Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Б. В. Горев, И. А. Банщикова, К описанию процесса ползучести и разрушения упрочняющихся материалов по кинетическим уравнениям со скалярным параметром повреждённости, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2009, выпуск 2(), 90–98

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu732>

Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 3.89.197.203

26 апреля 2023 г., 15:13:35

УДК 539.376

К ОПИСАНИЮ ПРОЦЕССА ПОЛЗУЧЕСТИ И РАЗРУШЕНИЯ УПРОЧНЯЮЩИХСЯ МАТЕРИАЛОВ ПО КИНЕТИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЯМ СО СКАЛЯРНЫМ ПАРАМЕТРОМ ПОВРЕЖДЁННОСТИ

Б. В. Горев, И. А. Банщикова

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН,
630090, Новосибирск, пр-т Академика Лаврентьева, 15.

E-mails: GorevBV@ya.ru, binnan@ya.ru

Экспериментально и теоретически обосновывается принципиальная возможность использования кинетических уравнений со скалярным параметром повреждённости для описания процессов деформирования материалов с упрочнением вплоть до разрушения. При определении функциональных зависимостей кинетических уравнений ползучести и повреждаемости для материалов с непостоянной величиной предельной деформации при разрушении проверяется подобие исходных кривых ползучести, перестроенных в нормированных деформациях. Из экспериментально установленного подобия кривых ползучести параметр повреждённости в одноосном случае отождествляется с нормированной деформацией. На примере растяжения стержня иллюстрируется накопление повреждений в материале на стадии изготовления и эксплуатации деталей.

Ключевые слова: ползучесть, упрочняющиеся материалы, анизотропия, повреждённость, разрушение.

Введение. Применительно к технологическим задачам по обработке материалов давлением, в частности, по формообразованию корпусных элементов конструкций, показано, что исходный материал заготовки (листы, прокатанные плиты разных толщин) — существенно анизотропный с разными свойствами на растяжение и сжатие. Наиболее слабое направление в смысле сопротивления деформированию в условиях ползучести для плит — под углом 45° к нормали плиты, для листов — по нормали к листу [1, 2].

Деформационно-прочностные свойства конструкционных материалов зависят от уровня температуры, скорости нагружения (деформирования) и вида напряжённого состояния. При этом различие в поведении может быть не только количественным, но и качественным. При быстром нагружении материал может вести себя как изотропная среда, а при медленном нагружении проявляет и анизотропию, и различие в свойствах на растяжение, сжатие. Так, материалы при температурах сверхпластичности подчиняются «установившемуся» течению практически без упрочнения-разупрочнения вплоть до разрушения. При температурах, близких к температуре сверхпластичности, материал разупрочняется, установившаяся стадия практически отсутствует.

Для умеренных температур (температуры старения, эксплуатации и т. п.) лёгкие сплавы деформируются, как правило, с резко выраженной стадией упрочнения.

В работе [3] для материалов без упрочняющей стадии ползучести пока-

---

*Борис Васильевич Горев (д.т.н.), ведущий научный сотрудник, лаб. статической прочности.
Инна Анатольевна Банщикова (к.ф.-м.н.), старший научный сотрудник, лаб. статической прочности.*

зана возможность описания процессов деформирования вплоть до разрушения с использованием кинетических уравнений со скалярным параметром поврежденности, равным степени деформируемости материала $\omega = \varepsilon/\varepsilon^*$, $0 \leq \omega \leq 1$, $\varepsilon^* \neq \text{const}$. Установлено, что ниспадение на « $\sigma - \varepsilon$ » диаграмме с постоянной скоростью деформации $\dot{\varepsilon}_0$ начинается при деформациях, соответствующих переходу материала в третью — разупрочняющуюся стадию ползучести с той же величиной скорости деформации $\dot{\varepsilon}_0$ на установившемся участке при $\sigma = \text{const}$.

В настоящем сообщении обосновываются возможности описания процесса ползучести и разрушения материалов с упрочнением по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности.

1. Особенности деформационно-прочностного поведения листовых материалов с упрочнением. На примерах алюминиевого сплава АК4-1Т и титановых сплавов 17 и 3В иллюстрируется характер деформационно-прочностного поведения легких сплавов при умеренных температурах.

