

К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ И ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ ПО УРАВНЕНИЯМ С ОДНИМ СКАЛЯРНЫМ ПАРАМЕТРОМ ПОВРЕЖДАЕМОСТИ

На примере титанового и алюминиевого сплавов проиллюстрирована возможность описания процесса ползучести и разрушения материалов, деформация при разрушении которых зависит от величины и вида напряженного состояния. Сведение экспериментальных диаграмм ползучести в единую кривую в относительных координатах $\omega = A/A_*$, $\tau = t/t_*$ (A , t — текущие значения рассеянной энергии и времени, A_* , t_* — соответствующие значения при разрушении) позволяет использовать запись уравнения повреждаемости в виде уравнения состояния $d\omega/dt = \varphi(\sigma)\psi(\omega)$, а также связать параметр повреждаемости с измеряемыми в эксперименте величинами. Этим снимается произвол в определении коэффициентов уравнений ползучести и повреждаемости, дается единая методика их получения.

Экспериментальное обоснование непротиворечивости уравнения состояния с одним скалярным параметром для описания кинетики повреждений проведено при стационарных и ступенчатых режимах нагружения. Установлено, что для разносопротивляющихся ползучести материалов процессы накопления повреждений при растяжении и сжатии различны, указана область применимости определяющих уравнений.

Описание процесса ползучести вплоть до разрушения с учетом повреждаемости материала находит в последнее время применение не только в исследованиях на длительную прочность, но и в технологических задачах формообразования в режимах ползучести и сверхпластичности при оценке израсходованного ресурса материала на стадии изготовления детали. Становится актуальной задача описания с единых позиций процессов деформирования материалов в условиях технологической ползучести (минуты, часы) и при их последующей эксплуатации (десятки, сотни тысяч часов) для оценки остаточного прочностного ресурса элементов конструкций.

Ползучести материалов с одновременным накоплением повреждений посвящено большое количество работ [1, 2], в которых с феноменологических позиций введением параметра повреждаемости делается попытка совместить задачи об определении напряженно-деформированного состояния с задачей определения длительности до разрушения. Повреждаемость в самом общем случае, по-видимому, имеет тензорную природу [3, 4], однако практическое использование тензора повреждаемости встречает некоторые трудности. В последнее время делаются попытки определять повреждаемость материала как векторную величину [5], формулируются определяющие уравнения с двумя кинетическими параметрами повреждаемости [6], одним параметром и различными критериями разрушения [7], обсуждаются модели с использованием понятия повреждаемой сплошной среды в рамках модели двухфазной среды [8], но в основном продолжают широко применять уравнения с одним скалярным параметром повреждаемости для исследований как в области кратковременной ползучести, так и в области длительной прочности.

В большинстве работ для описания процесса деформирования металлических материалов используется концепция Работнова [9], когда рассматриваемое состояние в материале характеризуется параметром повреждаемости ("растресканный") $0 \leq q \leq 1$, а также ее различные модификации, базирующиеся на понятии эффективного напряжения в форме $\sigma/(1-q)$ и с разными вариациями $\sigma/(1-q)^m$ [10]. В общем случае

определяющие уравнения для одноосного напряженного состояния записываются в виде системы двух уравнений:

$$(1) \quad \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{f(\sigma, T)}{\theta(q)}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\varphi(\sigma, T)}{Q(q)}.$$

Запись второго соотношения в таком виде предполагает изначально подобие процессов накопления повреждений в материале и является, вообще говоря, гипотезой, требующей обоснования. Проверка гипотезы единой кривой возможна в случаях, когда параметру q придается физический смысл или он конкретизируется посредством величин, измеряемых в эксперименте. Следует отметить, что по концепции Работнова параметр повреждаемости не наделяется каким-либо физическим смыслом и система определяющих уравнений обладает произволом [7, 9]; независимое нахождение параметров уравнений из экспериментальных данных невозможно [9, с.366]. Авторы по-разному снимают этот произвол, стремясь наилучшим образом установить соответствие экспериментальных данных расчетным значениям [7, 10], единой же методики определения входящих в уравнения констант нет.

В [11] приведен анализ многочисленных исследований на ползучесть и длительную прочность металлических материалов в широком интервале длительностей, из которых вытекает, что деформации до разрушения с уменьшением напряжения могут возрастать, а затем понижаться, и наоборот, а также могут монотонно понижаться и т.д. Отмечается, что выполнимость энергетического принципа поврежденности подтверждается только в определенных температурно-временных интервалах для некоторых типов материалов. Сказанное существенно ограничивает попытки введения параметра повреждаемости с конкретным физическим смыслом для использования при описании процесса деформирования в широком температурно-временном диапазоне.

Ниже с феноменологических позиций, оставаясь в рамках концепции Работнова и не наделяя параметр повреждаемости физическим смыслом, приведем рассуждения, позволяющие связать параметр повреждаемости с измеряемыми в эксперименте величинами и тем самым снять произвол в определении коэффициентов функциональных зависимостей в уравнениях (1).

