Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Б. В. Горев, И. А. Банщикова, К описанию ниспадающего участка кривой деформирования “напряжение–деформация” по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности, *Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки*, 2008, выпуск 2(), 110–117

DOI: <https://doi.org/10.14498/vsgtu621>

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: 54.174.149.18

26 апреля 2023 г., 18:12:34

УДК 539.376

К ОПИСАНИЮ НИСПАДАЮЩЕГО УЧАСТКА КРИВОЙ ДЕФОРМИРОВАНИЯ «НАПРЯЖЕНИЕ – ДЕФОРМАЦИЯ» ПО КИНЕТИЧЕСКИМ УРАВНЕНИЯМ СО СКАЛЯРНЫМ ПАРАМЕТРОМ ПОВРЕЖДЁННОСТИ

Б. В. Горев, И. А. Банщикова

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

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

Численными расчётами и экспериментально с использованием кинетических уравнений ползучести со скалярным параметром поврежденности установлено соответствие ниспадающей ветви « $\sigma - \varepsilon$ » диаграмм с постоянными скоростями деформаций разупрочняющемуся участку кривой ползучести при соответствующих постоянных напряжениях. Величины деформаций, соответствующие переходу в третью — разупрочняющуюся стадию ползучести, являются количественными показателями живучести применительно к формообразованию элементов конструкций.

Ключевые слова: ползучесть, сверхпластичность, поврежденность, разупрочнение, формообразование, живучесть.

Введение. Для аварийных ситуаций в непредусмотренных расчётами на прочность случаях, а также при обработке материалов давлением (ОМД) для изготовления деталей в режимах пластичности и ползучести, включая технологии, использующие явление сверхпластичности, проводится прогнозирование элементов конструкций на живучесть с целью сохранения остаточного эксплуатационного ресурса. Под живучестью элементов конструкции понимается способность сохранять эксплуатационные свойства на стадиях накопления повреждений и макроскопического разрушения. Наиболее актуальны расчёты на живучесть применительно к ответственным конструкциям повышенной прочности, работающим в условиях нестационарных температурно-силовых режимов эксплуатации.

Для этого необходимы расчётные данные полных диаграмм деформирования материалов с ниспадающим участком кривой — стадией разупрочнения, предшествующей разрушению. Разупрочняющаяся стадия характеризуется интенсивным накоплением повреждений в материале и падением сопротивления деформированию.

Применительно к хрупкому разрушению материалов в холодном состоянии проблема живучести отражена во многих работах С. Д. Волкова и его учеников. Заменой физических уравнений связи между напряжениями и деформациями, используемых в теории упругости и пластичности, функциями сопротивления материалов, определяемыми экспериментально на круглых образцах с узкой кольцевой проточкой (т.е. с наличием концентрации напряжений в элементе образцов), получены полностью равновесные диа-

Горев Борис Васильевич — ведущий научный сотрудник лаборатории статической прочности ИГиЛ СО РАН, д.т.н.

Банщикова Инна Анатольевна — старший научный сотрудник лаборатории статической прочности ИГиЛ СО РАН, к.ф.-м.н.

граммы напряжений на растяжение, кручение (сдвиг), одноосное и объёмное сжатие, спадающие до нуля после перехода через максимум [1–3]. При этом в испытаниях существенной являлась имитация жёсткости системы нагружения при активной деформации [2]. Хотя приближенная форма кусочно-линейной аппроксимации функций сопротивления в физических уравнениях и не обеспечивает должного совпадения с экспериментальными данными, однако может быть полезной для оценки условий устойчивости сопротивления материала разрушению и позволяет качественно оценить многие аспекты деформирования и разрушения элементов конструкций из материалов с наличием ниспадающего участка на « $\sigma - \varepsilon$ » диаграмме.

Применительно к технологическим задачам, когда в силу вступают температурный и временной факторы, показано, что скорость нагружения (деформации) существенно влияет на полную « $\sigma - \varepsilon$ » диаграмму деформирования, включая ниспадающую ветвь диаграммы [4].

