

ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОГЛОЩЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛЗУЧЕСТЬ

Анатолий Семенович ДЕМИДОВ родился в 1937 г. в городе Москве. Профессор МАИ. Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области проектирования и прочности двигателей летательных аппаратов. Автор более 50 научных работ.

Anatoly S. DEMIDOV, D.Sci., was born in 1937, in Moscow. He is a Professor at the MAI. His major research interests are in the fields of rocket engine design and strength. He had published over 50 technical papers.

Владимир Владимирович КАШЕЛКИН родился в 1937 г. в городе Москве. Начальник отдела ФГУП «Красная Звезда». Доктор технических наук, профессор. Основные научные интересы — в области прочности ядерных энергоустановок. Автор более 50 научных работ.

Vladimir V. KASHELKIN, D.Sci., was born in 1937, in Moscow. He is currently a Department Head at the Federal State Unitary Establishment «Krasnaya Zvezda». His major research interests are in the field of nuclear power plant strength. He has published more than 50 technical papers.

На основании анализа результатов циклических испытаний на ползучесть рассматриваются различные способы определения характеристик внутреннего трения конструкционных материалов. Предлагаемый способ определения коэффициента поглощения опирается на модель ползучести Андраде и численное значение соотношения напряжений в циклических испытаниях на ползучесть с неполной разгрузкой, когда отсутствуют как накопление, так и восстановление деформации.

1. В настоящее время для определения характеристик внутреннего трения наибольшее распространение получили два основных подхода. В одном случае определяется удельная энергия ΔW , рассеянная за цикл колебаний, в другом — неупругая деформации ϵ_n за цикл. По характеру зависимости ϵ_n от числа циклов нагружения (изменение деформации при прямоугольном цикле нагружения с полной разгрузкой показано на рис.1) выделяют следующие группы материалов [1]:

I — упрочняемые в процессе циклического нагружения в результате образования эффективных барьеров скольжения (технически чистые, отожженные металлы: никель, медь и др.; твердые растворы: сплав Д20, сталь 30Х10Г10 и др.);

II—III — упрочняемые пластическим деформированием (II) или дисперсными частицами (III) (аустенитные стали и некоторые конструкционные стали — 12Х18Н10Т, 0Х14АГ11М, 40Х, ХН35ВТ);

IV — деформационно-стареющие в процессе циклического нагружения (стали 30, 40, 60, 1Х13);

V — гетерогенные материалы с выраженной концентрацией напряжений около включений (чугуны, некоторые алюминиевые сплавы).

В справочнике [1] приведены также примеры графических результатов.

В связи с этим необходимо сделать два замечания:

1) предложенная классификация материалов является весьма приближенной и при практическом использовании требует серьезного уточнения;

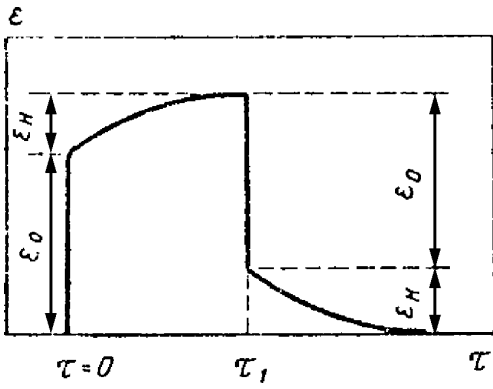


Рис. 1. Зависимость деформации от времени при наличии неупругости [1]

2) приведенная на рис. 1 схема из справочника [1] содержит принципиальную ошибку: деформации в периоды активного нагружения и разгрузки не могут быть равными по величине. Такое явление соответствовало бы поведению идеально упругого материала при отсутствии внутреннего трения. К сожалению, в справочнике отсутствуют ссылки на конкретные методики определения характеристик внутреннего трения по результатам измерения деформации ползучести.

2. В статье [2] уже рассматривался вопрос о возможности оценки характеристик внутреннего трения по величине восстанавливаемой деформации ползучести при циклическом нагружении. Результаты экспериментов по изучению деформации ползучести при циклическом нагружении образцов из нержавеющей стали были использованы для определения коэффициента поглощения материала. Следует учитывать, что всегда существующая неточность экспериментального определения любой из характеристик внутреннего трения в рассматриваемом случае имеет конкретную причину — невозможность четкого выделения из полной деформации ее упругой составляющей (рис. 2).

