированию конструкционного материала на основе железа в областях температур, включающих точки перехода $Fe_\alpha \rightarrow Fe_\beta \rightarrow Fe_\gamma$. Показана немонотонность изменения деформационно-прочностных свойств материала в интервале $700^\circ\text{C} < T < 1000^\circ\text{C}$ и влияние внутренних структурно-фазовых изменений на эффект внешнего термосилового воздействия. Предложены аппроксимирующие зависимости, позволяющие описывать процессы деформирования в указанных температурных диапазонах при одноосном нагружении.

Интервалы температур эксплуатационных режимов работы элементов конструкций обычно назначаются так, чтобы в этих диапазонах материал был по возможности структурно-стабильным. Преднамеренное или непредвиденное повышение температуры может привести к изменениям внутреннего состояния материала и необходимости рассмотрения высокотемпературного процесса деформирования при внешних термосиловых воздействиях с учетом внутренних структурно-фазовых изменений. Особенности деформационного поведения материалов в температурных диапазонах структурной неустойчивости представляют интерес с двух точек зрения: при решении технологических задач по обработке материалов давлением в медленном температурно-силовом режиме деформирования, включая и режимы сверхпластичности, и при оценке работоспособности элементов конструкций широкого назначения в аварийных ситуациях.

В работе [1] на примере титанового сплава ВТ-20 рассмотрены особенности высокотемпературного деформирования конструкционных материалов, для которых внутренние превращения если и имели место, то их влияние было незначительно, и в макроскопическом отношении наблюдалось монотонное изменение деформационно-прочностных характеристик. Результаты экспериментов при стационарных и нестационарных термосиловых условиях в диапазоне температур $700^\circ\text{C} < T < 950^\circ\text{C}$ были достаточно близки, что позволило определять характеристики подобных материалов и решать прикладные задачи для указанного температурного интервала в «несвязанной» постановке.

В данной работе на примере конструкционного сплава ВЛ-1Д на основе железа рассмотрены особенности высокотемпературного деформирования материалов, для которых внутренние структурные изменения существенным образом влияют на физико-механические свойства. В макроскопическом отношении это проявляется в резкой немонотонности изменения характеристик материала в диапазоне температур структурных превращений. Для таких материалов в указанных выше диапазонах температур результаты экспериментов по деформированию в стационарных и нестационарных условиях несопоставимы, рассматривать процессы нагружения и решать прикладные задачи как «несвязанные»

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (коды проектов 96-01-01671, 99-01-00526).

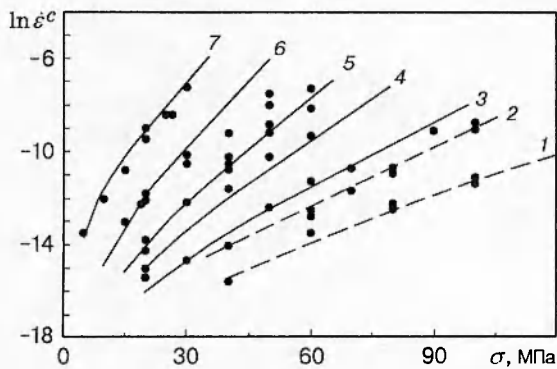


Рис. 1

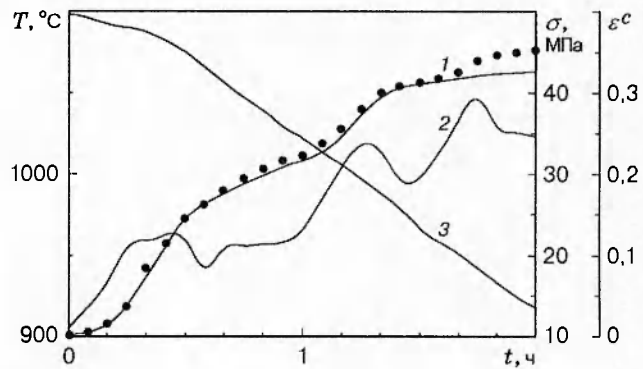


Рис. 2

уже нельзя. В методическом отношении предлагаемая работа является продолжением ранее опубликованной [1].

