

doi: 10.32620/oikit.2019.84.08

УДК 621.967.1

А. Г. Дибир, А. А. Кирпикин, Н. И. Пекельный

Экспериментальное определение энергетических усталостных характеристик сплава Д16Т (2024) методом свободных колебаний

*Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского
«Харьковский авиационный институт»*

В процессе исследования усталостных характеристик материалов, узлов, агрегатов и целых конструкций, а также прогнозирования долговечности необходимо знать энергетические усталостные характеристики различных материалов. К таким параметрам относятся α – параметр усталостного разрушения и W_{-1} – необратимо рассеянная энергия за цикл нагружения при напряжениях, равных пределу усталости на базе $N = 10^7$ циклов. Логарифмический декремент затухания показывает долю необратимо рассеянной энергии при затухании колебаний от общей упругой энергии колебаний. Доказано, что для металлов на усталостное разрушение идет постоянная величина «опасной» энергии. В данной работе описывается экспериментальное определение этих энергетических характеристик для одного из самых распространенных материалов в авиации Д16Т (2024). Путем измерения логарифмического декремента затухания δ в процессе усталостных испытаний находится рассеянная энергия за цикл нагружения. Испытания проводятся на двух различных уровнях нагружения. Это позволяет получить систему из двух уравнений для определения двух энергетических характеристик α и W_{-1} .

Ключевые слова: логарифмический декремент затухания, рассеянная энергия, энергетические усталостные характеристики

Прогнозирование усталостной долговечности самолетов и вертолетов является весьма актуальной задачей в процессе их эксплуатации по состоянию. При слежении за истощением ресурса по изменению диссипативных характеристик, в частности по росту логарифмического декремента затухания δ [1] необходимо оценить величину опасной энергии, идущей на усталостное разрушение [2, 3].

В [2] обосновано, что для металлов независимо от амплитуды и среднего уровня напряжений на усталостное разрушение идет постоянная величина так называемой опасной энергии $W_{оп}$:

$$W_{оп} = N_p \left[W_{сц} - W_{-1} \left(\frac{W_{сц}}{W_{-1}} \right)^\alpha \right] \quad (1)$$

где N_p – число циклов до разрушения; $W_{сц}$ – суммарная необратимо рассеянная энергия за цикл нагружения; W_{-1} – энергия, необратимо

рассеянная за цикл при напряжениях, равных пределу усталости (на базе $N_p = 10^7$ циклов); α – параметр усталостного разрушения.

Величину $W_{оп}$ в этой формуле следует понимать постоянной, как величину временного напряжения при растяжении σ_B , т. е. имеется естественный разброс порядка 5 – 10 %, которым можно пренебречь по сравнению с разбросом долговечности 200 – 250% относительно средней величины. Величина W_{-1} – это характеристика материала, которая с энергетической точки зрения соответствует пределу выносливости σ_{-1} . Параметр усталостного разрушения α – это энергетическая характеристика материала, которая выделяет опасную часть энергии из общего объема рассеянной в материале энергии. По своему характеру она подобна σ_B . Характеристикой конкретного образца является величина $W_{сц}$, в которой учтены все потери энергии за цикл нагружения.

Из зависимости (1) можно выделить опасную энергию, рассеянную за цикл нагружения,

$$W_{оц} = \frac{W_{оп}}{N_p} = W_{сц} - W_{-1} \left(\frac{W_{сц}}{W_{-1}} \right)^\alpha. \quad (2)$$

Разделив обе части на $W_{сц}$, можно получить следующее соотношение:

$$\frac{W_{оц}}{W_{сц}} = 1 - \frac{W_{-1}}{W_{сц}} \cdot \left(\frac{W_{сц}}{W_{-1}} \right)^\alpha = 1 - \left(\frac{W_{сц}}{W_{-1}} \right)^\beta, \quad (3)$$

где $\beta = 1 - \alpha$.

Величины W_{-1} , α , $W_{сц}$ можно получить из усталостного эксперимента при проведении испытаний образцов до разрушения при различных амплитудах напряжений и измерении логарифмического декремента затухания δ . Каждый образец должен испытываться при постоянном уровне напряжений.