Определяющие уравнения. Для простоты изложения приведем рассуждения применительно к неупрочняющимся материалам, оставаясь в целом в рамках энергетического варианта теории ползучести, когда за меру интенсивности процесса ползучести принимается величина мощности рассеяния при ползучести $W = \varepsilon_{ij} \sigma_{ij}$ [12]. Конкретизируем определяющие уравнения (1) одноосной ползучести и повреждаемости в энергетических терминах в виде

$$(2) \quad \frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma, T)}{(1-q)^\mu}, \quad \frac{dq}{dt} = \frac{\Phi(\sigma, T)}{(1-q)^k} \quad (0 \leq q \leq 1),$$

где $A = \int_0^t \sigma_{ij} d\varepsilon_{ij}$ — работа рассеяния; коэффициенты μ, k зависят от температуры T . Вводя приведенное время

$$(3) \quad \tau = (k+1) \int_0^t \Phi(\sigma, T) dt \quad (0 \leq \tau \leq 1)$$

и интегрируя второе уравнение (2), получим

$$(4) \quad 1 - \tau = (1 - q)^{k+1}.$$

С помощью замены

$$(5) \quad 1 - \omega = (1 - q)^{k-\mu+1}$$

система исходных уравнений (2) приводится к виду

$$(6) \quad \frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma, T)}{(1 - \omega)^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma, T)}{(1 - \omega)^m},$$

где $\varphi(\sigma, T) = (k - \mu + 1)\Phi(\sigma, T)$; $m = \mu / (k - \mu + 1)$;

$$(7) \quad \omega = 1 - (1 - (m + 1) \int_0^t \varphi(\sigma, T) dt)^{1/(m+1)}.$$

Согласно соотношениям (4), (5), имеем уравнение единой кривой

$$(8) \quad (1 - \omega)^{m+1} = 1 - \tau \quad (0 \leq \omega \leq 1).$$

Учитывая, что величина ω функционально связана с исходным параметром повреждаемости q зависимостью (5) и изменяется в тех же пределах, с феноменологических позиций о повреждаемости материала можно судить по параметру ω . В дальнейшем будем придавать ω смысл параметра повреждаемости и записывать определяющие уравнения для процесса ползучести и длительной прочности в виде (6) с одинаковыми коэффициентами разупрочнения m в обоих уравнениях. Полученная система имеет на один коэффициент меньше, чем исходная, и не имеет произвола.

Действительно, интегрируя систему (6) при постоянном напряжении, находим

$$(9) \quad \omega = 1 - [1 - (m + 1)\varphi(\sigma, T)t]^{1/(m+1)}, \quad A = \frac{f(\sigma, T)}{\varphi(\sigma, T)}\omega;$$

$$(10) \quad \omega = A/A_*, \quad A_* = f(\sigma, T)/\varphi(\sigma, T);$$

$$(11) \quad \tau = t/t_*, \quad t_* = \frac{1}{(m + 1)\varphi(\sigma, T)}.$$

Таким образом, параметр повреждаемости для случая одноосного деформирования есть не что иное, как отношение текущей работы рассеяния A к ее величине на момент разрушения A_* , т.е. приведенная работа $\omega = A/A_*$, а τ есть нормированное время — отношение текущего времени к времени разрушения t_* . Учитывая, что при $\sigma = \text{const}$ имеет место $\omega = A/A_* \equiv \varepsilon/\varepsilon_*$ (ε — текущие значения деформации, ε_* — деформации в момент разрушения), удастся связать введенный параметр повреждаемости с измеряемыми в одноосном эксперименте величинами. Таким образом, экспериментальную проверку непротиворечивости полученных уравнений следует проводить в относительных координатах $\varepsilon/\varepsilon_*$, t/t_* .

Для материалов с тремя стадиями ползучести, введя параметр упрочнения α по аналогии с [13], определяющие уравнения запишем в виде

$$(12) \quad \frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma, T)}{\omega^\alpha(1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma, T)}{\omega^\alpha(1 - \omega^{\alpha+1})^m}.$$

При этом получим уравнение единой кривой с учетом введенного обозначения (3):

$$(13) \quad (1 - \omega^{\alpha+1})^{m+1} = 1 - \tau.$$

Здесь ω , τ имеют вид (10), (11).

На случай пространственного напряженного состояния одноосные уравнения (6), (12) обобщаются обычным образом: заменой σ на эквивалентное напряжение σ_3 (функция инвариантов тензора напряжений и тензора анизотропии свойств ползучести), с той лишь разницей, что эквивалентные напряжения в уравнениях ползучести и повреждаемости различны.