На рис. 1 представлены результаты стационарных экспериментов материала ВЛ-1Д на ползучесть при фиксированных значениях напряжения σ и температуры T в виде зависимости скорости деформаций ползучести от напряжения. Диаграммы 1–7 соответствуют температурам экспериментов 700, 900, 910, 930, 950, 1000, 1100 °С. Эксперименты проводились на растяжение цилиндрических образцов с длиной рабочей части $l = 50$ мм и диаметром $d = 10$ мм, изготовленных из материала в состоянии поставки без какой-либо предварительной термомеханической обработки. Для поддержания постоянной величины σ в ходе эксперимента нагрузка корректировалась. Часть экспериментов проводилась при постоянной температуре со ступенчатым изменением напряжения с интервалами перегрузок 20–30 мин. На каждой ступени нагружения определялась скорость деформации. Некоторые эксперименты проводились без перегрузок до разрушения с целью определения величины деформаций к моменту перехода процесса ползучести в третью стадию и величины деформации в момент разрушения. Скорость деформаций ползучести на линейных участках диаграмм для обоих типов экспериментов была одинаковой.

Диаграммы, представленные на рис. 1, в интервалах температур ниже 770 °С и выше 900 °С качественно аналогичны диаграммам титанового сплава ВТ-20 [1], что позволяет использовать для этих температурных интервалов такую же аппроксимацию в описании процессов деформирования $\dot{\epsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T)$, как и в [1]:

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon}_i^c &= K \exp(A(\bar{T}) + B(\bar{T})\bar{\sigma}_i + C(\bar{T})/\bar{\sigma}_i), & A(\bar{T}) &= a_0 + a_1\bar{T} + a_2\bar{T}^2, \\ B(\bar{T}) &= b_0 + b_1\bar{T} + b_2\bar{T}^2, & C(\bar{T}) &= c_0 + c_1\bar{T} + c_2\bar{T}^2, \end{aligned} \quad (1)$$

где a_j, b_j, c_j — константы; $\bar{\sigma}_i = \sigma_i \cdot 10^{-1}$ МПа, $\bar{T} = T \cdot 10^{-2}$ °С, $K = 1 \text{ с}^{-1}$ (в дальнейшем при написании зависимости (1) черточки над σ_i и T опущены). По экспериментальным данным на растяжение при фиксированных σ и T определяются все коэффициенты в (1). Так, при $T \geq 900$ °С они имеют значения

$$\begin{aligned} a_0 &= -39,595, & a_1 &= 3,0347, & a_2 &= -0,050\ 806, \\ b_0 &= -48,104, & b_1 &= 9,3778, & b_2 &= -0,439\ 18, \\ c_0 &= 1,552, & c_1 &= -1,7971, & c_2 &= 0,141\ 23. \end{aligned} \quad (2)$$

Сплошные линии на рис. 1 соответствуют зависимостям $\dot{\epsilon}^c = \varphi(\sigma, T)$, вычисленным по (1) со значениями коэффициентов (2), точки — эксперимент. На рис. 2 представлены экспериментальные (точки) и расчетные по (1) (кривая 1) величины $\epsilon^c(t)$ при изменяющихся значениях напряжения $\sigma(t)$ (кривая 2) и температуры $T(t)$ (кривая 3). Таким образом,

