

УДК 539.4+539.376

ВАРИАНТ КИНЕТИЧЕСКИХ УРАВНЕНИЙ ПОЛЗУЧЕСТИ И ПОВРЕЖДАЕМОСТИ С ЭНЕРГЕТИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРОМ ПОВРЕЖДЕННОСТИ

© 2011 г.

И.В. Любашевская¹, Б.В. Горев¹, В.А. Панамарев²

¹Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск

²Сибирский государственный индустриальный университет, Новокузнецк

lbi@ngs.ru

Поступила в редакцию 24.08.2011

Экспериментально и теоретически обоснована принципиальная возможность использования кинетических уравнений ползучести и повреждаемости в энергетической форме вплоть до начала разрушения с монотонной и немонотонной зависимостью значения удельной работы диссипации на момент разрушения от вида напряженного состояния. Дана единая методика определения параметров функциональных зависимостей в кинетических уравнениях со скалярным параметром поврежденности, определяемым нормированной удельной работой диссипации. Проведена экспериментальная проверка адекватности моделей.

Ключевые слова: ползучесть, параметр поврежденности, энергия диссипации, разрушение, сжатие.

Описание процесса ползучести вплоть до разрушения с учетом поврежденности 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 эксплуатационного ресурса материала. Широко используемая концепция Ю.Н. Работнова [1] основана на гипотезе существования уравнения состояния, согласно которой в случае одноосного напряженного состояния скорость ползучести структурно-устойчивого материала в каждый момент времени зависит от величины приложенного напряжения, температуры и структурного состояния материала.

Как вариант кинетической теории ползучести Ю.Н. Работнова хорошо зарекомендовал себя энергетический вариант теории ползучести (ЭВТП) при описании процессов высокотемпературной ползучести [2, 3]. В основу ЭВТП принято предположение о том, что интенсивность процесса ползучести оценивается мощностью рассеяния энергии при необратимом деформировании, а мерой поврежденности материала является удельная работа диссипации. В этом случае процессы ползучести материала и накопления в нем повреждений рассматриваются как единый процесс.

При исследовании широкого ряда материалов не всегда наблюдается выполнение условия постоянства удельной работы диссипации в момент разрушения, а прослеживается сложная зависи-

мость этой величины и от вида напряженного состояния, и от продолжительности процесса деформирования $A^*(\sigma) = \text{const}$. В этом случае предлагается обобщить уравнения на случай пространственного напряженного состояния в энергетических терминах при условии градиентного закона течения со скалярным параметром поврежденности, что существенно упрощает их практическое использование:

$$\frac{dA}{dt} = \frac{f(\sigma_e, T)}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m}, \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{f(\sigma_e^*, T)}{\omega^\alpha (1 - \omega^{\alpha+1})^m},$$
$$\dot{\epsilon}_{kl} = \lambda \frac{\partial \sigma_e}{\partial \sigma_{kl}}, \quad A = \int_0^t \sigma_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} dt. \quad (1)$$

Возможность использования предложенных уравнений (1) экспериментально обоснована и реализована для ряда конструкционных материалов в условиях как одноосного (растяжение–сжатие), так и плоского напряженного (комбинация растяжения с кручением) состояний.

Полученные характеристики ползучести и повреждаемости могут быть использованы при решении прикладных задач для описания процессов формообразования элементов конструкций. Апробация предложенных определяющих соотношений при неоднородном напряженном состоянии проведена сравнением экспериментальных данных с расчетами на примерах простейших элементов конструкций (чистый изгиб балок и пластин, кручение валов и пластин, кручение с растяжением валов) [4] с учетом различия свойств пол-

зучести и повреждаемости на растяжение, сжатие и сдвиг. Характеристики материала на растяжение и сжатие очень часто имеют существенное различие, а построение «единой» кривой усложняется отсутствием разрушения в экспериментах на сжатие.

Получены новые экспериментальные данные на ползучесть при сжатии вплоть до разрушения. На рис. 1в представлен разрушенный при сжатии образец из Сп. 17 при $T = 450$ °С и напряжении 365 МПа, деформация до разрушения – 10%.