На рис. 1, а и 1, б приведены диаграммы ползучести ε^c (далее при изложении индекс «с» опущен) при растяжении и сжатии круглых образцов (соответственно светлые и темные точки), изготовленных из плиты авиационного алюминиевого сплава АК4-1Т толщиной 45 мм, в поперечном направлении к прокату под действием постоянного напряжения при температуре старения 195°C. Сравнение результатов экспериментов при одних и тех же напряжениях (указаны цифрами на рис. 1, а: 1 — $\sigma = 280$ МПа, $\varepsilon^* = 8,9\%$, 2 — $\sigma = 310$ МПа, $\varepsilon^* = 9,7\%$, 3 — $\sigma = 315$ МПа, $\varepsilon^* = 7,8\%$, 4 — $\sigma = 320$ МПа, $\varepsilon^* = 7,3\%$, 5 — $\sigma = 200$ МПа, $\varepsilon^* = 13\%$, 6 — $\sigma = 250$ МПа, $\varepsilon^* = 20\%$; на рис. 1, б: 1 — $\sigma = 290$ МПа, 2 — $\sigma = 300$ МПа, 3 — $\sigma = 310$ МПа, 4 — $\sigma = 320$ МПа, 5 — $\sigma = 340$ МПа, 6 — $\sigma = 345$ МПа) показывает, что при сжатии указанный сплав существенно прочнее, чем при растяжении. Для сопоставления на рис. 1, а квадратами приведены результаты двух экспериментов в продольном направлении, которые иллюстрируют анизотропию в плоскости листа.

На рис. 1, с и 1, д представлены аналогичные экспериментальные данные на растяжение до разрушения под действием постоянного напряжения для образцов, вырезанных по нормали к плите и под углом 45° к нормали в поперечном направлении соответственно, из которых видно, что сплав наряду с разносопротивляемостью обладает существенной анизотропией. Характер деформирования в плоскости плиты (продольное, поперечное направления) не только количественно, но и качественно отличается от деформирования по нормали к плите и под углом 45° к нормали плиты. Для поперечного направления деформации при разрушении ε^* практически одинаковы, для направления вдоль проката (квадраты) — выше, чем для поперечного направления, а для направлений по нормали к плите и под углом 45° к нормали плиты — уменьшаются с увеличением длительности эксперимента (деформации при разрушении обозначены на графиках звездочками). Самое слабое направление в смысле сопротивления деформированию — под углом 45° к нормали плиты, и значит, сплав не ортотропен.

На рис. 2 приведены результаты экспериментов с постоянной скоростью деформирования для различных направлений плиты (а) и на ползучесть при постоянном растягивающем напряжении титанового сплава 17 (плита толщиной 60 мм) при $T = 100^\circ\text{C}$ в направлении к нормали к плите (б).

Рис. 1. Диаграммы деформирования образцов из сплава АК4-1Т на растяжение и сжатие при постоянном напряжении для различных направлений (звёздочки — разрушение): а) растяжение в продольном и поперечном направлении; б) сжатие в поперечном направлении; в) растяжение по нормали; д) растяжение под углом 45° к нормали

Из приведённых на рис. 2, а результатов видно, что самое слабое направление сопротивления деформированию для титанового сплава — также под углом 45° к нормали. Ниспадение на кривых деформирования зависит от скорости деформации, при этом величины деформации соответствуют величинам при переходе в разупрочняющуюся (третью) стадию ползучести при постоянном напряжении (см. рис. 2, б).

На рис. 3 показаны результаты экспериментов на растяжение при постоянном напряжении для продольного направления (а) и при плоском напряжённом состоянии в области от растяжения до чистого кручения при постоянной интенсивности напряжений для поперечного направления (б) на титановом сплаве 3В (плита толщиной 20 мм) при комнатной температуре. Нами обработаны экспериментальные данные, проведенные под руководством О. В. Соснина [4].

Результаты экспериментов показывают, что удельная работа рассеяния при разрушении $A^* = \sigma \varepsilon^*$ и деформация ε^* существенно зависят от вида напряжённого состояния. Так, при чистом растяжении $A^* = \text{const}$, а в области

Рис. 2. Экспериментальные данные для титанового сплава 17: а — диаграммы на растяжение с постоянной скоростью деформирования; б — диаграммы ползучести при постоянных напряжениях

Рис. 3. Экспериментальные данные для титанового сплава ЗВ: а — диаграммы ползучести $A = A(t)$ при комнатной температуре на растяжение; б — диаграммы ползучести при плоском напряжённом состоянии; в — «единая кривая» в нормированных координатах $\omega - \tau$, где $\omega = A/A^*$ ($A^* \neq \text{const}$), $\tau = t/t^*$

от растяжения до чистого кручения A^* возрастает при одной и той же величине интенсивности напряжений, и значит, эти результаты не могут быть описаны в рамках деформационного и энергетического критериев прочности.

