

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ПОВРЕЖДЕННОСТИ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

ДЕМИДОВ Анатолий Семенович, профессор Московского авиационного института (государственного технического университета), д.т.н., профессор.
E-mail: demidov@mai.ru

DEMIDOV Anatoly S., D.Sci., currently a Professor at the MAI.
E-mail: demidov@mai.ru

КАШЕЛКИН Владимир Владимирович, начальник отдела ФГУП «Красная Звезда», д.т.н., профессор.
E-mail: re.entry@g23.relcom.ru

KASHELKIN Vladimir V., D.Sci., currently a Department Head at the Federal State Unitary Establishment «Krasnaya Zvezda».
E-mail: re.entry@g23.relcom.ru

Предлагается многостадийная модель поврежденности конструктивных элементов, по своему характеру увязанная с кривой ползучести материала и с изменением логарифмического декремента по времени. Выполнена численная оценка поврежденности на основе предлагаемой модели для консольных образцов из стали 12Х18Н10Т.

The structure elements multistaged model of damage is suggested. It is connected with the creep curve and dependence of logarithmic decrement on time. The numeral evaluation of damage on stainless steel samples with suggested model is made.

Ключевые слова: поврежденность, кривая ползучести, логарифмический декремент колебаний, консольные образцы.

Key words: damage, creep curve, logarithmic decrement of oscillations, cantilever samples.

Проблема оценки поврежденности конструктивных элементов и узлов является весьма актуальной с точки зрения оценки их остаточного ресурса. Поврежденность конструктивных элементов простой геометрической формы, в которых реализуется однородное напряженное состояние, Ю.Н. Работнов предложил учитывать с помощью введения в фактическую площадь сечения F функции ω [1]:

$$F = F_0(1 - \omega). \quad (1)$$

Здесь F_0 — начальная площадь поперечного сечения элемента, которая в процессе эксплуатации постепенно уменьшается за счет образования в этом сечении круглых плоских трещин радиуса r . Подразумевается, что теоретическое значение ω в процессе «жизни» элемента изменяется от нуля до 1. Практически проблема является более сложной, в связи с этим в настоящей работе исследовался вопрос о характере и форме функции ω , ее реальных начальных и конечных значениях и ее соотношении с другими характеристиками.

В инженерной практике для оценки остаточного ресурса в ряде случаев использовалась величина логарифмического декремента колебаний. Например, в статье [2] отмечалось, что контроль деталей по величине декремента сразу после их изготовления позволил уменьшить количество поступивших на сборку бракованных деталей в три раза. В связи с этим важным является вопрос о минимальных и максимальных значениях декремента δ в реальных материалах.

Обращаясь к формуле из книги [3]

$$\delta = \frac{1}{2} \ln(1 + \psi) \quad (2)$$

и полагая, что максимальное теоретическое значение коэффициента поглощения материала ψ должно быть равным 1, получаем соответствующее максимальное значение декремента 0,346. Заметим, что практически измеренные максимальные значения декрементов для металлических материалов лежат в области 0,2.

Минимальные значения декрементов, приведенные в статье [4], определялись на 15 новых образцах из стали 10X18H10T. Длина рабочего участка образца такого типа составляла 100 мм при диаметре $10 \pm 0,01$ мм. Последней технологической операцией при изготовлении образцов было чистовое точение, обеспечившее шероховатость поверхности рабочего участка не более 0,63 по шкале Ra. Среднее значение декремента, измеренное на этих образцах, равнялось $2,54 \cdot 10^{-4}$ при минимальном значении на одном из образцов $1,72 \cdot 10^{-4}$. Все измерения проводились на аппаратуре высокой точности — установке ELASTOMAT 1.024 фирмы Dr. Forster [4]. Сопоставление приведенных величин (начальных и конечных значений) показывает, что логарифмический декремент материала в процессе доведения образца до разрушения может возрасти в 1000 и более раз, но на практике его использованию для оценки остаточного ресурса мешают следующие обстоятельства:

1) аппаратура для высокой точности измерений является очень дорогой и отсутствует в большинстве исследовательских и заводских лабораторий;

2) начальное значение декремента существенно образом зависит не только от самого конструкционного материала, но также и от вида заготовки, формы детали, технологии ее изготовления, температуры испытаний и некоторых других факторов. Наши исследования, проведенные на более чем 100 образцах из магния, дюралюмина и нержавеющей стали, показали, что логарифмический декремент колебаний является весьма чувствитель-

ной характеристикой состояния материала, однако во многих случаях его изменения носят достаточно нестабильный характер.