Экспериментально на многих сплавах [12] подтвердилась непротиворечивость градиентного закона течения ($\dot{\varepsilon}_{kl} = \lambda \partial \sigma_3 / \partial \sigma_{kl}$) с применением уравнений в энергетических терминах, что существенно упрощает их практическое использование. Применительно к описанию процесса ползучести и

разрушения материалов в энергетических терминах система уравнений для использования в практике расчетов запишется в виде

$$(14) \quad \frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma_3, T)}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad A = \int_0^t \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dt,$$

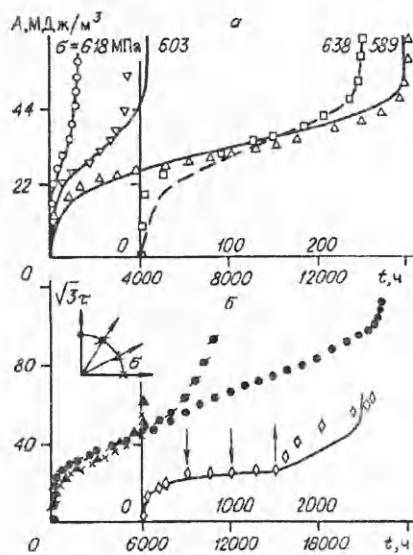
$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma_{3*}, T)}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \dot{\epsilon}_{kl} = \lambda \frac{\partial \sigma_3}{\partial \sigma_{kl}},$$

где σ_3 — эквивалентное напряжение при постоянной мощности рассеяния работы на установившейся стадии ползучести ($W_{\min} = \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = \text{const}$), а при отсутствии этой стадии при $W_0 = \text{const}$ в начальный момент ($t = 0$). Эквивалентное напряжение σ_{3*} определяется как комбинация напряженных состояний, при которых в стационарных условиях нагружения происходит эквивалентное накопление повреждений, и, следовательно, длительность до разрушения одинакова.

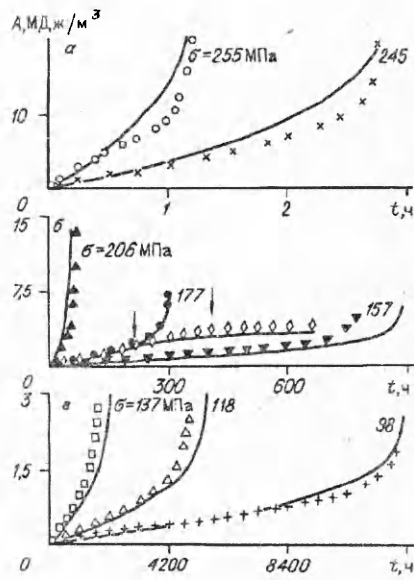
Полученная таким образом система уравнений (14), вообще говоря, накладывает достаточно жесткие требования на область их применимости. Следуя уравнениям единой кривой (8), (13), необходимо проверять подобие первичных кривых деформирования материала в условиях ползучести вплоть до разрушения в терминах поврежденности материала — время. Процесс ползучести и разрушения должен полностью определяться текущими значениями напряжений σ и величиной поврежденности материала ω вне зависимости от того, как накоплена эта величина. Возможность использования предложенных уравнений должна быть экспериментально обоснована в достаточно широком температурно-временном диапазоне.

Экспериментальная проверка гипотезы единой кривой. Проиллюстрируем сказанное выше на примере анализа процесса ползучести и разрушения двух сплавов при стационарных термосиловых условиях нагружения: титанового сплава 3В при комнатной температуре и алюминиевого сплава АК4-1Т при температуре 200 °С. Сплав 3В обладает четко выраженной стадией упрочнения и существенной анизотропией свойств ползучести (время до разрушения образцов, вырезанных из плиты толщиной 30 мм поперек проката, в 30 раз больше времени разрушения образцов, вырезанных в продольном направлении, при одной и той же величине напряжения) [13], а также явной зависимостью работы рассеяния при разрушении от вида напряженного состояния и знака прикладываемой нагрузки [14].

На рис. 1, а светлыми значками в виде диаграмм $A = A(t)$ представлены результаты экспериментов на растяжение образцов, вырезанных из плит в продольном направлении, при $\sigma = \text{const}$ (значения σ указаны цифрами против соответствующих диаграмм), на рис. 1, б — результаты экспериментов на растяжение, кручение и комбинацию растяжения с кручением образцов, вырезанных в поперечном направлении, при одной и той же величине интенсивности напряжений ($\sigma_i = 637$ МПа), а также эксперимента на растяжение продольного образца при ступенчатом изменении напряжений с $\sigma_1 = 608$ МПа на $\sigma_2 = 589$ МПа, далее на $\sigma_3 = 559$ МПа и на $\sigma_4 = 618$ МПа (ромбики, время перегрузок отмечено стрелкой), описанные в [13, 14]. Величина работы рассеяния при растяжении практически в 2 раза меньше, чем при кручении, в то же время при испытаниях при фиксированном виде напряженного состояния (рис. 1, а) работа рассеяния до разрушения имеет практически постоянное значение ($A_* = 66,22$ МДж/м³) во всем исследуемом интервале длительностей как для продольного, так и для поперечного направления [13]. Показано [14], что контур $\sigma_i = \text{const}$ (приведен на графике в виде знаков соответствующих экспериментов на растяжение и совместное действие растяжения с кручением) является контуром эквивалентного напряжения в смысле равенства мощности рассеяния на установившемся участке $\sigma_3 = \sigma_i$, причем отмечается вполне удовлетворительное подтверждение ассоциированного закона течения для этого контура



Р и с. 1



Р и с. 2

($\dot{\epsilon}_{kl} = \lambda \partial \sigma_i / \partial \sigma_{kl}$). Существенная разница по длительности до разрушения в экспериментах при одной и той же величине $\sigma = \sigma_i$ говорит о том, что $\sigma_3 \neq \sigma_3^*$.