Из представленных на рис. 2, 3 экспериментальных данных следует, что титановые сплавы также проявляют сильную анизотропию. При одном и том же растягивающем напряжении время до разрушения продольных образцов из сплава ЗВ в 30 раз меньше времени до разрушения поперечных образцов.

2. Определяющие уравнения для материалов с упрочнением. Для многих материалов установлено геометрическое подобие кривых ползучести («единая кривая») при постоянных напряжениях и температурах в нормированных переменных $\omega = \varepsilon/\varepsilon^*$, $\tau = t/t^*$ (т.е. в отнесённых текущих значениях деформаций ε и времени t соответственно к деформациям ε^* и времени t^* в момент разрушения) [5–8].

Наглядно это можно продемонстрировать на титановом сплаве ЗВ, используемом в судостроении для изготовления корпусных деталей судов. Фор-

моообразование деталей и их эксплуатация осуществляются в холодном состоянии. Подобие кривых ползучести на растяжение иллюстрируется результатами при $\sigma = \text{const}$, представленными на рис. 3, а и 3, с в одинаковых обозначениях (точки) для указанного сплава. При комнатной температуре сплав имеет все три стадии ползучести и практически постоянную величину энергии рассеяния $A = \int_0^{\varepsilon^*} \sigma d\varepsilon$ при разрушении на растяжение.

На рис. 3, b приведены результаты экспериментов на том же сплаве при плоском напряжённом состоянии в области от чистого растяжения до чистого кручения при постоянной интенсивности напряжений $\sigma_i = \text{const}$. Из представленных диаграмм видно, что $A^*(\sigma_i) \neq \text{const}$, и тем не менее экспериментальные данные в нормированных координатах $\omega - \tau$ ($\omega = A/A^* \equiv \varepsilon_i/\varepsilon_i^*$ и $\tau = t/t^*$) достаточно хорошо укладываются в «единую кривую» (см. рис. 3, с), подтверждая тем самым геометрическое подобие нормированных кривых ползучести $A/A^* - t$ и запись уравнения повреждаемости в виде $d\omega/dt = \varphi(\sigma_{\varepsilon^*}, T)\psi(\omega)$, в котором σ_{ε^*} — эквивалентное напряжение с одинаковой длительностью до разрушения. То есть σ_{ε^*} есть функция напряженных состояний, при которых в стационарных условиях нагружения происходит равное накопление повреждений и, следовательно, длительность до разрушения одинакова при $\omega = 1$.

Аналогичный формальный приём перестроения исходных экспериментальных данных деформирования в нормированных координатах использовался в [9] при обосновании уравнения кривой усталости при малоцикловом нагружении исходя из экспериментально установленного подобия кривых циклической ползучести в координатах $\omega = \varepsilon/\varepsilon^*$, $\tau = N/N_*$ (N_* — число циклов до разрушения).

Показано [4], что контур $\sigma_i = \text{const}$ (приведён на рис. 3, b в виде знаков соответствующих экспериментов на растяжение, кручение и совместное действие растяжения с кручением) является контуром эквивалентного напряжения в смысле равенства постоянной мощности рассеяния работы на установившемся участке кривой ползучести $W_{\min} = dA/dt = \sigma_{kl}\dot{\varepsilon}_{kl}^c = \text{const}$, причём отмечается вполне удовлетворительное подтверждение ассоциированного закона течения для этого контура ($\dot{\varepsilon}_{kl}^c = \lambda \partial \sigma_i / \partial \sigma_{kl}$). Таким образом, эквивалентным напряжением в смысле интенсивности процесса ползучести по энергетической мере W для указанного сплава является интенсивность напряжений $\sigma_{\varepsilon} \equiv \sigma_i$. Вместе с тем следует заметить, что эквивалентное напряжение σ_{ε^*} с одинаковой длительностью до разрушения в уравнении повреждаемости не совпадает с эквивалентным напряжением в уравнении ползучести ($\sigma_{\varepsilon^*} \neq \sigma_{\varepsilon}$) из-за существенной разницы в длительностях до разрушения при $\sigma_{\varepsilon} = \text{const}$. Так, для рассматриваемого сплава при кручении длительность до разрушения более чем в 3,5 раза больше длительности до разрушения на растяжении при $\sigma_{\varepsilon} = \sigma_i = \text{const}$.