В этом направлении актуальна работа по анализу расслоения диаграмм с различными заданными скоростями деформирования на растяжение вследствие ползучести с учётом разупрочнения [5] с использованием структурной модели среды стержневого типа, базирующейся на энергетическом подходе накопления повреждённости в локальном элементе [6].

Целью настоящей работы является описание в пределах упругой области полных кривых деформирования при растяжении и кручении сплошных круглых образцов с заданной скоростью деформации с использованием кинетических уравнений ползучести и повреждаемости для конечных деформаций применительно к формообразованию деталей.

В производстве современных изделий машиностроительного профиля широко используются высокопрочные и, следовательно, малопластичные труднодеформируемые сплавы. Для конструкционных сплавов на основе алюминия и титана показано, что медленные температурно-скоростные режимы деформирования ОМД за счёт развиваемых во времени необратимых деформаций ползучести, включая режимы сверхпластичности и близкие к ним, со скоростями деформаций порядка $\dot{\varepsilon} = 10^{-3} \text{ сек}^{-1}$ и меньше, более благоприятны в сравнении с традиционными квазистатическими режимами со скоростями порядка процентов в секунду. Процесс нагружения с такими скоростями не выходит за пределы упругой области, «вневременные» пластические деформации отсутствуют ($\varepsilon^p \equiv 0$), деформирование при изменении нагрузки не делится на активную и пассивные части, что позволяет существенно упростить построение соответствующих определяющих уравнений и их использование при решении прикладных задач.

Медленный температурно-скоростной режим деформирования в условиях ползучести (минуты, часы) даёт существенное снижение усилий формообразования, сохраняет эксплуатационный ресурс на стадии изготовления, позволяет управлять процессом формообразования и контролировать его. Проигрыш во времени на стадии изготовления даёт выигрыш в качестве и ресурсе изготавливаемой детали, причём по некоторым прочностным параметрам выигрыш достигает десятикратных величин по сравнению с традиционными методами ОМД (гибкой впередвижку, выколоткой по шаблону, дробеударной обработкой, многопереходной штамповкой).

Отсутствие пластических деформаций при формообразовании, как пра-

вило, приводит к меньшей повреждённости материала и увеличению показателя деформируемости (относительной степени деформации). В условиях, близких к сверхпластичности при $T > 0,5T_{pl}$, даже без подготовки ультрамелкозернистой структуры предельная деформация на момент разрушения ε^* выше по сравнению с деформацией ε^* при «мгновенном» упруго-пластическом деформировании.

1. Режимы, близкие к сверхпластичности. На рис. 1, а в качестве иллюстраций приведены « $\sigma - \varepsilon$ » диаграммы деформирования титанового сплава ВТ-20 на растяжение (пруток диаметром 44 мм в исходном состоянии) при температуре сверхпластичности 800 °С. Сплав деформируется при этой температуре под действием постоянных напряжений $\sigma = \text{const}$ практически без каких-либо параметров упрочнения—разупрочнения вплоть до разрушения (см. рис. 1, б). Диаграмма 1 на рис. 1, а соответствует «мгновенной» упругопластической диаграмме, снятой при средней скорости деформации $\dot{\varepsilon} \approx 10^{-1} \text{ с}^{-1}$, когда можно считать, что деформаций ползучести нет ($\varepsilon^c \equiv 0$), величина деформации при разрушении порядка $\varepsilon^* \approx 0,3$. Все остальные диаграммы содержат в величине необратимой деформации составляющую деформации ползучести ε^c , зависящую от реального физического времени. На том же рисунке горизонтальная штриховая линия соответствует пределу упругости материала $\sigma_e = 110 \text{ МПа}$ и отделяет «вязкую» область, в которой необратимое деформирование осуществляется только за счёт деформаций ползучести ($\varepsilon^H \equiv \varepsilon^c$), от «вязкопластической». Диаграммы 2 и 3, расположенные между упругопластической диаграммой и штриховой линией, относятся к деформированию в режиме вязкопластичности. Во всех диаграммах 4–6, расположенных ниже штриховой линии, пластических деформаций нет, диаграммы довольно быстро выходят на горизонтальную асимптоту. Деформации при разрушении составляют величины порядка $\varepsilon^* \approx 1,0 \div 1,3$.

