

Обобщенные относительные характеристики предельных состояний материалов при неизотермическом деформировании

Б. С. Карпинос

Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

Приведена методика представления характеристик материалов в виде термодинамических инвариантов. Это позволило для подобных материалов предложить аргументы уравнений предельных механических состояний при неизотермическом деформировании. Методика построена на соотношениях элементарной теории разрушения и на концептуальных положениях теорий подобия и анализа размерностей.

Ключевые слова: напряжение, деформация, температура, подобие, моделирование, инвариант, уравнение предельного состояния.

Обозначения

| | | |
|---------------------------------|---|---|
| a_T | – | коэффициент температуропроводности |
| E | – | модуль упругости |
| K_v | – | модуль объемной упругости |
| μ | – | отношение Пуассона |
| T | – | температура |
| α | – | коэффициент линейного теплового расширения |
| β | – | коэффициент объемного теплового расширения |
| λ | – | коэффициент теплопроводности |
| c_p | – | удельная теплоемкость |
| $\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}$ | – | компоненты тензоров напряжений и деформаций |
| ρ | – | плотность |
| k | – | постоянная Больцмана |
| R | – | универсальная газовая постоянная |
| t | – | время |
| w | – | удельная работа деформирования |
| A | – | атомная масса химического элемента |

Введение. В настоящее время при определении механических характеристик предельных состояний материалов основное внимание уделяется экспериментальным исследованиям. Характеристики материалов отражают общие и частные закономерности деформирования и разрушения образцов и зависят от таких режимно-конструктивных факторов, как условия деформирования, форма и размеры образцов, температура, структура и химический состав, физико-химическая активность рабочей среды, состояние поверхности, наличие концентраторов напряжений и деформаций и т.д. Любой режимно-конструктивный фактор и любое физическое воздействие оказывают то или иное (зачастую неоднозначное) влияние на прочность, деформативность, выносливость, долговечность, трещиностойкость и т.д.

Результаты конкретного опыта дают информацию об индивидуальных особенностях реакции материала на его нагружение. Использование их при других условиях нагружения проблематично. Непосредственно из опыта трудно сделать заключение, какие именно факторы являются определяющими и какое влияние они могут оказывать на протекание процесса при иных условиях нагружения. Поэтому выводы, полученные на основании результатов экспериментального исследования деформирования и разрушения образцов из одного материала, требуют детальной аргументации при распространении их на другие материалы и условия нагружения.

Повысить научную и практическую значимость единичного опыта, определить его место в массивах экспериментальных данных, выполнить физико-феноменологическое обобщение позволяют методы теории подобия и размерностей. Благодаря использованию фундаментальных соотношений механики, положений теории подобия и размерностей можно еще на начальном этапе исследования свойств материалов решить ряд вопросов, связанных с предполагаемым механизмом деформирования, выбором соответствующих моделей деформирования, ориентировочной оценкой некоторых предельных значений характеристик и т.д.

Постановка задачи. Уровень и степень обобщения результатов определяются задачами и целями исследования, их количеством и качеством, а также наличием моделей изучаемых процессов.

По мере возникновения и решения задач о предельных состояниях материалов развивались методы обработки результатов механических испытаний. Галилей, Гук, Бернулли, Мариотт, Кулон и др. при анализе экспериментальных данных использовали размерные экстенсивные величины, зависящие от объема тела: силу, изменение размеров образца или детали. Навье, Кориолис, Треска, Понселе, Вертгейм и др. использовали как размерные интенсивные величины, не зависящие от объема (напряжение, температура), так и безразмерные (разные относительные величины, деформация) [1]. Этому способствовало установленное Фурье правило размерностей: правые и левые части физических уравнений должны иметь одинаковую размерность.

В настоящее время при обработке и анализе опытных данных кроме экстенсивных и интенсивных величин используются также размерные и безразмерные инварианты состояний: деформация; приведенные (относительные) напряжения; относительная температура; приведенное время и т.д. [1, 2]. При физико-механических воздействиях состояние материала характеризуют различные симплексы и комплексы, учитывающие физические характеристики: теплоемкость; теплопроводность; тепловое расширение; электрическое сопротивление; электропроводность; диффузия и т.д. [3, 4].

В рамках данного исследования поставлена и решена задача разработки методики представления в относительном виде всего комплекса параметров нагружения материала, его текущих и предельных механических характеристик. При этом использовали соотношения элементарной теории разрушения [5, 6], концептуальные положения теорий подобия и размерностей [2, 5, 7].