Для оценки накопления поврежденности в процессе эксплуатации детали (образца) предлагается многостадийная модель. Полагая, что в этом процессе определяющими в отношении увеличения деформации ползучести и в отношении накопления поврежденности являются одни и те же структурные механизмы, соответствующие кривые (деформации и поврежденности) будем рассматривать как подобные. Очевидно, что деформацию ползучести ϵ (рис. 1) можно измерить, а поврежденность является понятием отвлеченным.

Поэтому характеристику поврежденности целесообразно «привязать» к характеристике измеряемой, т. е. к деформации ползучести. Заметим, что деформация ползучести в общем случае может рассматриваться как компонента, дающая свой вклад (естественно, множественный — от многих деталей) в характеристику зависимости интенсивности отказов λ от времени эксплуатации изделия (рис. 2). Эту характеристику можно также представить как результат дифференцирования по времени типичной кривой ползучести, и тогда она показывает скорость накопления поврежденности.

В книге [3] приведена таблица с результатами измерения логарифмических декрементов колебаний для широкого круга металлов при различных температурах, однако эти результаты не позволяют сделать обобщающих выводов относительно этих величин, так как отсутствуют указания на размеры, способы изготовления, исходное состояние образцов и другие важные, на наш взгляд, факторы влияния. Такое влияние отражено в результатах наших измерений декрементов на 14 образцах из стали

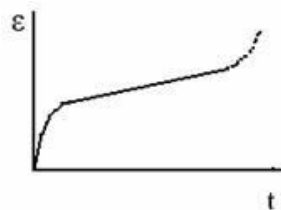


Рис. 1. Типичная кривая ползучести металла

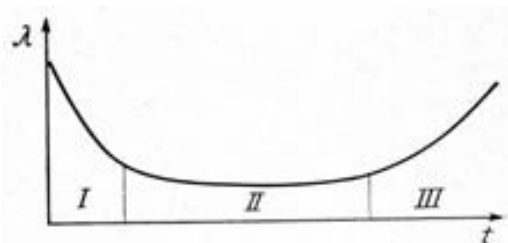


Рис. 2. Зависимость интенсивности отказов от времени эксплуатации изделия

12X18H10T при виброиспытаниях до разрушения. Консольные образцы имели габаритные размеры $240 \times 20 \times 2$ мм с длиной рабочего участка 160 мм. Они были изготовлены из листовой стали, и полученный при этом поверхностный наклеп сыграл, на наш взгляд, существенную роль в отношении неустойчивости величин декрементов. На восьми образцах декремент к моменту разрушения увеличился, причем на четырех весьма существенно (в три—шесть раз), на двух не изменился, на четырех уменьшился на величину от 25 до 50% (вместе с тем, как было отмечено ранее, точные измерения на образцах круглого сечения, на которых наклеп от обработки не имел практического значения, показали увеличение декремента к моменту разрушения в 1000 и более раз). На плоских образцах также во многих случаях экспериментально были получены кривые увеличения декремента, подобные типичным кривым ползучести или отдельным их участкам. Например, на рис. 3 показан характер нарастания логарифмического декремента при виброиспытаниях до разрушения для образца из стали 12X18H10T-ВД, построенный по данным таблицы из статьи [5]. Образец разрушился через 2 ч 15 мин после начала испытаний на вибростенде. В табл. 1 включено максимальное значение декремента (0,346), определенное, как отмечалось выше, теоретически.

Таблица 1

Относительное время t	0	0,444	0,888	1,0
Логарифмический декремент δ	0,0526	0,133	0,215	0,346
Поврежденность ω	0,138	0,348	0,563	0,907

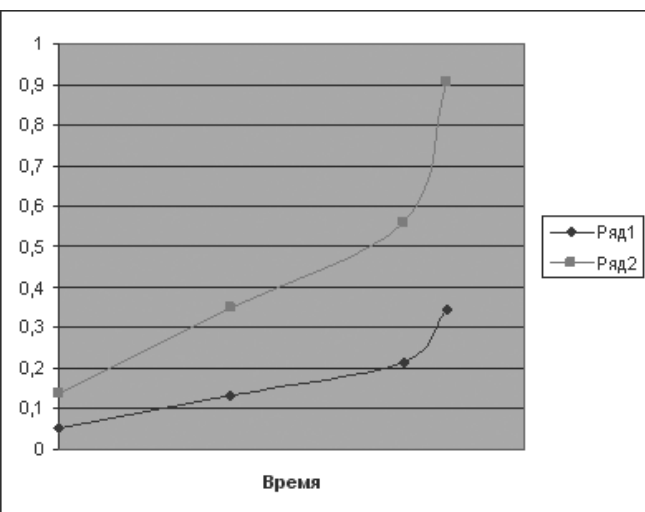


Рис. 3. Изменение логарифмического декремента колебаний δ (нижняя кривая) и параметра поврежденности ω (верхняя кривая) в зависимости от безразмерного времени