Из подобия нормированных по оси ординат экспериментальных кривых ползучести определяющие уравнения конкретизированы в виде соотношений с одинаковыми функциями для параметра повреждённости ω в уравнениях ползучести и повреждаемости [6]:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma_{\varepsilon}, T)}{\omega^{\alpha}(1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{\varphi(\sigma_{\varepsilon^*}, T)}{\omega^{\alpha}(1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \frac{d\varepsilon_{ij}}{dt} = \lambda \frac{\partial \sigma_{\varepsilon}}{\partial \sigma_{ij}}, \quad 0 \leq \omega \leq 1.$$

Для случая одноосного растяжения $\sigma = \text{const}$ в нормированных координатах $\omega = A/A^* \equiv \varepsilon/\varepsilon^*$, $\tau = t/t_*$ имеем для параметра повреждённости уравнение «единой кривой» в виде $(1 - \omega^{(\alpha+1)})^{m+1} = 1 - \tau$, $0 \leq \tau \leq 1$. То есть для одноосного напряжённого состояния скалярный параметр повреждённости ω есть величина показателя деформируемости материала (нормированная деформация $\omega = \varepsilon/\varepsilon^*$) для любой зависимости предельной деформации ε^* от напряжения.

3. Оценка времени разрушения при растяжении стержней. На рис. 4 приведены результаты численных расчётов по деформированию круглых стержней на одноосное растяжение из титанового сплава 3В при комнатной температуре применительно к оценке исчерпания ресурса на стадии изготовления деталей и оценке остаточного эксплуатационного ресурса после процесса формообразования по зависимостям

$$\frac{dA}{dt} = \frac{B_A \sigma^n}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{B_\omega \sigma^k}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m},$$

со следующими характеристиками на растяжение: $\alpha = 2,5$; $m = 7$; $n = k = 51,8$; $B_A = 1,46 \cdot 10^{-151} \text{ МПа}^{(1-n)} \cdot \text{с}^{-1}$; $B_\omega = 2,205 \cdot 10^{-153} \text{ МПа}^{-k} \cdot \text{с}^{-1}$.

На рис. 3, а и 3, с сплошными линиями показана аппроксимация исходных экспериментальных данных. Накопление деформаций и повреждений в стержнях для этих экспериментов при постоянном напряжении $\sigma = \text{const}$ приведено на рис. 4, а и 4, b (получено аналитически). Характер накопления повреждений в стержнях при постоянных скоростях деформаций, равных скоростям на «установившейся стадии» ползучести для тех же напряжений (см. рис. 4, а) показан на рис. 4, d.

Рис. 4. Результаты численных расчётов по деформированию круглых стержней из титанового сплава 3В при комнатной температуре: а — зависимость накопления деформаций ползучести при постоянных напряжениях; б — зависимость повреждений в материале при постоянных напряжениях; в — зависимость напряжений при деформировании с заданной кинематикой от деформаций; д — зависимость напряжений при деформировании с заданной кинематикой от повреждений

Расчёты показывают, что время накопления повреждений вплоть до начала разрушения при постоянной скорости деформирования больше почти в 30 раз в сравнении с деформированием под действием соответствующего постоянного напряжения. С точки зрения сохранения остаточного эксплуатационного ресурса на стадии изготовления формирование до необходимой величины деформации ε деталей, работающих в условиях, близких к растяжению с заданной кинематикой процесса деформирования, предпочтительнее, чем формообразование под действием постоянных напряжений.

Действительно, если растянуть стержень до величины деформации $\varepsilon \approx 4\%$ постоянным напряжением $\sigma = 638$ МПа (см. рис. 4, а), то величина повреждённости материала (на стадии изготовления) будет равной $\omega_{\text{pr}} = \varepsilon/\varepsilon_* = 0,4$ (рис. 4, б), и на эксплуатационный ресурс остаётся величина повреждённости материала $\omega_{\text{ex}}^1 = 1 - \omega_{\text{pr}} = 0,6$. Если же растягивать стержень до той же величины $\varepsilon \approx 4\%$ с постоянной скоростью $\dot{\varepsilon} = 4,18 \cdot 10^{-9} \text{ с}^{-1}$, соответствующей скорости ползучести на установившейся стадии ползучести при $\sigma = 638$ МПа (рис. 4, с), то на эксплуатационный ресурс остаётся величина $\omega_{\text{ex}}^2 = 1 - 0,3 = 0,7$ (рис. 4, д).