На рис. 2—4 приведены экспериментальные диаграммы ползучести $A = A(t)$ на растяжение, кручение и сжатие образцов, вырезанных поперек проката из плиты толщиной 64 мм сплава АК4-1Т, при температуре 200 °С и постоянном напряжении (значения σ_i , указанные против соответствующих диаграмм, поддерживались постоянными из условия несжимаемости материала при ползучести) в интервале длительностей от нескольких до 10^4 ч. Образцы предварительно подвергались искусственному старению. Для растяжения применялись длинные цилиндрические образцы диаметром 8 мм и рабочей длиной $l_0 \approx 11\sqrt{F_0}$, для сжатия — короткие с $l_0 \approx 6\sqrt{F_0}$, образцы на чистое кручение имели наружный диаметр 20 мм, внутренний 18 мм, рабочую длину 40 мм.

Из рис. 2, 3 видно, что в отличие от сплава 3В работа рассеяния при разрушении сплава АК4-1Т существенно зависит от действующего напряжения и меняется практически на порядок в исследуемом диапазоне длительностей. На рис. 2, б ромбиками показаны результаты эксперимента при ступенчатом изменении напряжений при растяжении с $\sigma_1 = 177$ МПа на $\sigma_2 = 137$ МПа и на $\sigma_3 = 118$ МПа, на рис. 3, б звездочками — аналогичного эксперимента на растяжение с одной перегрузкой ($\sigma = 177$ МПа на $\sigma = 137$ МПа (время перегрузок отмечено стрелками)).

В экспериментах на сжатие (рис. 4) образцы до разрушения не доводились, эксперименты прекращались при деформациях порядка 10 ÷ 15 %, когда образец начинал искривляться (потеря устойчивости носила вязкий характер). Некоторые эксперименты большой продолжительности дублировались (рис. 4, б, в). Из приведенных результатов следует, что работа разрушения A_* зависит от знака прикладываемой нагрузки и существенно больше при сжатии, чем при растяжении при одной и той же длительности процесса. Анализ отдельных немногочисленных экспериментов на сжатие, доведенных до разрушения (сплав 3В, сплав ЖСК при температуре испытаний 800 — 850 °С [15] и др.), показывает, что величина работы рассеяния до разрушения может превосходить таковую при растяжении более чем на порядок при одной и той же продолжительности.

На рис. 5 (обозначения те же, что на рис. 1—3) показаны описанные выше экспериментальные данные (кроме сжатия), перестроенные в приве-

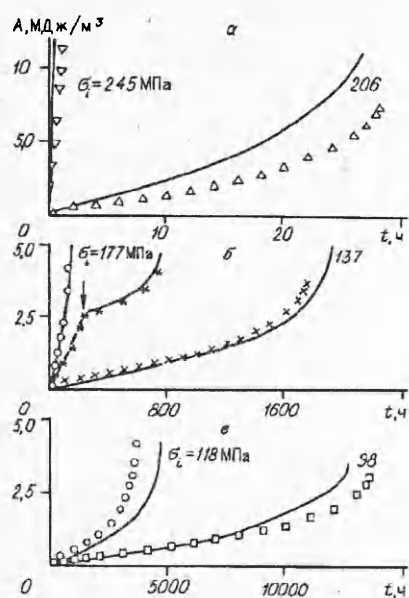


Рис. 3

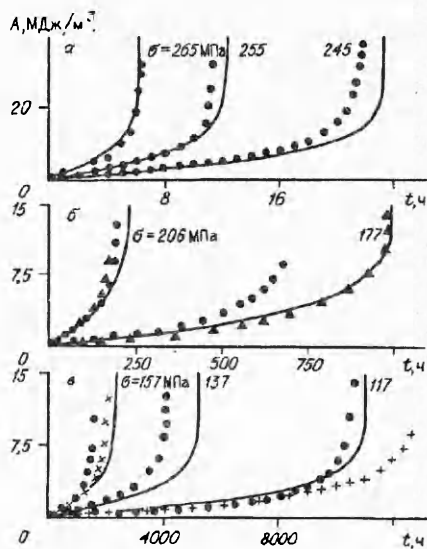


Рис. 4

денных координатах $\omega = A/A_*$, $\tau = t/t_*$. В экспериментах с перегрузками для насчитывания суммарных величин ω , τ на каждом k -м этапе нагружения значения приращения A и t относились к A_{*k} и t_{*k} соответствующего стационарного эксперимента с теми же значениями напряжений. На рис. 5, а приведены результаты экспериментов на сплаве 3В при чистом растяжении образцов, вырезанных в продольном направлении из плиты, и при растяжении с кручением образцов, вырезанных в поперечном направлении, на рис. 5, б, в представлены результаты экспериментов на сплаве АК4-1Т при растяжении и соответственно при чистом кручении.