Будем считать, что упругая деформация ϵ_y (на рис. 1 обозначенная как ϵ_0), условно называемая

мгновенной, имеет ту же физическую природу, что и затухающая часть деформации ползучести. В модели, предложенной Андраде [3], деформация ползучести определяется как сумма β - и κ -течения:

$$\epsilon = \beta \tau^{1/3} + \kappa \tau, \quad (1)$$

где τ — время, а коэффициенты β и κ зависят от напряжения, температуры и свойств материала. Затухающая часть деформации ползучести в модели Андраде называется β -течением. Из рис. 1 следует,

что деформация ϵ_n должна восстанавливаться полностью при снятии нагрузки. Опыты с образцами из стали X18H10T, сплава нимоник 90, дюралюминиевого сплава Д16Т [4, 5, 6] показывают, что это не так. Имеются данные о том, что добиться почти полного восстановления деформации можно путем наложения колебаний [7], т. е. путем подведения энергии. Не восстанавливается при этом только деформация так называемого κ -течения (в модели Андраде). При выводе формулы для определения коэффициента поглощения была использована именно такая модель [2]. Считалось, что в сечении образца в период восстановления деформации действует некоторое затухающее напряжение σ^* , характер изменения которого по времени не исследован. Было сделано допущение, что в течение времени восстановления деформации вместо переменного напряжения σ^* действует некоторое постоянное, но по своему эффекту приводящее к тому же результату по деформации, что и неизвестное затухающее напряжение.

Для определения этого напряжения была использована формула плотности нормального распределения

$$\beta = \frac{k_\beta}{\mu_\beta \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\sigma - \sigma_y)^2}{2\mu_\beta^2}}, \quad (2)$$

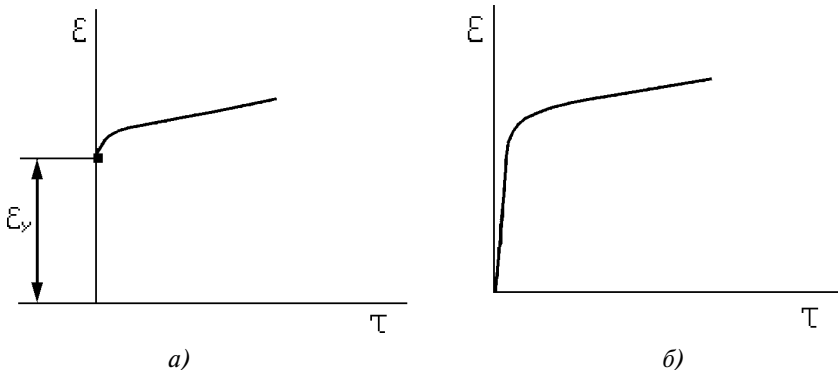


Рис. 2. Условная (а) и реальная (б) зависимости полной деформации от времени при нагружении

где σ — действующее напряжение; σ_y — предел упругости материала; μ_1 — функция температуры; μ_β — среднеквадратическое отклонение σ ; k_β — единичный коэффициент размерности.

Не останавливаясь здесь на методике определения величины этого эквивалентного напряжения (подробно она изложена в упомянутой статье [2]), отметим, что проверка косвенным путем данных по нержавеющей стали X18H10T при температуре 750 °С дала удовлетворительные результаты.

3. Рассмотрим еще один способ оценки коэффициента поглощения. При экспериментальном изучении циклической ползучести в диапазоне напряжений ($\sigma_{max} - \sigma_{min}$) с неполной разгрузкой образцов (рис. 3) было обнаружено, что при некотором минимальном напряжении цикла σ_{min} отсутствует как восстановление, так и накопление деформации (число циклов равнялось 10). Соотношения этих напряжений для различных материалов приведены в таблице. Для дюралюмина Д16Т и сплава нимоник 90 соотношение было определено непосредственно по данным из статей [5, 6], а для стали X18H10T подсчитано по эмпирической формуле из статьи [4].