Методика и результаты исследования. Как известно, состояние термодинамической системы однозначно определяют ее размерные параметры: абсолютная температура T ; объем v и давление p . При неизотермическом

деформировании твердого тела его состояние характеризуют компоненты тензора напряжений σ_{ij} , деформаций ε_{ij} , абсолютная температура T , а также функции состояния: внутренняя энергия; энтальпия; энтропия и др. Работа деформирования и теплота являются функциями этого процесса. Область изменения параметров ограничена их предельными значениями $\sigma_{ij(\text{lim})}$, $\varepsilon_{ij(\text{lim})}$, $T_{(\text{lim})}$. Внутри области связь между параметрами определяется уравнением состояния

$$f(\sigma_{ij}, \varepsilon_{ij}, T) = 0, \quad (1)$$

а сама область описывается уравнением предельного состояния

$$f(\sigma_{ij(\text{lim})}, \varepsilon_{ij(\text{lim})}, T_{(\text{lim})}) = 0. \quad (2)$$

Пространство изменения возможных термодинамических параметров, функций состояния материала и функций процесса неизотермического деформирования ограничено их предельными значениями. По достижении параметрами либо функциями предельного значения наблюдается наступление критического состояния материала (начало пластического деформирования, появление трещины, полное разрушение и т.д.). В результате происходит качественное изменение состояния термодинамической системы.

Условия термодинамического подобия процессов неизотермического деформирования и предельных состояний достигаются при наличии приведенных уравнений текущих и предельных состояний, одинаковых значениях безразмерных граничных и начальных условий, одинаковых значениях обобщенных параметров текущих и предельных состояний.

Приведенные уравнения текущих и предельных состояний. Преобразование размерных уравнений механики в приведенные осуществляется путем замены размерных величин инвариантами. Например, размерное уравнение состояния (1) можно преобразовать в приведенное:

$$f\left(\frac{\sigma_{ij}}{E}, \varepsilon_{ij}, \alpha T\right) = 0. \quad (3)$$

Уравнение предельного состояния, например уравнение усталости при неизотермических условиях

$$f(\sigma_{ij(\text{lim})}, N(T)) = 0, \quad (4)$$

можно преобразовать в одно из приведенных уравнений:

$$f\left(\frac{\sigma_{ij(\text{lim})}}{E}, N\left(\frac{T}{T_{\text{пл}}}\right)\right) = 0 \quad \text{или} \quad f\left(\frac{\sigma_{ij(\text{lim})}}{E}, N(\alpha T)\right) = 0, \quad (5)$$

где N – число циклов нагружений до появления в образце трещины определенной длины или до его полного разрушения.

Формальное преобразование уравнений имеет глубокий физический смысл. Появляется возможность исследуемое явление изучать не только в принятой традиционной системе основных единиц измерения физических величин, но и в новой локальной системе, справедливой для класса или группы материалов. Это позволяет на основании анализа соответствующих состояний материала установить принадлежность его к классу или группе подобных материалов, удовлетворяющих одному приведенному уравнению, и затем осуществлять прогнозирование предельных характеристик.

В строгой постановке термодинамическое подобие наступает по достижении механического и теплового подобия и отмечается в редких случаях. Это обусловлено тем, что в материале наблюдаются разнородные явления, т.е. имеющие различную физическую природу. Механическое деформирование принципиально отличается от теплового. Материалы могут быть подобными относительно механического воздействия и не подобными относительно теплового.

Как правило, конструкционные материалы представляют собой сложные многокомпонентные системы, зачастую неустойчивые и неоднородные. Абсолютно одинаковых материалов, для которых отмечалось бы полное соответствие текущих и предельных состояний, практически не бывает. Поэтому применительно к конструкционным материалам есть основание говорить о приближенном подобии. Степень искажения, или относительная мера неподобия связана с различием механизмов деформирования исследуемых материалов и в каждом конкретном случае может быть определена количественно. На меру неподобия оказывают влияние погрешность экспериментальных исследований, статистический разброс свойств материалов.

Установим инвариант неизотермического деформирования, т.е. соотношение между механическими и теплофизическими характеристиками материалов. При упругом неизотермическом деформировании уравнение состояния материала (1) имеет вид [8]

$$\varepsilon_{11} = \frac{\sigma_{11}}{K_v} + 3\alpha\Delta T,$$

где ε_{11} – объемная деформация; σ_{11} – сумма нормальных напряжений.