Несмотря на довольно сложный характер поведения указанных сплавов в условиях ползучести и явную зависимость значения работы рассеяния при разрушении от величины и вида напряженного состояния, экспериментальные точки в области от растяжения до кручения группируются довольно плотным пучком в единую кривую в приведенных координатах как при стационарных, так и при ступенчато меняющихся режимах нагружения. Тем самым подтверждается непротиворечивость записи уравнения кинетики повреждений в форме уравнения состояния как для разупрочняющихся материалов (8), так и для материалов со всеми тремя стадиями ползучести (13) в достаточно широком диапазоне длительностей. Аналогичный формальный прием построения экспериментальных кривых в нормированных координатах использовался в [16, 17] при обосновании уравнения кривой усталости во всей области малоциклового нагружения исходя из экспериментально установленного подобия кривых циклической ползучести в координатах $\omega = \epsilon/\epsilon_*$, $\tau = N/N_*$ (N_* — число циклов до разрушения).

Таким образом, вводя приведенные координаты $\omega = A/A_* = \epsilon/\epsilon_*$, $\tau = t/t_*$ для обработки экспериментальных данных при стационарных режимах нагру-

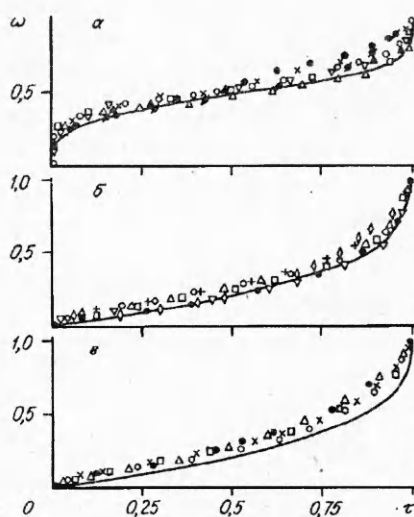


Рис. 5

жения и показав непротиворечивость уравнения состояния для параметра поврежденности материала $\dot{\omega} = \varphi(\sigma)\psi(\omega)$ в этих координатах, удалось связать параметр повреждаемости ω с измеряемыми в эксперименте величинами ε , ε_* и тем самым снять произвол в определении коэффициентов уравнений.

Методика определения характеристик материала. Обсуждение результатов. С учетом проведенного обоснования уравнения повреждаемости в форме уравнения состояния и связи параметра повреждаемости с измеряемыми в эксперименте величинами $\omega = \varepsilon/\varepsilon_*$ укажем единую методику нахождения функциональных зависимостей и констант определяющих уравнений ползучести и повреждаемости, а также соответствующую аппроксимацию эквивалентных напряжений на примере сплава АК4-1Т.

Методика по форме практически ничем не отличается от изложенной в [12, 13]. Показатель m характеризует разупрочнение материала и находится по конечному участку экспериментальной единой кривой после точки перегиба для материалов с упрочнением. Для разупрочняющихся материалов ($\alpha = 0$) при определении m используются экспериментальные данные во всем диапазоне изменения параметра ω . Действительно, интегрируя уравнение повреждаемости (6) при фиксированных значениях напряжений σ_k и температуры от некоторых текущих значений ω , τ до разрушения $\omega = \tau = 1$, получим соотношение

$$(1 - \omega)^{m+1} = (m + 1)\varphi(\sigma_k, T)(1 - \tau),$$

представляющее в двойных логарифмических координатах $\ln(1 - \omega) - \ln(1 - \tau)$ уравнение прямой, по ее наклону находится коэффициент m , зависящий от среднего значения величин m_k для нескольких значений $\sigma = \sigma_k$.

Параметр α , характеризующий упрочнение, определяется по данным из начального участка единой кривой до точки перехода на установившуюся стадию ползучести. В этом случае, как и в деформационной теории упрочнения, принимаем $d\omega/dt = \varphi(\sigma, T)/\omega^\alpha$, тогда, интегрируя последнее от нулевого состояния до текущих значений ω , t и логарифмируя, получим уравнение прямой

$$(\alpha + 1)\ln\omega = \ln[(\alpha + 1)\varphi(\sigma_k, T)] + \ln t.$$

По ее наклону для нескольких значений σ_k (или сразу по усредненным значениям единой кривой с использованием метода наименьших квадратов) находится коэффициент α .

Выбор функции $\varphi(\sigma)$ определяется кривой длительной прочности. Для исследуемого сплава АК4-1Т экспериментальные точки в двойных логарифмических координатах $\ln\sigma_i - \ln t_i$ имеют монотонный завал от области вязких разрушений в область хрупких разрушений с уменьшением напряжений и вполне удовлетворительно укладываются на прямые линии в координатах $\sigma_i^2 - \ln t_i$ (растяжение — кружки, сжатие — треугольники, чистое кручение — крестики), поэтому функцию $\varphi(\sigma)$ естественно аппроксимировать зависимостью $\varphi(\sigma) = B_\omega(\exp\beta\sigma^2 - 1)$. Единица введена для корректного описания в области процесса деформирования при малых напряжениях. В силу того что $\varphi(\sigma)$ — монотонная функция, а изменения экспериментальных значений $A_*(\sigma)$ носят монотонный характер (в соответствии с (10) $A_* = f(\sigma)/\varphi(\sigma)$), функция $f(\sigma)$ должна иметь тот же вид $f(\sigma) = B_A(\exp\zeta\sigma^2 - 1)$. Для материалов с немонотонной зависимостью работы рассеяния (деформаций) при разрушении от напряжений аппроксимация экспериментальных данных возможна введением различных функций f и φ [18], а также на базе полиномов.