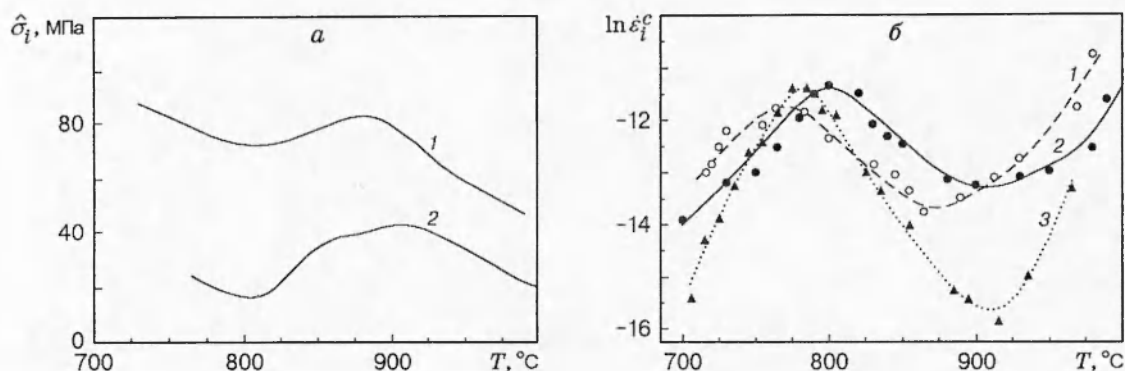


Рис. 3

в этой температурной области описание процесса деформирования по зависимости (1) с характеристиками (2), определенными из экспериментов при фиксированных значениях σ и T , дает удовлетворительное совпадение и для нестационарных процессов. Аналогичные результаты имеют место и в области температур ниже 770°C .

Иная картина и в качественном и в количественном отношении имеет место в интервале температур $770^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$. Эта температурная область отмечена на рис. 1 штриховыми линиями. Как известно, температура $T = 768^\circ\text{C}$ является точкой фазового перехода $\text{Fe}_\alpha \rightarrow \text{Fe}_\beta$, а $T = 910^\circ\text{C}$ — точкой фазового перехода $\text{Fe}_\beta \rightarrow \text{Fe}_\gamma$. Если в температурных областях ниже 768°C и выше 900°C прочностные характеристики рассматриваемого здесь конструкционного сплава на основе железа изменяются с возрастанием температуры монотонно в сторону уменьшения прочности и увеличения пластичности (что согласуется с принципами термодинамики), то в указанной температурной области изменения прочностных свойств имеют противоположный характер.

На рис. 3,а представлены результаты двух экспериментов на кручение сплошного круглого стержня рабочей длины $l = 40$ мм и диаметром $d = 20$ мм при постоянной скорости деформации в характеристической точке $\dot{\epsilon}_i^c = \text{const}$ [2]. Кривая 1 соответствует скорости деформации $\dot{\epsilon}_i^c = 3,2 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, кривая 2 — $\dot{\epsilon}_i^c = 2,9 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1}$. В ходе эксперимента изменение температуры задавалось по линейному закону со скоростью $T \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ }^\circ\text{C}/\text{с}$, нагрузка с последующим пересчетом в напряжение $\hat{\sigma}_i$, необходимая для поддержания заданной постоянной скорости деформации, фиксировалась записывающим устройством. На диаграммах, представленных на рис. 3,а, видно, что в температурном диапазоне $770^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$ материал упрочняется. Если построить график величин деформации ϵ^* в момент разрушения образца при растяжении с фиксированными значениями σ и T , то диаграмма ϵ^*-T также будет иметь немонотонный характер, что свидетельствует об уменьшении пластичности материала между отмеченными выше точками переходов.

На рис. 3,б показаны зависимости скорости деформаций ползучести от температуры при фиксированных значениях напряжения, полученные в трех экспериментах на сплошных круглых образцах. Результаты экспериментов на растяжение и сжатие при $\sigma_i = 30$ МПа представлены соответственно кривыми 1 и 3, результаты эксперимента на чистое кручение с тем же значением интенсивности напряжения в характеристической точке — кривой 2. Аналогичные зависимости имеют место и при других уровнях напряжений. Все эксперименты проводились при непрерывно возрастающей температуре с той же скоростью изменения, что и в предыдущей серии (рис. 3,а). На интервале времени $\Delta t \approx 5$ мин определялась средняя величина температуры и средняя величина скорости деформаций $\dot{\epsilon}^c = \Delta \epsilon^c / \Delta t$ (температурная составляющая $\Delta \epsilon^T$ за соответствующий временной