Для определения максимальной величины поврежденности ω обратимся снова к концепции Ю.Н. Работнова. В качестве модели разрушения материала он предложил принять следующую: трещины, образующиеся в процессе разрушения, имеют форму круга радиуса $D/2$ и лежат в плоскости, перпендикулярной направлению действия напряжения [1]. Развивая эту модель, заметим, что, поскольку наиболее плотному распределению круглых плоских трещин соответствует гексагональный закон расположения их центров, разрушение должно происходить в тот момент, когда наружные края соседних трещин сомкнутся. В этом случае максимальное значение поврежденности может быть определено как отношение площади круга радиуса $D/2$ к площади шестиугольника, в который круг вписан, т. е. получается, что $\omega_{\max} = 0,907$ (рис. 4).

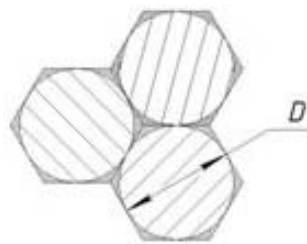


Рис. 4. К разработке модели поврежденности

Естественно, что такое определение поврежденности следует относить к материалу, для которого реализуется вязкое (транскристаллическое) разрушение, а диаметры плоских круглых трещин соответствуют средним диаметрам зерен. Тогда для хрупкого материала, в котором разрушение происходит по границам зерен, максимальное значение поврежденности можно определить как отношение периметра окружности с радиусом r к периметру описанного вокруг этой окружности шестиугольника, т. е. снова получаем $\omega_{\max} = 0,907$.

Определяем коэффициент связи между максимальной величиной поврежденности (по нашей модели) и максимальным теоретическим значением декремента:

$$K = \omega_{\max} / \delta_{\max} = 0,907 / 0,346 = 2,62. \quad (3)$$

Полагая, что при фиксированной нагрузке он сохраняет постоянное по времени значение, найдем величины поврежденности ω для остальных ячеек табл. 1 и строим соответствующую кривую на рис. 3. Высокое начальное значение декремента (0,0526) связано, на наш взгляд, с конкретным видом образца, который был изготовлен из тонколистового материала. Высокие значения декремента встречаются также в книге [3] (табл. 2).

Таблица 2

Материал	Температура	Логарифмический декремент
Сплав ЖС6-К	100°C	0,0312-0,04
Чугун Ч-1	20°C	0,0288-0,0415
Ниобий	1000°C	0,043

На рис. 5 и 6 показано изменение логарифмического декремента для двух стальных образцов с размерами 240×20×2 мм [6].

В настоящее время для определения характеристик внутреннего трения наибольшее распространение получили методы, основанные на определении значений удельной энергии, рассеянной за цикл колебаний, и неупругой деформации ϵ_n за прямоугольный цикл нагружения с полной разгрузкой [7]. В справочнике [7] предложена следующая классификация материалов (рис. 7):

I — упрочняемые в процессе циклического нагружения в результате образования эффективных

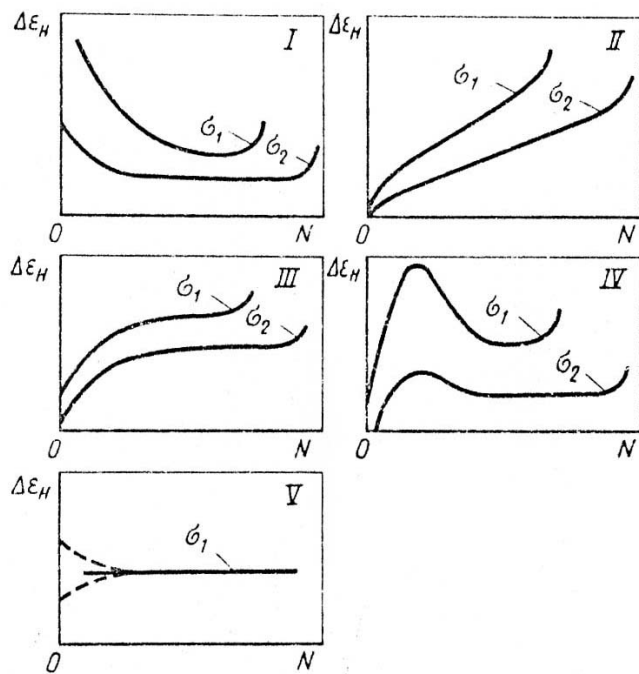


Рис. 7. Зависимости изменения неупругой деформации от числа циклов нагружения N для разных групп (I—V) материалов при двух уровнях напряжений ($\sigma_1 > \sigma_2$)