Материал	Температура испытаний, °С	$\sigma_{min} / \sigma_{max}$
Дюралюмин Д16Т	250	0,633 [6]
Сталь X18H10T	750	0,689 [4]
Сплав нимоник 90	800	0,705 [5]

Эти данные позволяют считать, что при указанных минимальных напряжениях σ_{min} цикла внутренние силы трения, возникшие в результате деформации в период действия напряжения σ_{max} , уравниваются внешними силами.

Для определения количества рассеянной энергии снова обратимся к модели Андраде [7].

На рис. 4 показан график изменения коэффициента β в зависимости от напряжения для стали X18H10T при 750 °С. Считая, что процесс восстановления деформации ползучести может быть описан формулой

$$\epsilon_{вос} = \beta_{вос} \tau^{1/3} \quad (3)$$

и что функции β и $\beta_{вос}$ являются подобными, нанесем на тот же график кривую $\beta_{вос}$. Для этого используем значение $\beta_{вос} = 0,857 \cdot 10^{-4} \text{ ч}^{-1/3}$, соответствующее нулевому напряжению σ_{min} из статьи [2]. В соответствии с моделью Андраде площадь под кривой β отображает количество зерен, активированных процессом ползучести. Тогда будем считать, что площадь под кривой $\beta_{вос}$ соответствует количеству зерен, которые могли бы проявить свою упругую энергию в течение обратного процесса, то есть при восстановлении деформации ползучести. Однако, как показывают опыты, этому препятствуют силы внутреннего трения до тех пор, пока минимальное напряжение в цикле превышает то, которое определяется из соотношения в таблице. Для стали X18H10T это минимальное напряжение со-

Изменение напряжения по времени

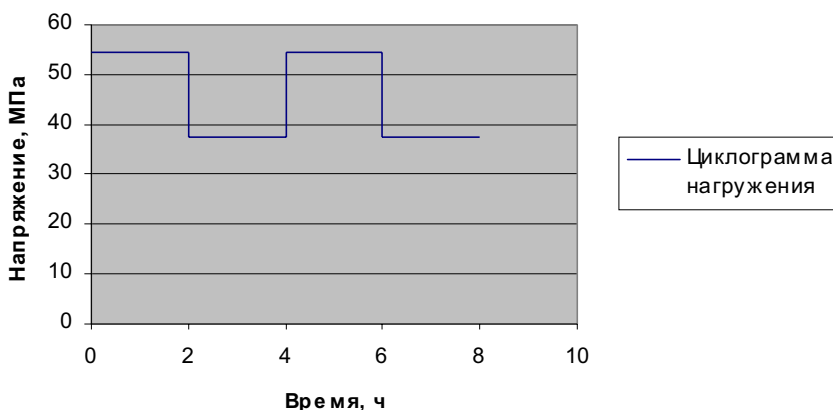


Рис. 3. Характер изменения напряжений при циклических испытаниях на ползучесть стали X18H10T

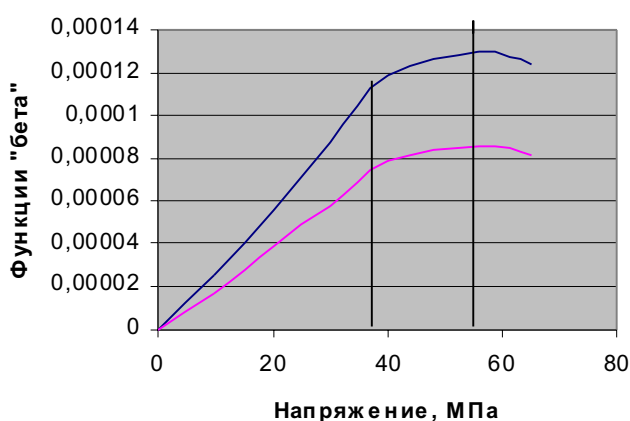


Рис. 4. Зависимость функции от напряжения при накоплении (верхняя кривая) и восстановлении (нижняя кривая) деформации ползучести