Рис. 1. Диаграммы деформирования титанового сплава в режимах вязкопластичности и близких к сверхпластичности с различными скоростями деформаций на растяжение (а), диаграммы ползучести на растяжение при постоянных напряжениях и аппроксимация по степенной зависимости — сплошные линии (б)

При деформациях порядка $\varepsilon \approx 0,6 \div 0,7$ на диаграммах наблюдается падение напряжений с ростом деформаций (ниспадающий участок), которые соответствуют переходу в III (разупрочняющуюся) стадию ползучести (см. рис. 1, б) процесса деформирования при постоянных напряжениях. Сплошными линиями на рис. 1, а и 1, б приведены расчётные данные по степенной зависимости $\dot{\varepsilon}^c = B\sigma^n$ без учёта разупрочнения с характеристиками: $B = 1,03 \times 10^{-13}(\text{МПа})^{-n}\text{с}^{-1}$, $n = 3$, модуль упругости $E = 20 \text{ ГПа}$.

На диаграмме 7 крестиками в качестве иллюстрации показаны три цикла «нагрузка – разгрузка», которые повторяют друг друга, подтверждая тем самым запись определяющего уравнения в виде $\dot{\varepsilon}^c = \varphi(\sigma, T)$ без каких-либо параметров упрочнения–разупрочнения, при этом для описания процесса деформирования с постоянной скоростью деформации нет необходимости отслеживать, идёт ли активный процесс или процесс разгрузки (уменьшение напряжений). В вязкопластической области (см. на диаграмме 2 точку B) приходится следить за изменением нагрузки и использовать соотношения, зависящие от того, активный идёт процесс или пассивный.

С уменьшением скорости деформации диаграммы « $\sigma - \varepsilon$ » выходят на горизонтальные асимптоты и становятся похожими на диаграммы деформирования идеально-пластического материала, и лишь перед разрушением наблюдается участок ниспадающей ветви на кривой деформирования.

Действительно, пусть процесс деформирования осуществляется с постоянной скоростью полной деформации $\dot{\varepsilon} = V = \text{const}$. Тогда из выражения $\varepsilon = \varepsilon^e + \varepsilon^c$ (где $\varepsilon^e = \sigma/E$ – упругая составляющая, E – модуль упругости материала) следует $V = d\sigma/(E dt) + d\varepsilon^c/dt$. Подставляя $d\sigma/dt = V d\sigma/d\varepsilon$, получим $d\sigma/d\varepsilon = E(1 - \varphi(\sigma, T)/V)$. С ростом напряжения при деформировании с постоянной скоростью V увеличивается скорость деформации ползучести $\eta = d\varepsilon^c/dt$, при некотором его значении производная $d\sigma/d\varepsilon$ обратится в нуль, т. е. при активном нагружении, достигнув уровня напряжения, при котором скорость деформаций ползучести $\eta = \varphi(\sigma, T)$ сравнивается со скоростью полной деформации $\eta = \dot{\varepsilon} = V$, диаграмма « $\sigma - \varepsilon$ » выходит на горизонтальный уровень. Чем меньше заданная скорость деформирования $\dot{\varepsilon} = V = \text{const}$, тем при меньшем значении напряжения диаграмма выйдет на горизонтальный уровень. Сплошными линиями на рис. 1, б показан расчёт по степенной зависимости с использованием характеристик «установившейся» ползучести.

Отсюда вывод: для таких материалов, у которых процесс ползучести практически линейный во времени, напряжённо-деформированное состояние (НДС) в элементах конструкций будет зависеть от скорости деформирования (нагружения). И другой очевидный вывод: чтобы получать от материала максимальную деформативность при формообразовании и сохранить эксплуатационный ресурс на стадии изготовления, процесс следует вести так, чтобы отсутствовала пластическая деформация ($\varepsilon^p \equiv 0$), т. е. в режиме ползучести, не выходя по напряжениям из упругой области ($\sigma < \sigma_e$).