Определим отношение работы, затрачиваемой на механическое деформирование материала, к теплоте, расходуемой на его нагрев. Пусть для одного кг-атома металла конечным результатом механических и тепловых воздействий будет увеличение его объема, например, в два раза. При деформировании с постоянной температурой затрачиваемая работа с учетом значения объемной механической деформации $\varepsilon_{11} = 1$ равна

$$w = \frac{\sigma_{11}^2 A}{2K_v \rho} = \frac{K_v A}{2\rho}.$$

Если нагрев будет происходить при отсутствии внешних сил, то затрачиваемое тепло с учетом величины объемного теплового деформирования $\beta\Delta T = 1$ составит

$$q = c_A \Delta T = c_A \frac{1}{\beta},$$

где c_A – атомная теплоемкость.

Инвариант (критерий) неизотермического упругого деформирования запишем в виде

$$\mathbf{Td}_1 = \frac{w}{q} = \frac{\beta K_v A}{2c_A \rho}, \quad \text{или} \quad \mathbf{Td}_1 = \frac{w_A}{c_A},$$

где $w_A = \frac{\beta K_v A}{2\rho}$.

На рис. 1 с использованием справочных данных [7, 9–12] о механических и теплофизических характеристиках металлов представлены расчетные значения \mathbf{Td}_1 . Результаты свидетельствуют о связи между собой приведенных характеристик. Можно выделить группы металлов, для которых $\mathbf{Td}_1 < 1$, $\mathbf{Td}_1 \approx 1$ и $\mathbf{Td}_1 > 1$, и на основании этого заключить, что процессы механического и теплового деформирования энергетически различаются. Является ли это общей закономерностью, можно узнать при проведении дополнительных исследований. На рис. 1 также показано, насколько экспериментальные значения атомной теплоемкости c_A и аналогичной характеристики при упругом деформировании w_A отличаются от теоретического значения $c_A \approx 3R$ (закон Дюлонга–Пти).

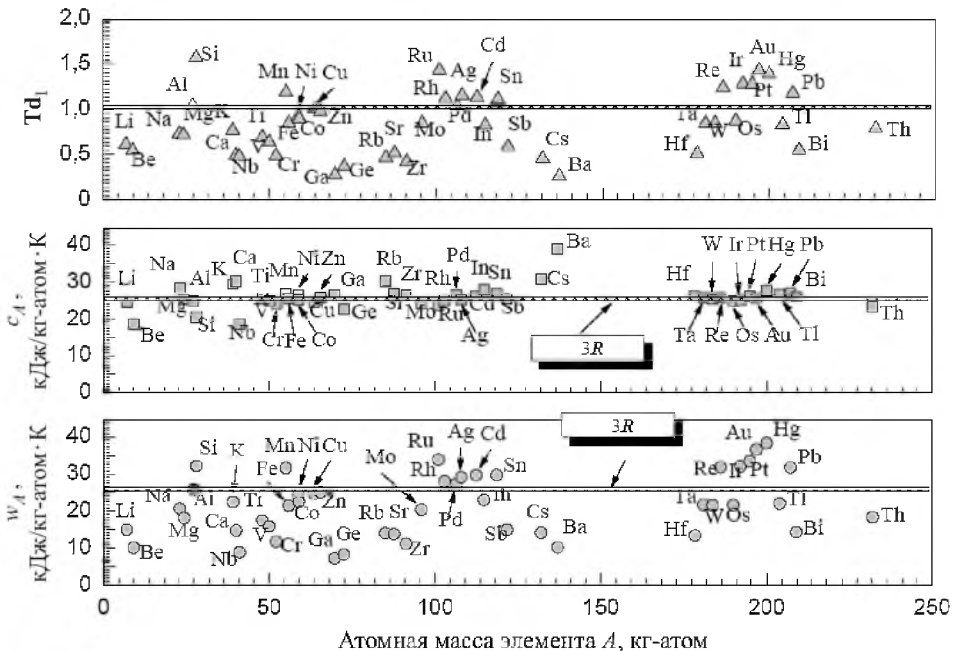


Рис. 1. Значения критерия \mathbf{Td}_1 , атомной теплоемкости c_A и характеристики w_A в зависимости от атомной массы химического элемента A .