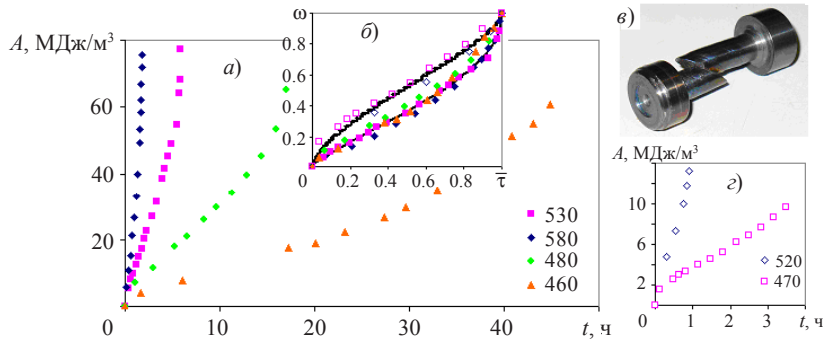


Рис. 1

На рис. 1 представлены кривые ползучести на сжатие (а), растяжение (с) сплава ЖС6У при $T = 925$ °С и «единые» кривые для растяжения и сжатия в нормированных координатах (б).

На рис. 2 точками представлены экспериментальные данные по ползучести титанового сплава ЗВ при комнатной температуре [5]: а – диаграммы ползучести при комнатной температуре на растяжение; б – диаграммы ползучести при плоском напряженном состоянии; в – «единая» кривая в нормированных координатах. Для различных видов напряженного состояния наблюдается изменение значения работы диссипации на момент разрушения, однако единая кривая в терминах $\omega - \bar{\tau}$, где $\omega = A/A^*$, $\bar{\tau} = t/t^*$, позволяет не

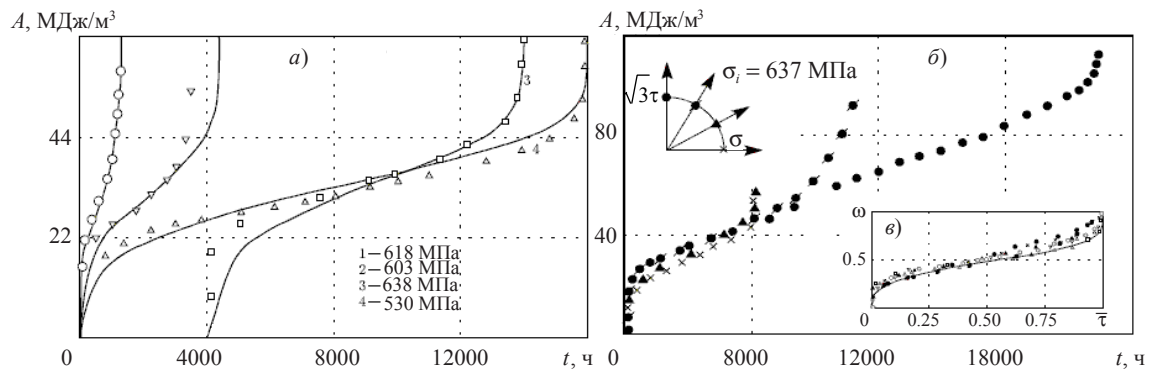


Рис. 2

только получить коэффициенты в аппроксимационных зависимостях (1), но и определить формальный прием построения экспериментальных кривых в нормированных координатах [6].

В случае неоднородного напряженного состояния использование энергетических параметров в определяющих соотношениях позволяет использовать подходы, основанные на понятиях обобщенных сил и обобщенных перемещений, интегрально описывающих поведение элементов конструкций [7].

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. М.: Наука, 1966.
2. Соснин О.В., Горев Б.В., Никитенко А.Ф. Энергетический вариант теории ползучести. Новосибирск: ИГиЛ СО АН СССР, 1986.
3. Соснин О.В., Никитенко А.Ф., Горев Б.В. // ПМТФ. 2010. Т. 51, №4. С. 188–197.
4. Горев Б.В., Банщикова И.А., Цвелодуб И.Ю. // ПМТФ. 2007. Т. 48, №5. С. 156–159.
5. Никитенко А.Ф., Соснин О.В., Торшенов Н.Г., Шокало И.К. // ПМТФ. 1976. №6. С. 118–122.
6. Горев Б.В., Клопотов И.Д. // ПМТФ. 1994. №5. С. 92–102.
7. Соснин О.В., Любашевская И.В., Новоселя И.В. // ПМТФ. 2010. Т. 51, №3. С. 137–146.

**THE VARIANT OF KINETIC EQUATIONS OF CREEP AND DAMAGE
WITH POWER DAMAGE PARAMETER**

I.V. Lyubashevskaya, B.V. Gorev, V.A. Panamarev

A possibility of using the kinetic equations of creep and damageability in the power form for the description of creep process up to the beginning of failure with monotonous and non-monotonous dependence of the value of the specific dissipation power at the moment of failure on the tension kind is experimentally and theoretically proved. A unified technique of determining the parameters of the functional dependences in the kinetic equations with scalar damage parameter, assigned normalized specific work of dissipation is given. The adequacy of the models is experimentally verified.

Keywords: creep, damage parameter, dissipation power, fracture, compression.