ставляет (максимальное напряжение при циклических испытаниях составляло 54,2 МПа):

$$\sigma_{\min} = 0,689 \sigma_{\max} = 37,3 \text{ МПа.}$$

Разница площадей под кривыми β и $\beta_{\text{вос}}$ пропорциональна количеству зерен, не участвующих в процессе восстановления ползучести. На том же графике (рис. 4) двумя ординатами при напряжениях 54,2 МПа и 37,3 МПа выделена зона минимальных напряжений, при которых восстановления деформации не происходит, поэтому коэффициент поглощения может быть определен как отношение упомянутой разницы площадей под кривыми β и $\beta_{\text{вос}}$ за вычетом зоны, ограниченной двумя ординатами, к площади под кривой β , ограниченной напряжениями от нуля до максимального (54,2 МПа). Такой способ подсчета привел к результату $\psi = 0,168$ (в статье [2] с использованием понятия об эквивалентном напряжении, действующем при восстановлении деформации ползучести, коэффициент поглощения оказался равным 0,238). Полученные высокие значения данной характеристики не противоречат известным из технической литературы. Например, в статье [8] было отмечено, что для магния АМг-5Б резкий рост (в десятки раз) логарифмического декремента наблюдается при температуре 350 °С, для сталей 1Х13 и ЭИ612 при 600 и 750 °С.

Выводы

1. На основе известных из литературы и авторских экспериментов выявлены некоторые новые возможности для определения характеристики

внутреннего трения конструкционных материалов (коэффициента поглощения материала).

2. С использованием модели ползучести Андраде и опорой на некоторые допущения предложен графоаналитический способ определения коэффициента поглощения материала (стали Х18Н10Т) по результатам проведенных ранее циклических испытаний на ползучесть.

3. Сопоставление полученного результата с известными из технической литературы и с полученными ранее авторскими позволяет считать его удовлетворительным, но требующим дополнительной проверки на различных конструкционных материалах.

4. Повышения точности определения коэффициента поглощения предложенным способом можно ожидать в связи с тем, что используются промежуточные характеристики, определяемые по циклическим испытаниям. Авторский опыт проведения таких испытаний позволяет считать, что число циклов должно быть не менее 8–10, а время каждого полцикла должно составлять примерно половину от протяженности первого участка ползучести. Это позволяет в значительной степени компенсировать отмеченный в пункте 2 недостаток — трудность разделения упругой и неупругой деформации.

Summary

Some techniques are described to reveal internal friction characteristics for constructional materials. These techniques are based on results of cyclic creep tests. An approach is suggested to evaluate absorption coefficient values using the Andrade creep model and the numerical value of stress relation for the cyclic creep tests with a partial unloading for which there are no accumulation and relaxation of deformations.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект 06-08-00483).

Библиографический список

1. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях: Справочник. — М.: Металлургия. 1991. — 248 с.
2. Демидов А.С. Об учете внутреннего трения при оценке восстанавливаемой деформации ползучести // Проблемы прочности. 1986. №6. С. 66-69.
3. Chalmers B. // J. Inst. Metals. 1937. 61. No.2. P. 130-132.
4. Демидов А.С. О восстановлении деформации ползучести стали Х18Н10Т при циклическом изме-

нении напряжения // Проблемы прочности. 1978. №4. С. 30-32.

5. *Видадь*. О циклической ползучести жаропрочных сплавов. // Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.-Л.: Госэнергоиздат. 1960. С. 156-175.

6. *Поспелов И.И.* Ползучесть металлов при циклически изменяющейся нагрузке // Бюл. науч. информ. ЦАГИ. 1963. Вып.233. 14 с.

7. *Кеннеди А. Дж.* Ползучесть и усталость в металлах. — М.: Металлургия. 1965. — 312 с.

8. *Новиков Н.В.* Исследование влияния высоких температур на рассеяние энергии в материале при колебаниях // Вопросы рассеяния энергии при колебаниях упругих систем. Киев: Гостехиздат УССР. 1962. С. 129-137.

МАИ, ФГУП «Красная звезда»

Статья поступила в редакцию 10.03.2008