Для описания процесса разрушения примем выражение, которое описывает условие разрыва межатомных связей идеального кристаллического изо-

тропного твердого тела [6]. Оно связывает между собой работу разрушения w_p , теплоту (энтальпию h) и относительное изменение объема v материала при его нагревании:

$$\frac{w_p}{h} v = \frac{1}{2} \Xi_{(\text{lim})} \varepsilon_{(\text{lim})}, \quad (6)$$

где $w_p = \int_0^{\varepsilon_{(\text{lim})}} \sigma d\varepsilon$; $h = \int_0^T c_p T$; $v = \int_0^T \beta dT$; $\Xi_{(\text{lim})}$ – относительные допускаемые напряжения; $\varepsilon_{(\text{lim})}$ – допускаемые деформации.

Уравнение (6) можно также записать в виде

$$\mathbf{Td}_2 v = \mathbf{Lt}, \quad (7)$$

где $\mathbf{Td}_2 = w_p/h$ – отношение работы разрушения к энтальпии материала; \mathbf{Lt} – постоянная разрушения при автомодельном процессе деформирования, $\mathbf{Lt} = \frac{1}{2} \Xi_{(\text{lim})} \varepsilon_{(\text{lim})}$.

Уравнение (7) представляет собой термодинамическое критериальное уравнение предельного состояния материалов. Оно является исходным (базовым). Для описания процессов в реальных функциональных и конструкционных материалах в уравнение (7) дополнительно вводятся безразмерные критерии, которые позволяют учитывать их особенности. В области невысоких температур уравнение (7) упрощается и принимает вид

$$\frac{w_p}{E} = \text{const.} \quad (8)$$

Равенство безразмерных характеристик нагружения (начальные и граничные условия). Безразмерные характеристики нагружения следуют из относительного представления соответствующих уравнений состояния твердого тела, уравнений переноса, граничных условий. При отсутствии таких уравнений следует обратиться к анализу размерностей соответствующих величин.

Начальный объем тела V_0 , его массу m можно представить в виде инварианта

$$\mathbf{Tmv} = \frac{V_0}{v_0} = \frac{m}{\rho v_0} = \frac{2Em\alpha}{\rho k},$$

где v_0 – условный атомный объем, $v_0 = \frac{k}{2E\alpha}$. Кроме того, объем V_0 также связан с начальной абсолютной температурой тела T_0 ,

$$V_0 = V_{T=0\text{K}} \left(1 + \int_0^{T_0} \beta dT \right)$$

($V_{T=0\text{K}}$ – объем тела при абсолютном нуле).

Следовательно, обобщенную термодинамическую характеристику состояния $T_v = \int_0^{T_0} \beta dT$ можно рассматривать и как абсолютную относительную температуру, и как изменение относительного объема. Для изотропных тел имеем $\beta = 3\alpha$. Принципиальное отличие относительной температуры T_v от других относительных температур, например $T/T_{пл}$ – гомологической температуры Людвига, состоит в возможности отдельного учета индивидуальных свойств материала [13–15]. На рис. 2 для металлов приведены зависимости относительных температур T_v от абсолютных температур T .

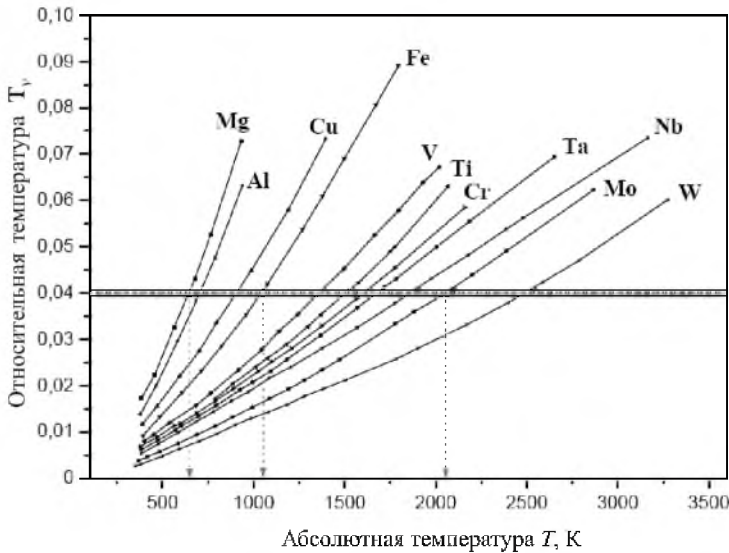


Рис. 2. Зависимость относительных температур T_v металлов от абсолютных температур T .

Одинаковые величины относительных температур T_v достигаются при разных значениях абсолютной температуры, что позволяет для оценки состояния тугоплавких материалов использовать информацию о состоянии легкоплавких материалов. Например, температура образца из магнезия $T_{Mg} = 680$ К эквивалентна температурам образцов из железа $T_{Fe} = 1060$ К и молибдена $T_{Mo} = 2080$ К.