Аналогичные результаты получены и для другого вида испытаний – на чистое кручение круглых образцов. Известно, что сдвиговые характеристики являются базовыми при формообразовании деталей. Для достижения конечных деформаций на кручение испытывались сплошные круглые образцы без кольцевой проточки (исключая концентрацию напряжений), так как в экспериментах с однородным НДС на тонкостенных образцах степени деформа-

ций достигаются не более 7–8% вследствие геометрической потери устойчивости образцов.

На рис. 2, а представлены результаты экспериментов на растяжение для сплава АМГ–6М при температуре сверхпластичности 450 °С (пруток диаметром 45 мм в состоянии поставки), сплошной линией — аппроксимация по степенной зависимости. Образцы вырезались из прутка вдоль оси (тёмные точки) под углом 45° к оси прутка (ромбики). Треугольниками показаны эксперименты на чистое кручение сплошных образцов с той же величиной интенсивности напряжений в характеристической точке (ХТ) [7] (в точке $\hat{r} = \frac{3}{4}R$, R — радиус образца). Следует отметить, что материал является изотропным практически без каких-либо эффектов упрочнения—разупрочнения вплоть до разрушения (разрушение отмечено звёздочками). Величины интенсивности напряжений в ХТ: $\hat{\sigma}_i = 19,6; 14,7; 12,25; 9,82; 7,5$ МПа (диаграммы 1–5 соответственно); $\hat{\sigma}_i = 3\sqrt{3}M/(2\pi R^3)$, где M — действующий внешний момент.

На рис. 2, б показаны экспериментальные (точки) и расчётные (линии) значения кручения сплошного образца с постоянной скоростью угла закручивания $\dot{\theta}$. Скорость задавалась такой, чтобы напряжения в образце не превосходили предела упругости материала. Видно, что незначительный ниспадающий участок наблюдается перед самым разрушением. Расчёт проводился методом Рунге—Кутты с разбиением радиуса образца на 31 интервал (показан тонкой сплошной линией) с использованием следующих характеристик: $B = 5,13 \cdot 10^{-9} (\text{МПа})^{-n} \text{с}^{-1}$, $n = 4$, $E = 20$ ГПа. Линии 1–3 на рис. 2, в — эпюры напряжений по радиусу образца в различные моменты времени (линия 3 соответствует «установившемуся» распределению напряжений). Штриховой линией приведены результаты, рассчитанные по методу характеристического напряжения [7].

Аналогичный результат имеет место и для материалов с наличием первой стадии ползучести и какого-либо изотропного параметра упрочнения, позво-

Рис. 2. Диаграммы ползучести на растяжение при постоянном напряжении сплава АМГ–6М и аппроксимация по степенной зависимости (а), экспериментальные (точки) и расчётные (линии) значения кручения сплошного образца с постоянной скоростью угла закручивания (б), эпюры напряжений по радиусу образца в различные моменты времени (в)

ляющего наряду с установившимся участком кривой ползучести описывать первую (упрочняющуюся) стадию ползучести, например, $\dot{\varepsilon}^c = \varphi(\sigma, T)/(\varepsilon^c)^\alpha$. При снятии « $\sigma - \varepsilon$ » диаграммы с заданной скоростью $\dot{\varepsilon} = V = \text{const}$ кривая деформирования выходит на горизонтальный участок при некотором напряжении σ_0^c , соответствующем скорости деформации ползучести $\dot{\varepsilon}_0^c$ на установившемся участке в эксперименте на ползучесть при $\sigma_0 = \text{const}$ со скоростью общей деформации, равной $\dot{\varepsilon} = V = \dot{\varepsilon}_0^c$ [4].

2. Режим ползучести. Учёт разупрочняющейся (III стадии) ползучести проиллюстрируем на примере сплава АК4-1Т при $T = 250^\circ\text{C}$ с различными постоянными скоростями угла закручивания сплошных круглых образцов.