Коэффициенты уравнений B_A , B_ω , ζ , β (аналогично коэффициент B и показатель ползучести n по степенной зависимости) определяются

Вид испытаний	α	m	$B_A \cdot 10^9, \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{с}}$	$B_\omega \cdot 10^9, \frac{1}{\text{с}}$	$\xi \cdot 10^4, \text{МПа}^{-2}$	$\beta \cdot 10^4, \text{МПа}^{-2}$
Растяжение	0	2	3,0	2,014	2,09	1,611
Кручение	0	2	3,5	1,789	2,286	1,767
Сжатие	0	5	8,608	0,84575	1,515	1,2906

общепринятыми методами исходя из экспериментальных данных мощности диссипации и скорости накопления повреждений в начальный момент $W = W_0$, $\omega = \omega_0$ или на установившемся участке кривой ползучести, если он есть.

В экспериментах на сжатие образцы до разрушения не доводились, и поэтому не удается построить экспериментальную кривую $\omega - \tau$, так как неизвестны A_* , t_* для каждого $\sigma_k = \text{const}$. Тем не менее из приведенных экспериментальных кривых можно с точностью до разброса экспериментальных данных (см. рис. 4) определить среднее время разрушения $t_*(\sigma_k)$ и, следовательно, рассчитать $\tau = t/t_{*k}$. Преобразовывая первое уравнение из (6), получим соотношение

$$W = f(\sigma_k)/(1 - \tau)^{m/(m+1)},$$

которое в двойных логарифмических координатах $\ln(1 - \tau) - \ln W$ представляет уравнение прямой с тангенсом угла наклона $m/(m+1)$. Таким образом находится m_k для каждого фиксированного σ_k . Среднее значение из m_k дает искомое m . В остальном определение коэффициентов уравнений не отличается от изложенного выше.

На рис. 2—4 и 5, б, в сплошными линиями показаны расчетные значения $A(t)$, $\omega(\tau)$ по зависимости (14) для сплава АК4-1Т с характеристиками, приведенными в таблице.

На рис. 6, а в правом верхнем углу штриховой линией показан расчетный контур эквивалентного напряжения σ_3 для уравнения ползучести в энергетических терминах, определенный для $W_0 = 5,69 \cdot 10^{-6} \text{ МДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{с}) = \text{const}$. Аппроксимация для плоского напряженного состояния проведена с использованием зависимости

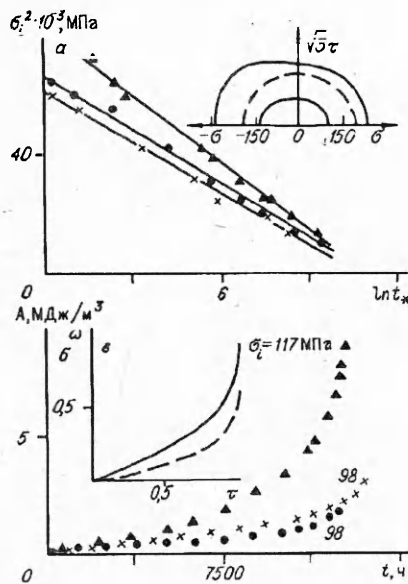
$$(15) \quad \sigma_3 = B(1 + a \sin 3\xi + b \sin^2 3\xi)\sigma_1,$$

где $B = 1,0645$, $a = -4,764 \cdot 10^{-3}$, $b = -0,652 \cdot 10^{-1}$ — константы, полученные из обработки трех независимых “паспортных” серий экспериментов на одноосную ползучесть при постоянных напряжениях на растяжение, сжатие и сдвиг (чистое кручение) [20]; ξ — угол вида напряженного состояния. Здесь же сплошными линиями приведены два расчетных контура σ_{3*} для времени разрушения $t_{-1} = 10$ ч и $t_{-2} = 10^4$ ч. Аппроксимация проводилась также по зависимости (15) с константами

$$B_* = 1,0302, a_* = -0,1154, b_* = -0,1446,$$

определяемыми из кривых длительной прочности на растяжение, сжатие, кручение.

Следует отметить, что экспериментальные данные по длительной прочности на растяжение, сжатие, кручение в полулогарифмических координатах $\sigma_{3*}^2 - \ln t_*$ группируются плотным пучком вокруг прямой. Это позволяет говорить, что для исследований при плоском напряженном состоянии наряду с общеизвестными σ_{3*} [21] можно использовать аппроксимацию σ_{3*} по зависимости (15), определяемую по “паспортным” экспериментам [20]. Для материалов с разными свойствами на растяжение и сжатие в общем случае при сложном напряженном состоянии аппроксимация σ_{3*} , по-видимому, должна зависеть от всех трех инвариантов тензора напряжений, включая и первый инвариант [15, 22].