Разница в остаточной повреждённости материала после изготовления $\Delta\omega = \omega_{\text{ex}}^2 - \omega_{\text{ex}}^1 = 0,1$ для двух режимов формообразования может дать существенное отличие в длительности эксплуатации деталей изделий в холодном состоянии при низких уровнях растягивающих напряжений.

Анализ результатов с использованием кинетических уравнений со скалярным параметром повреждённости для материалов, у которых исходные кривые ползучести, перестроенные в нормированных деформациях при постоянных напряжениях и температурах, подобны, показывает, что количественным показателем живучести элементов конструкций является величина степени деформируемости материала при переходе в третью (разупрочняющуюся) стадию ползучести, характеризующуюся интенсивным накоплением микроповреждений и макроразрушений. Учёт анизотропии и разносопротивляемости свойств ползучести материала требует дополнительного математического моделирования для решения задач обработки материалов давлением.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 08-01-00168 и № 08-01-00060).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Горев Б. В., Масанов И. Ж. Особенности деформирования листовых конструкционных алюминиевых сплавов и плит в режимах ползучести // *Технология машиностроения*, 2009. — № 7. — С. 13–20.
2. Горев Б. В., Соснин О. В. Технологические процессы обработки металлов давлением в режимах ползучести и их моделирование / В сб.: *Современные металлические материалы и технологии СММТ'2009*: Тр. междунауч. конф. — СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2009. — С. 257–268.
3. Горев Б. В., Банищкова И. А. К описанию ниспадающего участка кривой деформирования «напряжение – деформация» по кинетическим уравнениям со скалярным параметром повреждённости // *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер.: Физ.-мат. науки*, 2008. — № 2 (17). — С. 110–117.
4. Никитенко А. Ф., Соснин О. В., Торшенин Н. Г., Шокало И. К. О прочностных особенностях титановых сплавов // *ПМТФ*, 1976. — № 6. — С. 118–122.
5. Горев Б. В. О подобии диаграмм ползучести / В сб.: *IX Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике*: Аннотация докладов. — Н. Новгород: ННГУ, 2006. — С. 28.
6. Горев Б. В., Клопотов И. Д. К описанию процесса ползучести и длительной прочно-

- сти по уравнениям с одним скалярным параметром повреждаемости // *ПМТФ*, 1994. — Т. 35, № 5. — С. 92–102.
7. Gorev B. V., Klopotov I. D., Lyubashevskaya I. V. Creep and damage behavior of AK4-1T and VT-9 alloy under different stress states // *Theoretical and Applied Fracture Mechanic*, 1998. — Vol. 29, No. 1. — P. 1–10.
  8. Горев Б. В., Клопотов И. Д., Захарова Т. Э. К описанию процесса ползучести и разрушения // *Физическая мезомеханика*, 2002. — Т. 5, № 2. — С. 17–22.
  9. Стрижало В. А. Циклическая прочность и ползучесть металлов при малоцикловом нагружении в условиях низких и высоких температур. — Киев: Наукова думка, 1978. — 238 с.

Поступила в редакцию 04/IX/2009;
в окончательном варианте — 30/IX/2009.

MSC: 74R20, 74C20

TO DESCRIPTION OF CREEP PROCESS AND FRACTURE OF HARDENING MATERIALS ACCORDING TO KINETIC EQUATIONS WITH SCALAR DAMAGE PARAMETER

B. V. Gorev, I. A. Bانشchikova

M. A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of RAS,
15, Lavrentyeva pr., Novosibirsk, 630090.

E-mails: GorevBV@ya.ru, bانشnan@ya.ru

Possibility of application of kinetic equations with scalar parameter damage for description of deformation processes of hardened materials until destruction is proved experimentally and theoretically. Similarity of creep of initial curves is reconstructed in relative (normalized) deformation coordinates in order to define the functional dependences of creep and damage kinetic equations for materials with variable value of limiting deformation at fracture. From experimentally established similarity of creep curves the damage parameter in uniaxial case is identified with normalized deformation. Accumulation of damages in the material at manufacturing and exploitation phases is illustrated on the example of rod stretching.

Key words: *creep, hardening material, damage, anisotropy, fracture.*

Original article submitted 04/IX/2009;
revision submitted 30/IX/2009.

Boris V. Gorev (Dr. Sci. (Techn.)), Leading Research Scientist, Lab. of Static Strength.
Inna A. Bانشchikova (Ph. D. (Phys. & Math.)), Senior Scientific Researcher, Lab. of Static Strength.