На рис. 3, а представлены экспериментальные значения работы рассеяния при ползучести $\hat{A} = \hat{\sigma}_i \cdot \hat{\varepsilon}_i$ в ХТ, полученные при испытаниях на кручение сплошных образцов сплава при различных напряжениях. Следует отметить, что с уменьшением интенсивности напряжений σ_i величина интенсивности предельных деформаций уменьшается. Эксперименты обрабатывались по зависимостям с одинаковыми функциями для параметра повреждённости в уравнениях ползучести и повреждаемости [8]:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{B_A \sigma_i^{n+1}}{(1 - \omega)^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{B_\omega \sigma_i^k}{(1 - \omega)^m}, \quad 0 \leq \omega \leq 1 \quad (1)$$

со следующими значениями параметров: $B_A = 2,79 \cdot 10^{-40} \text{ МПа}^{-n} \text{с}^{-1}$, $n = 15$, $m = 2$, $B_\omega = 3,39 \cdot 10^{-31} (\text{МПа})^{-k} \text{с}^{-1}$, $k = 11,5$, $G = 17 \text{ ГПа}$.

На рис. 3, б приведены экспериментальные (точки) и расчётные (сплошные линии) значения крутящего момента для двух значений скорости погонного угла закручивания $\dot{\theta} = 1,14 \cdot 10^{-2}$; $1,08 \cdot 10^{-3} \text{ рад/м}\cdot\text{с}$ (кривые I, II соответственно). Сплошные линии — расчёт, полученный интегрированием

Рис. 3. Экспериментальные значения работы рассеяния в ХТ (точки) кручения сплошных образцов из сплава АК4 при постоянных напряжениях и аппроксимация (линии) по кинетическим уравнениям ползучести со скалярным параметром повреждённости, символом «*» обозначено разрушение (а), экспериментальные и расчётные значения крутящего момента для двух значений (кривые I, II) скорости погонного угла закручивания (б), эпюры касательного напряжения по радиусу образца в различные моменты времени для эксперимента II (в)

системы дифференциальных уравнений (1) методом Рунге—Кутты с разбиением сечения образца по радиусу на 31 интервал, штриховые линии соответствуют расчёту крутящего момента (интенсивности напряжений в ХТ) по методу характеристического напряжения. На рис. 3, в показано распределение касательного напряжения по радиусу вала в моменты времени $t = 50; 10^2; 1,5 \cdot 10^2; 3 \cdot 10^2; 9 \cdot 10^2; 1,5 \cdot 10^3$ (кривые 1–6) для $\dot{\theta} = 1,08 \cdot 10^{-3}$ рад/(м·с).

Следует отметить, что сплав АК4-1Т при температуре старения 195 °С охрупчивается, т. е. деформации при разрушении уменьшаются с увеличением времени старения (рис. 3, а), установившаяся стадия ползучести отсутствует. Видно, что диаграммы « $\sigma_i - \varepsilon_i$ » (рис. 3, б) после упругого участка нагружения дают сразу ниспадающую ветвь на кривой деформирования (без горизонтальной асимптотики), причём чем медленнее процесс (кривая II), тем меньше предельная величина деформаций (отмечено звёздочками в эксперименте, см. внешние координаты на рис. 3, б, пересчитанные для ХТ). И как вывод: для данного сплава формообразование деталей следует проводить в быстром упруго-пластическом режиме с последующей релаксацией при этой температуре. В медленном температурно-скоростном режиме данный сплав рекомендуется формообразовывать при температуре отжига или выше — при температуре сверхпластичности.

Для материалов с непостоянной величиной предельной деформации при разрушении ($\varepsilon^* \neq \text{const}$) с учётом экспериментально установленного подобия кривых ползучести в нормированных координатах при постоянных напряжениях [8] из соотношения (1) нетрудно получить, что скалярный параметр повреждённости для одноосного случая есть величина степени деформируемости материала (нормированная деформация): $\omega \equiv \varepsilon/\varepsilon^*$.