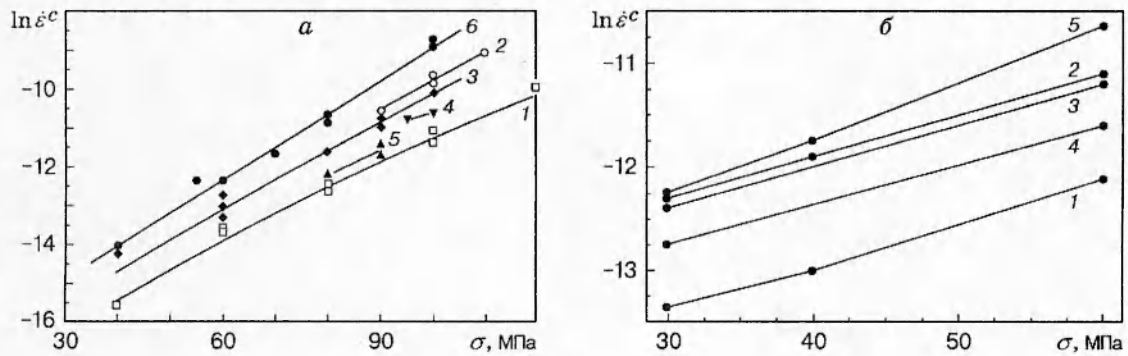


Рис. 4

интервал Δt была на порядок меньше суммарной деформации и в расчет не принималась). В ходе экспериментов из условия несжимаемости материала проводилась корректировка осевой нагрузки для растяжения и сжатия.

Анализ диаграмм на рис. 3, б показывает, что в интервале температур $770^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$ материал упрочняется: при фиксированных величинах напряжения скорость деформации с увеличением температуры уменьшается и только после $T \sim 900^\circ\text{C}$ вновь начинает возрастать. Кроме того, как показано ранее [3], для этого сплава в диапазоне температур ниже 770°C и выше 900°C диаграммы деформирования на растяжение, сжатие, кручение при фиксированных значениях σ_i и T достаточно близки, что позволило искать зависимость скоростей деформирования от σ и T в виде связи между вторыми инвариантами девиаторов соответствующих тензоров

$$\dot{\epsilon}_i^c = \varphi(\sigma_i, T), \tag{3}$$

где $\dot{\epsilon}_i^c = ((2/3)\dot{\epsilon}_{kl}^0\dot{\epsilon}_{kl}^0)^{1/2}$; $\sigma_i = ((3/2)\sigma_{kl}^0\sigma_{kl}^0)^{1/2}$; $\sigma_{kl}^0 = \sigma_{kl} - (1/3)\delta_{kl}\sigma_{nn}$; $\dot{\epsilon}_{kl}^0 = \dot{\epsilon}_{kl}^c$. В интервале от 770 до 900°C наблюдается расслоение этих диаграмм, скорости деформаций ползучести материала зависят от вида напряженного состояния, в зависимость (3) должны быть включены и нечетные инварианты тензора напряжений. С учетом этого в данной работе предпринята попытка описать в указанном интервале только процессы деформирования при одноосном растяжении.

На рис. 4, а представлены результаты экспериментов на растяжение с определением скорости деформирования при фиксированных значениях σ и температуре $770^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$. Как и следовало ожидать, диаграммы $\ln \dot{\epsilon}^c - \sigma$ при фиксированных температурах расположены не в монотонной последовательности. (Диаграммы 1–6 получены в экспериментах при температуре 700, 750, 800, 825, 850, 900 °C.) На рис. 4, б представлены результаты экспериментов при температуре 700, 750, 825, 850, 950 °C (кривые 1–5) в нестационарных условиях на растяжение при различных уровнях напряжения. Результаты одного из таких экспериментов представлены на рис. 3, б (кривая 3). Сравнивая рис. 4, а и 4, б, легко заметить, что уровень скоростей деформации в экспериментах при нестационарных условиях выше, чем при стационарных, и, следовательно, характеристики, определенные в экспериментах при стационарных условиях, неприменимы к описанию процессов деформирования при произвольно меняющихся $\sigma(t)$ и $T(t)$.