Выражение для относительного времени механического нагружения можно получить на основании анализа размерностей физических характеристик, в формулах которых есть время $[t] - \Theta$. Анализ размерности модуля упругости $[E] - \Lambda^{-1}M\Theta^{-2}$, плотности $[\rho] - M\Lambda^{-3}$, коэффициентов температуропроводности $[a_t] - \Lambda^2\Theta^{-1}$, электропроводности $[a_e] - \Lambda^2\Theta^{-1}$, массопереноса (диффузии) $[a_m] - \Lambda^2\Theta^{-1}$, где Λ , M , Θ – размерности длины, массы, времени, позволяет представить относительное время следующим образом:

$$Me_t = \frac{tE}{a_t \rho}; \quad Me_e = \frac{tE}{a_e \rho}; \quad Me_m = \frac{tE}{a_m \rho}.$$

На рис. 3 показано, как для разных металлов относительная температура влияет на относительное приведенное время механического нагружения Me_t . При расчете значения Me_t физическое время принято $t = 1$ с. Для одних материалов с повышением температуры физическое время механического нагружения уменьшается (BT18, Fe(99,9%)), для других – увеличивается (Ta, Ni, Mo) или остается без изменения (Mg(99,0%), Al(95,0%), АМг6). Обеспечение в физических опытах условия $Me_t = idem$ достигается в результате разного времени механического нагружения. Например, время испытаний образцов на длительную прочность из титанового сплава BT18 при прочих одинаковых условиях будет меньше времени испытаний образцов из Fe в 1,4 раза и из Ta в 2,4 раза.

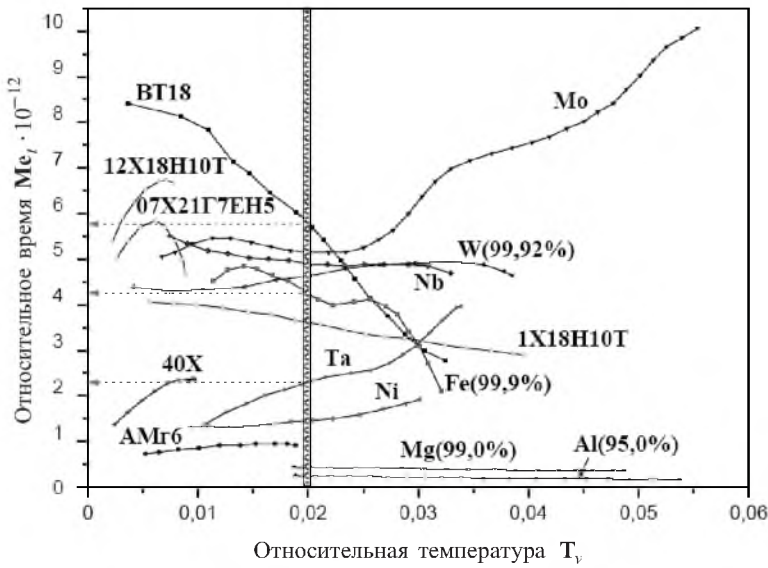


Рис. 3. Эквивалентное (относительное) время механического нагружения Me_t для металлов и сплавов в зависимости от относительной температуры T_r .

Начальные условия механического состояния обычно задаются распределением по поверхности тела компонентов вектора перемещений l_{ij} или составляющими поверхностных напряжений p_{ij} и приводятся к безразмерному виду:

$$Me_1 = l_{ij} \sqrt[3]{\frac{2\alpha E}{k}}; \quad Me'_1 = \frac{l_{ij} S}{V_0}; \quad Me_p = \frac{p_{ij}}{E},$$

где S – поверхность тела (образца).

Равенство обобщенных параметров текущих и предельных состояний. При неизотермическом деформировании подобие текущих термодинамических состояний материалов достигается при условии, что кинетика напряженно-деформированного и теплового состояний одинакова:

$$\frac{\sigma_{ij}}{E} = f\left(\frac{tE}{a_t \rho}\right) = idem; \quad \varepsilon_{ij} = f\left(\frac{tE}{a_t \rho}\right) = idem; \quad \alpha T = f\left(\frac{tE}{a_t \rho}\right) = idem$$

или

$$\mathbf{Me}_0 = f(\mathbf{Me}_t) = \text{idem}; \quad \mathbf{T}_v = f(\mathbf{Me}_t) = \text{idem},$$

где $\mathbf{Me}_0 = \sigma_{ij}/E$.