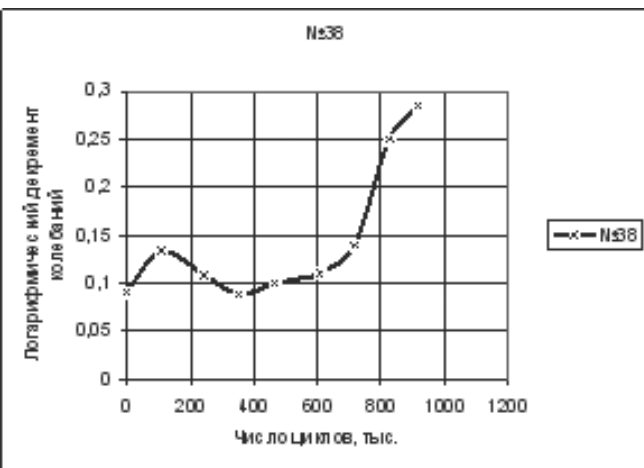


Рис. 5. Изменение логарифмического декремента δ в зависимости от наработки образца №38

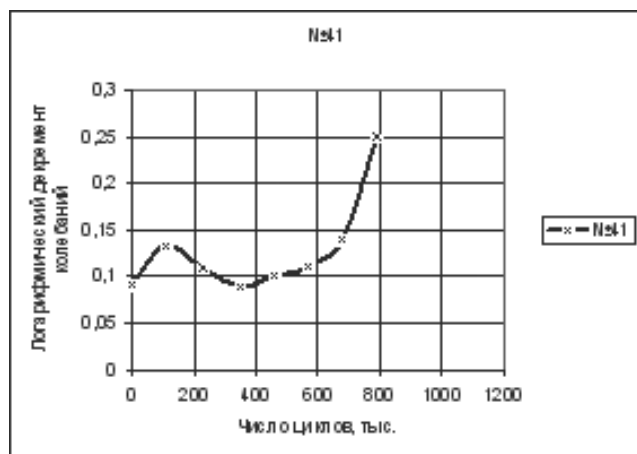


Рис. 6. Изменение логарифмического декремента δ в зависимости от наработки образца №41

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).

Классификация является приближенной и в каждом конкретном случае требует уточнения. Наши образцы № 38 и 41, изготовленные из стали 12Х18Н10Т, попадают в группу IV, для которой кривые накопления деформации по форме отличаются, особенно в начальный период, от типичных кривых ползучести (группа II). При использовании численного значения коэффициента K из формулы (3) величина максимальной расчетной поврежденности в момент, непосредственно предшествующий разрушению, для образца №38 оказывается равной 0,754, а для образца №41 — 0,655.

Выводы

Основной причиной существенного отличия полученных результатов от максимального значения поврежденности ($\omega_{max} = 0,907$) является то, что

измеренные непосредственно перед разрушением значения логарифмического декремента ($\delta = 0,25$ и $0,28$) и его максимальное теоретическое значение ($0,346$) значительно различаются. Это приводит к необходимости поиска путей уточнения величины коэффициента связи в диапазоне реально измеряемых значений логарифмического декремента.

Библиографический список

1. *Работнов Ю.Н.* Ползучесть элементов конструкций. — М.: Наука, 1966.
2. *Гурьев А.В., Савкин А.Н.* О влиянии изменения механических свойств образцов на статистический разброс усталостной долговечности // Статистические вопросы прочности и динамики машин: Тезисы докладов совещания. Рига. 1976. С.28.
3. *Хронин Д.В.* Колебания в двигателях летательных аппаратов. — М.: Машиностроение, 1980.

4. *Демидов А.С., Кашелкин В.В.* Выбор критериев для прогнозирования механических свойств конструкционных материалов и оценки остаточного ресурса конструкций // Вестник МАИ. 2004. Т.11. №1. С. 12—17.

5. *Демидов А.С., Кашелкин В.В.* Выбор критериев состояния конструкционных материалов с учетом особых физических полей // Вестник МАИ. 2000. Т.7. №2. С. 25—28.

6. *Демидов А.С., Кашелкин В.В.* Определение поврежденности и напряженного состояния балочных образцов по изменению собственной частоты и амплитуды колебаний // Вестник МАИ. 2009. Т.16. №3. С. 62—64.

7. Метод внутреннего трения в металловедческих исследованиях: Справочник. — М.: Металлургия, 1991.