На рис. 4 видно, что зависимость $\ln \dot{\epsilon}^c - \sigma$ практически линейна при фиксированных температурах. Для описания зависимостей $\dot{\epsilon}^c(\sigma, T)$ при изменяющихся напряжении и температуре воспользуемся уравнением

$$\dot{\epsilon}^c = K \exp [f(\sigma)\psi(T)], \tag{4}$$

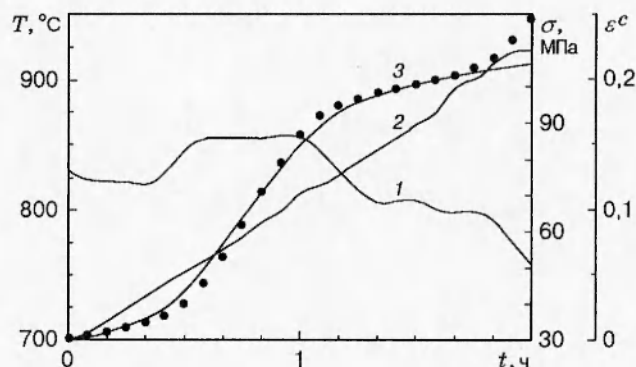


Рис. 5

где $f(\sigma) = A + \sigma$; $\psi(T) = a + bT + cT^2 + dT^3$. Масштабы коэффициента K и величин σ и T те же, что и в зависимости (1). Из экспериментов на растяжение при нестационарных условиях (рис. 3, б и 4, б) определены следующие значения коэффициентов:

$$A = -32,6196, \quad a = 29,643, \quad b = -10,596, \quad c = 1,2739, \quad d = -0,05057. \quad (5)$$

Зависимость (4) была использована для описания процесса деформирования образца при растяжении. На рис. 5 показаны зависимости напряжений σ (кривая 1), температуры T (кривая 2) и деформации ε^c от времени. Точки соответствуют значениям деформаций, полученным в эксперименте, кривая 3 — расчету по зависимости (4) с коэффициентами (5). Получено удовлетворительное совпадение экспериментальных и расчетных данных во всем диапазоне $700^\circ\text{C} < T < 900^\circ\text{C}$.

Представленные в данной работе и статье [1] экспериментальные результаты позволяют сделать некоторое обобщение: если у материала при высокотемпературном деформировании прочностные характеристики с изменением температуры изменяются монотонно, то ожидать проявления эффектов типа сверхпластичности, обратного ему явления резкого охрупчивания и упрочнения или каких-либо других особенностей в поведении материала не следует. При наличии отклонения от монотонности в поведении характеристик материала в некотором температурном диапазоне могут проявиться любые дополнительные эффекты. В последнем случае сказывается влияние внутренних структурно-фазовых изменений, что требует их одновременного учета и решения прикладных задач в «связанной» постановке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Соснин О. В., Горев Б. В., Любашевская И. В. Высокотемпературная ползучесть и сверхпластичность материалов // ПМТФ. 1997. Т. 38, № 2. С. 140–145.
2. Горев Б. В. К построению кривых деформирования при кручении // Завод. лаб. 1978. Т. 44, № 12. С. 1511–1514.
3. Соснин О. В., Горев Б. В., Ратничкин А. А. Закономерности деформирования металлов в режимах, близких к сверхпластичности // Проблемы нелинейной механики деформируемого твердого тела: Сб. науч. тр. Свердловск: Изд-во АН СССР. Урал. отд-ние, 1990. С. 41–52.

Поступила в редакцию 31/III 1998 г.