Обобщенные предельные характеристики материалов следуют из анализа линейных преобразований уравнения (7) – термодинамического критерия прочности. Предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b , поперечное сужение при разрыве ψ (статическое нагружение W_b), размахи напряжений σ_{cycl} и деформаций ε_{cycl} в цикле (циклическое нагружение W_{cycl}), напряжения σ_{cr} и деформации ε_{cr} ползучести (длительная прочность W_{cr}) представляются в безразмерном виде

$$\mathbf{Me}_1 = \frac{\sigma_{0,2}}{E}; \quad \mathbf{Me}_2 = \frac{\sigma_b}{E}; \quad \mathbf{Me}_3 = \frac{\sigma_{cycl}}{E}; \quad \mathbf{Me}_4 = \frac{\sigma_{cr}}{E}$$

или

$$\mathbf{Mt}_1 = \frac{\sigma_{0,2}\alpha}{c_p}; \quad \mathbf{Mt}_2 = \frac{\sigma_b\alpha}{c_p}; \quad \mathbf{Mt}_3 = \frac{\sigma_{cycl}\alpha}{c_p}; \quad \mathbf{Mt}_4 = \frac{\sigma_{cr}\alpha}{c_p}.$$

Данные характеристики связываются между собой эмпирическими соотношениями в виде степенных или трансцендентных уравнений, в которые кроме обобщенных текущих и предельных характеристик входят обобщенные факторы нагружения (скорости нагружения и нагрева, время цикла, отношение главных напряжений, коэффициент концентрации напряжений, энергия физико-химических процессов и т.д.) – таблица.

Конкретизация уравнений, значения их параметров являются результатом обработки опытных данных.

При статическом нагружении:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{W_b}{E} \right) \prod_i^m \mathbf{F}_i^{n_i} = \text{const} \\ \text{или} \\ \mathbf{Me}_1^{k_1} \mathbf{Me}_2^{k_2} \psi \prod_i^m \mathbf{F}_i^{n_i} = \text{const}; \end{array} \right. \quad (9)$$

при циклическом нагружении:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{W_{cycl}}{E} \right)^{l_0} N_p \prod_i^m \mathbf{F}_i^{n_i} = \text{const} \\ \text{или} \\ \mathbf{Me}_3^{l_3} \varepsilon_{cycl}^{l_{cycl}} N_p \prod_i^m \mathbf{F}_i^{n_i} = \text{const}; \end{array} \right. \quad (10)$$

при длительной прочности:

$$\left\{ \begin{array}{l} \left(\frac{W_{cr}}{E} \right) \prod_i^m F_i^{n_i} = \text{const} \\ \text{или} \\ \mathbf{Me}^d \varepsilon_{cr} \prod_i^m F_i^{n_i} = \text{const}, \end{array} \right. \quad (11)$$

где $k_1, k_2, l_0, l_3, l_{cycl}, d, n_i$ – соответствующие коэффициенты регрессий уравнений для исследуемого интервала изменения обобщенных параметров текущих и предельных состояний материала при различных обобщенных факторах нагружения F_i (температура, скорость и время цикла нагружения, главные напряжения, концентрация напряжений, энергия физико-химических процессов и т.д.) [16]. Заметим, что вид конкретного уравнения и значения его параметров справедливы только в области изменения исследованных параметров состояния материала и факторов нагружения:

$$F_{i(\max)} \geq F_i \geq F_{i(\min)}.$$

Уравнения (9)–(11) представляют степенные зависимости, что характерно для автотомельных процессов деформирования и разрушения. Каждый из аргументов (9)–(11) является нелинейным масштабам. При взаимозависимости предельных характеристик количество аргументов сокращается. При графической интерпретации результатов это проявляется в наличии так называемых полюсов.