Р и с. 6

На рис. 6, б представлены экспериментальные диаграммы $A = A(t)$ при постоянных напряжениях на растяжение (кружки), сжатие (треугольники) и чистое кручение (крестики) практически одинаковой длительности до разрушения, из которых видно, что в отличие от сплава 3В сплав АК4-1Т на чистое кручение сопротивляется деформированию слабее растяжения. Это отчетливо прослеживается также на графике длительной прочности (рис. 6, а): прямая для чистого кручения располагается ниже, чем прямые для растяжения и сжатия. Объяснить это можно опять же анизотропией свойств ползучести материала.

На рис. 6, в для сравнения в приведенных координатах показан характер накопления повреждений при растяжении (сплошная линия) и сжатии (штриховая). Видно, что процессы накопления повреждений при растяжении и сжатии существенно различаются. Связано это с

разной сопротивляемостью материала в условиях ползучести, так как для одинаково работающих на растяжение и сжатие материалов, например для сплава Д16Т, стали 45, процесс накопления повреждений одинаков во всей области растяжения—кручения—сжатия как при стационарных, так и при ступенчато изменяющихся нагрузках [19].

Аналогичный вывод о существенном различии механизмов накопления повреждений при растяжении и сжатии сделан в [23, 24] путем измерения динамического модуля упругости.

На рис. 1 и 5, а сплошными и штриховыми линиями приведены в качестве иллюстрации также расчетные значения $A = A(t)$ и $\omega = \omega(\tau)$ для сплава 3В с упрочнением на растяжение, полученные по зависимостям (14) с использованием степенной зависимости

$$f(\sigma) = B_A(\sigma)^n, \varphi(\sigma) = B_\omega(\sigma)^r.$$

Коэффициенты уравнений рассчитаны в соответствии с данными [12]:

$$B_A = 1,4604 \cdot 10^{-151} \frac{\text{МДж}}{\text{м}^3 \cdot \text{МПа}^n \cdot \text{с}}, B_\omega = 2,2054 \cdot 10^{-153} \frac{1}{\text{МПа}^r \cdot \text{с}},$$

$$\alpha = 2,5, m = 7, n = r = 51,79.$$

Таким образом, сведя общую систему определяющих уравнений ползучести и длительной прочности к системе уравнений с одинаковым показателем разупрочнения в обоих уравнениях для произвольного напряженно-деформированного состояния, удалось связать параметр повреждаемости с измеряемыми в эксперименте величинами и тем самым снять произвол в нахождении констант уравнений.

Сведение экспериментальных диаграмм ползучести в единую кривую в нормированных координатах $\omega = A/A_*$, $\tau = t/t_*$ при стационарных и ступенчато меняющихся режимах нагружения для представителей материалов с явно выраженной анизотропией свойств ползучести, у которых A_* с уменьшением напряженного состояния остается постоянной или понижается, позволило обосновать запись кинетического уравнения повреждаемости в форме уравнения состояния и дать единую методику нахождения коэффициентов уравнений.

Вполне удовлетворительное совпадение расчетных значений с экспериментальными в широком интервале длительностей позволяет говорить о

возможности использования определяющих уравнений ползучести и повреждаемости с одним скалярным параметром повреждаемости и одинаковыми показателями упрочнения — разупрочнения в обоих уравнениях, а также подтверждает правильность методики определения характеристик материала.

Для более детального анализа предложенных соотношений необходимы дополнительные целенаправленные эксперименты по ползучести и длительной прочности при сложном напряженном состоянии, а также их апробация в широком температурном диапазоне и при неоднородном напряженном состоянии.

Авторы признательны О.В. Соснину за постоянное внимание к работе и полезные обсуждения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (93-013-16506).