Таким образом, из экспериментально и численно установленного соответствия ниспадающей ветви « $\sigma - \varepsilon$ » диаграммы III разупрочняющейся стадии ползучести с интенсивным накоплением повреждений следует, что величина нормированной деформации перехода в III стадию ползучести может являться количественным показателем для оценки живучести элементов конструкций.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проекты № 08-01-00168 и № 07-01-12043-офи).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Дубровина, Г. И. К теории накопления повреждений [Текст] / Г. И. Дубровина, Ю. П. Соковнин, Ю. П. Гуськов, П. С. Соколов, С. Д. Волков // Пробл. прочности. — 1975. — № 12. — С. 21–24.
2. Волков, С. Д. Экспериментальные функции сопротивления легированной стали при растяжении и кручении [Текст] / С. Д. Волков, Ю. П. Гуськов, В. И. Кривоспицкая и др. // Пробл. прочности. — 1979. — № 1. — С. 3–6.
3. Волков, С. Д. К механике разрушения. Сообщение 2 [Текст] / С. Д. Волков, Г. И. Дубровина // Пробл. прочности. — 1980. — № 9. — С. 41–45.
4. Горев, Б. В. О соответствии ниспадающей ветви кривой деформирования «напряжение — деформация» разупрочняющемуся участку кривой ползучести [Текст] / Б. В. Горев, И. А. Банщикова / Механика микронеоднородных материалов и разрушение: Тез. докладов V-ой Всерос. конф. — Екатеринбург, 2008. — С. 94.
5. Радченко, В. П. Математическое моделирование влияния скорости нагружения на полную диаграмму растяжения материала в условиях ползучести [Текст] / В. П. Радченко, Е. В. Небогина, Е. А. Андреева / Матем. моделирование и краевые задачи: Тр. V-ой Всерос. научн. конф. — Самара: СамГТУ, 2008. — Ч. 1. — С. 250–255. — ISBN 978-5-7964-1087-5.

6. Радченко, В. П. Реологическое деформирование и разрушение материалов и элементов конструкций [Текст] / В. П. Радченко, Ю. А. Ерёмин. — М.: Машиностроение-1, 2004. — 264 с. — ISBN 5-94275-111-0.
7. Горев, Б. В. К оценке ползучести и длительной прочности элементов конструкций по методу характеристических параметров. Сообщение 1 [Текст] / Б. В. Горев // Пробл. прочности. — 1979. — № 4. — С. 30–36.
8. Gorev, B. V. Creep and damage behavior of AK4-1T and VT-9 alloy under different stress states [Text] / B. V. Gorev, I. D. Klopotov, I. V. Lyubashevskaya // Theoretical and Applied Fracture Mechanic. — 1998. — No. 29. — P. 1–10.

Поступила в редакцию 25/IX/2008;
в окончательном варианте — 25/IX/2008.

MSC: 74R20

TO THE DESCRIPTION OF SOFTENING STAGE OF “STRESS – STRAIN” DIAGRAM WITH SCALAR DAMAGE PARAMETER KINETIC EQUATIONS

B. V. Gorev, I. A. Banshchikova

M. A. Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of RAS,
630090, Novosibirsk, Lavrent'eva pr., 15

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

By performing numerical calculations and experimentally using kinetic creep equations with scalar damage parameter correspondence of the falling part of “ $\sigma - \varepsilon$ ” diagrams and constant velocities of deformations to softening part of creep curve at corresponding constant stresses was established. Values of deformations corresponding to transition into the third softening stage of creep, are the quantitative indicators of survivability during shaping of constructional elements.

Key words: creep, superplasticity, damage, softening, shaping, survivability.

Original article submitted 25/IX/2008;
revision submitted 25/IX/2008.

Gorev Boris Vasilievich, Dr. Sci. (Tech.), Senior Research Fellow of M. A. Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of RAS.

Banshchikova Inna Anatolievna, Ph.D. (Phis. & Math.), Senior Researcher of M. A. Lavrent'ev Institute of Hydrodynamics, Siberian Branch of RAS.