Обобщенные физико-механические характеристики текущих и предельных термодинамических состояний

| Характеристика | Обобщенная относительная характеристика |
|---|--|
| Начальное состояние материала | |
| $E, \text{Па}$ | $\mathbf{Td} = \frac{E\alpha}{c_p \rho}$ |
| α, K^{-1} | |
| $c_p, \text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ | |
| $\rho, \text{кг}/\text{м}^3$ | |
| $m, \text{кг}$ | $\mathbf{Tmv} = \frac{V}{v_0} = \frac{m}{\rho v_0} = \frac{2Em\alpha}{\rho k}$ |
| $V, \text{м}^3$ | |
| T_0, K | |
| Условия нагружения и текущее состояние | |
| Сила $P, \text{Н}$ | $\mathbf{G} = \frac{P}{SE}$ |
| Площадь тела $S, \text{м}^2$ | |

| | |
|--|---|
| Напряжение σ_{ij} , Па | $\mathbf{Me}_0 = \frac{\sigma_{ij}}{E}$ |
| Коэффициент концентрации напряжений κ_σ | $\kappa_\sigma = \frac{\sigma}{\sigma_{ном}}$ |
| Отношение главных напряжений χ_σ | $\chi_{1/2} = \frac{\sigma_1}{\sigma_2}, \chi_{3/2} = \frac{\sigma_3}{\sigma_2}$ |
| Асимметрия цикла r | $r = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{min}}$ |
| Температура образца T , К | $T_v = \alpha T$ |
| Время t , с | $\mathbf{Me}_t = \frac{tE}{a_T \rho}$ |
| Скорость деформирования $\dot{\varepsilon}$, с ⁻¹ | $\mathbf{Me}_\varepsilon = \frac{\sigma a_T \rho}{t E^2}, \mathbf{Me}_\varepsilon = \frac{\varepsilon a_T \rho}{t E}$ |
| Скорость износоустойчивости \dot{m} , кг/(м ² ·с) | $\mathbf{Mm}_1 = \frac{m a_T \sqrt[3]{\frac{2E\alpha}{k}}}{F t E}, \mathbf{Mm}_2 = \frac{m a_T \alpha}{t k}$ |
| Фазовый переход или структурное превращение | |
| Энергия Q_f , Дж/кг | $\frac{Q_f \rho}{E}$ |
| Температура T_f , К | αT_f |
| Изменение объема ΔV_f , м ³ | $v_f = \frac{\Delta V_f}{V_0}$ |
| Относительные характеристики предельного состояния | |
| $\sigma_{0,2}$, Па | $\mathbf{Me}_1 = \frac{\sigma_{0,2}}{E}, \mathbf{Mt}_1 = \frac{\sigma_{0,2} \alpha}{c_p}$ |
| σ_b , Па | $\mathbf{Me}_2 = \frac{\sigma_b}{E}, \mathbf{Mt}_2 = \frac{\sigma_b \alpha}{c_p}$ |
| Поперечное сужение при разрыве | ψ |
| Работа однократного статического деформирования W_b , Па | $\frac{W_b}{E}$ |
| Циклическое напряжение σ_{cycl} , Па | $\mathbf{Me}_3 = \frac{\sigma_{cycl}}{E}, \mathbf{Mt}_3 = \frac{\sigma_{cycl} \alpha}{c_p}$ |
| Работа циклического деформирования W_{cycl} , Па | $\frac{W_{cycl}}{E}$ |
| Предел длительной прочности σ_{cr} , Па | $\mathbf{Me}_4 = \frac{\sigma_{cr}}{E}, \mathbf{Mt}_4 = \frac{\sigma_{cr} \alpha}{c_p}$ |
| Деформация ползучести | ε_{cr} |
| Работа деформирования при длительной прочности W_{cr} , Па | $\frac{W_{cr}}{E}$ |

В качестве примера на рис. 4 приведены результаты обобщения длительной прочности чистых металлов при разных температурах [17, 18] в логарифмических координатах относительная температура T_v ($T_v = \alpha T$) – относительная прочность Me_4 ($Me_4 = \sigma_{100}/E$). Это позволяет установить степенной характер уравнений

$$Me_4 = CT_v^d$$

и наличие некоторой области с полюсом ξ , в которой линии регрессий пересекаются. Здесь $C = 8,7 \cdot 10^{-7} \dots 1,1 \cdot 10^{-4}$; $d = -5,77 \dots -7,99$; координаты полюса $T_v = 0,076$; $Me_4 = 5,5 \cdot 10^{-6}$. Следовательно, процесс разупрочнения материалов происходит при одном преобладающем механизме, а сами материалы в диапазоне изменения относительных температур $0,016 < T_v < 0,044$, относительной длительной прочности $0,0005 < Me_4 < 0,0035$ и относительного времени нагружения $2 \cdot 10^{-7} < Me_t < 2 \cdot 10^{-6}$ можно принять термодинамически подобными. Это позволяет сделать предварительное заключение о зависимости длительной прочности исследуемого материала от температуры. Для этого необходимо провести испытание одного образца.