ЛИТЕРАТУРА

1. Шестериков С.А., Локощенко А.М. Ползучесть и длительная прочность металлов // Итоги науки и техники. Сер. Механика деформируемого твердого тела / ВИНТИ. — 1980. — Т. 13.
2. Шестериков С.А. Длительная прочность и ползучесть материалов // Тр. ЦКТИ. — 1986. — № 230.
3. Ильюшин И.А. Об одной теории длительной прочности // Изв. АН СССР. МТТ. — 1967. — № 3.
4. Астафьев В.И. Описание процесса разрушения в условиях ползучести // Изв. АН СССР. МТТ. — 1986. — № 4.
5. Локощенко А.М. Исследование длительной прочности при сложном напряженном состоянии с помощью кинетического подхода // Тр. ЦКТИ. — 1986. — № 230.
6. Локощенко А.М., Шестериков С.А. К проблеме оценки длительной прочности при ступенчатом нагружении // ПМТФ. — 1982. — № 2.
7. Астафьев В.И. К вопросу о поврежденности и критериях разрушения при ползучести // Пробл. прочности. — 1983. — № 3.
8. Ахмадеев Н.Х. Континуальная модель повреждаемой среды. — Уфа, 1988. — (Препр. / УрО АН СССР, Отдел физики БНЦ).
9. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966.
10. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Методика описания ползучести и длительной прочности при чистом растяжении // ПМТФ. — 1980. — № 3.
11. Ковпак В.И. Прогнозирование длительной работоспособности металлических материалов в условиях ползучести. — Киев, 1990. — (Препр. / АН УССР, Ин-т проблем прочности).
12. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. — Новосибирск: Ин-т гидродинамики СО АН СССР, 1986.
13. Соснин О.В., Шокало И.К. Энергетический вариант теории ползучести и длительной прочности. Сообщение 2. Ползучесть и разрушение материалов с начальным упрочнением // Пробл. прочности. — 1974. — № 1.
14. Никитенко А.Ф., Соснин О.В., Торшенин Н.Г., Шокало И.К. О прочностных особенностях титановых сплавов // ПМТФ. — 1976. — № 6.
15. Рубанов В.В. Экспериментальное обоснование определяющих уравнений ползучести металлических материалов с различными свойствами на растяжение и сжатие: Автореф. дис. ... физ.-мат. наук. — Новосибирск, 1986.
16. Стрижало В.А., Зинченко А.И. Влияние низкой температуры на циклическую ползучесть и долговечность алюминиевых сплавов при малоциклового усталости // Пробл. прочности. — 1975. — № 4.
17. Стрижало В.А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоциклового нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наук. думка, 1978.
18. Локощенко А.М., Шестериков С.А. Модель длительной прочности с немонотонной зависимостью деформации при разрушении от напряжения // ПМТФ. — 1982. — № 1.
19. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. К обоснованию энергетического варианта теории ползучести. Основные гипотезы и их экспериментальная проверка. Сообщение 1 // Пробл. прочности. — 1976. — № 11.

20. Цвелодуб И.Ю. О некоторых подходах к описанию установившейся ползучести в сложных средах // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики. — Новосибирск, 1976. — Вып. 25.
21. Локощенко А.М. Длительная прочность при сложном напряженном состоянии // Пробл. прочности. — 1983. — № 8.
22. Горев Б.В., Никитенко А.Ф. К ползучести материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие // Динамика сплошной среды: Сб. науч. тр. / АН СССР, Сиб. отд-ние, Ин-т гидродинамики. — Новосибирск, 1970. — Вып. 6.
23. Лепин Г.Ф., Горпинич В.Ф., Будаев С.И. Некоторые особенности влияния знака нагрузки на развитие повреждений в металлических материалах при длительном деформировании // Механика: Сб. — Куйбышев, 1976. — Вып. 9.
24. Лепин Г.Ф., Горпинич В.Ф., Нестеренко В.М. Исследование кинетики развития повреждаемости металлов и сплавов в процессе ползучести // 8-я Всесоюз. конф. по физике прочности и пластичности металлов и сплавов: Тез. докл. — Куйбышев, 1976.

г. Новосибирск

Поступила 2/VII 1993 г.

УДК 621.762

С.Н. Кульков, С.Ф. Гнусов, Л.М. Молчунова

ФОРМИРОВАНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ КОМПОЗИТА ПРИ ЕГО ДИНАМИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

В [1] показано, что использование в твердых сплавах структурно-неустойчивой связующей фазы позволяет значительно улучшить их вязкость и пластичность при сохранении уровня прочности в условиях квазистатического нагружения. Проведенные исследования позволяют выделить ряд основных моментов поведения материала при нагружении: в композите формируются внутренние напряжения сжатия и изменяется структура вследствие фазового превращения в матрице под действием внешнего нагружения, что обеспечивает формоизменение в любом малом объеме материала с одновременным его упрочнением.

Физический смысл применения структурно-неустойчивой связующей фазы в композитах состоит в понижении масштаба структурного уровня пластической деформации за счет формирования в процессе неоднородного нагружения микроструктурного состояния связующей фазы. К таким материалам, согласно [1], могут быть отнесены сплавы TiC — TiNi, WC — NiAl, WC — сталь Г13 и др. По-видимому, эти эффекты будут сохраняться и в условиях динамического нагружения, обеспечивая высокие механические свойства композита.

Цель настоящей работы — изучение макро- и микроструктуры твердого сплава WC — сталь Г13 со стабильным и метастабильным состоянием матрицы после динамического нагружения. Нагружение осуществлялось ударом шарового элемента, изготовленного из этого сплава, о плиту из алюминиевого сплава со скоростями 700—2000 м/с.

В случае стабильного состояния связующей фазы ударное нагружение приводит к разрушению шарового элемента, осколки которого остаются в преграде и частично выносятся из нее. Если матрица находится в метастабильном состоянии, динамическое воздействие не приводит к нарушению сплошности материала ударника, при равных скоростях соударения меняется лишь форма метаемого элемента. По изменению геометрических размеров метаемого тела, согласно [2], можно рассчитать динамический предел текучести

© С.Н. Кульков, С.Ф. Гнусов, Л.М. Молчунова, 1994