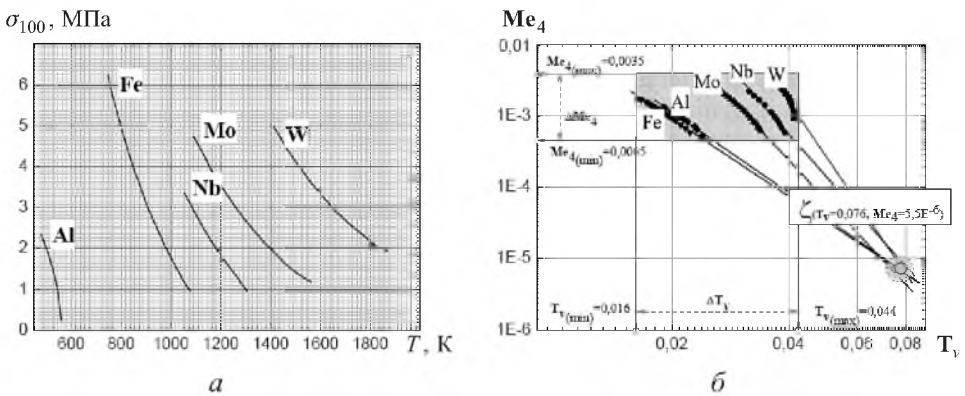


Рис. 4. Зависимость длительной прочности чистых металлов на базе 100 ч от температуры в размерном (а) и относительном (б) представлениях.

Заключение. Предложена система обобщенных параметров термодинамических состояний и термомеханического нагружения, позволяющая рассматривать уравнения предельных состояний как инвариантные зависимости, что расширяет возможности методов прогнозирования.

Резюме

Наведено методику запису характеристик матеріалів у вигляді термодинамічних інваріантів. Це дозволило для подібних матеріалів запропонувати аргументи рівнянь граничних механічних станів при неізотермічному деформуванні. Методику побудовано на співвідношеннях елементарної теорії руйнування та на концептуальних положеннях теорій подібності й аналізу розмірності.

1. Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. – М.: Наука, 1984. – 432 с.
2. Седов Л. И. Методы подобия и размерностей в механике. – М.: Наука, 1967. – 428 с.
3. Кинджери В. Д. Измерения при высоких температурах. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 466 с.
4. Ashby M. F. On the engineering properties of materials. Overview N80 // Acta Metal. – 1989. – 37, No. 5. – P. 1273 – 1293.
5. Бутузов А. И., Минаковский В. М. Обобщенные переменные теории переноса. – Киев: Вища шк., 1970. – 110 с.
6. Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С. Прочность и долговечность материалов при циклических тепловых воздействиях. – Киев: Наук. думка, 1990. – 256 с.
7. Лариков Л. Н., Юрченко Ю. Ф. Тепловые свойства металлов и сплавов. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1985. – 438 с.
8. Коваленко А. Д. Основы термоупругости. – Киев: Наук. думка, 1970. – 308 с.
9. Лифшиц Б. Г., Крапошин В. С., Линецкий Я. Л. Физические свойства металлов и сплавов. – М.: Metallurgia, 1980. – 318 с.
10. Физико-химические свойства элементов. Справочник / Под ред. Г. В. Самонова. – Киев: Наук. думка, 1965. – 810 с.
11. Францевич И. Н., Воронов Ф. Ф., Бакута С. А. Упругие постоянные и модули упругости металлов и неметаллов. Справочник. – Киев: Наук. думка, 1982. – 288 с.
12. Смитлз К. Д. Металлы. Справочник. – М.: Metallurgia, 1980. – 446 с.
13. Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С. Зависимости между механическими и теплофизическими характеристиками материалов при тепловом нагружении твердых тел // Пробл. прочности. – 1986. – № 10. – С. 9 – 14.
14. Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С. Зависимость между механическими и теплофизическими характеристиками материалов при разрушении // Там же. – 1989. – № 9. – С. 22 – 27.
15. Третьяченко Г. Н., Карпинос Б. С. Энергетические соотношения при термомеханическом разрушении материалов // Там же. – 1997. – № 5. – С. 14. – 22.
16. Стрижало В. А. О критерии подобия ползучести металлов // Там же. – 1984. – № 10. – С. 9 – 12.
17. Мороз Л. С. Механика и физика деформаций и разрушения материалов. – Л.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
18. Копецкий Ч. В. Структура и свойства тугоплавких материалов. – М.: Metallurgia, 1974. – 256 с.

Поступила 09. 10. 2007