Логарифмический декремент затухания δ через рассеянную энергию в образце и полную энергию упругих колебаний определяется следующим образом:

$$\delta = \frac{\Delta W_{сц}}{2W_{уц}}, \quad (4)$$

где $W_{уц}$ – энергия упругого деформирования образца за цикл нагружения; $\Delta W_{сц}$ – полная необратимо рассеянная энергия за цикл нагружения.

Отсюда

$$\Delta W_{\text{сц}} = 2W_{\text{уц}}\delta_{\text{сц}}, \quad (5)$$

где $\delta_{\text{сц}}$ – приращение суммарного логарифмического декремента затухания за цикл нагружения.

Это позволяет определить полную необратимо рассеянную энергию за цикл нагружения по величине приращения δ за цикл нагружения.

Аналогично можно записать:

$$\Delta W_{\text{оц}} = 2W_{\text{уц}}\delta_{\text{оц}},$$

где $\delta_{\text{оц}}$ – приращение опасного логарифмического декремента затухания за цикл нагружения.

Декремент затухания δ равен сумме начального δ_0 до усталостного нагружения и его приращения за счет опасной $\delta_{\text{оц}}$ и неопасной $\delta_{\text{н}}$ частей рассеянной энергии:

$$\delta = \delta_0 + \Delta\delta_{\text{с}} = \delta_0 + \delta_{\text{оц}} + \delta_{\text{н}}, \quad (6)$$

где $\Delta\delta_{\text{с}} = \delta_{\text{оц}} + \delta_{\text{н}}$ – полное приращение логарифмического декремента затухания δ .

Это позволяет в левой части соотношения (3) перейти от $W_{\text{оц}}$ к приращению логарифмического декремента затухания за цикл нагружения от опасной части рассеянной энергии $\delta_{\text{оц}}$, от $\Delta W_{\text{сц}}$ – к приращению логарифмического декремента затухания за цикл нагружения от суммарной рассеянной энергии $\Delta\delta_{\text{сц}}$.

После подстановки δ выражение (3) примет вид

$$\frac{\delta_{\text{оц}}}{\delta_{\text{сц}}} = 1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{\text{сц}}} \right)^{\beta}. \quad (7)$$

В этом выражении имеется три неизвестные величины $\delta_{\text{оц}}$, W_{-1} , β . Для экспериментального определения этих величин необходимо провести усталостные испытания до разрушения при постоянной амплитуде напряжений на трех различных уровнях напряжений. В данной работе рассматривается несколько иной путь. Это связано с тем, что величина $\delta_{\text{оц}}$ была найдена ранее теоретически [1]. В этом случае достаточно провести усталостные испытания на двух различных уровнях напряжений и соответственно использовать систему из двух уравнений:

$$\begin{aligned}\frac{\delta_{\text{оц}}}{\delta_{\text{сц1}}} &= 1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{\text{сц1}}} \right)^{\beta}; \\ \frac{\delta_{\text{оц}}}{\delta_{\text{сц2}}} &= 1 - \left(\frac{W_{-1}}{W_{\text{сц2}}} \right)^{\beta}.\end{aligned}\tag{8}$$

где $\delta_{\text{сц1}}$, $\delta_{\text{сц2}}$ – соответственно логарифмический декремент затухания, который измеряется в усталостном эксперименте при двух разных уровнях напряжений.

В системе уравнений (8) две неизвестные величины – W_{-1} и β , которые находятся путем решения этой системы.

Как показали проведенные исследования, для получения только β в правую часть системы можно подставить $\delta_{\text{сц}}$ и неизвестную величину δ_{-1} – логарифмический декремент затухания, соответствующий пределу выносливости. В этом случае система (8) выглядит следующим образом:

$$\begin{aligned}\frac{\delta_{\text{оц}}}{\delta_{\text{сц1}}} &= 1 - \left(\frac{\delta_{-1}}{\delta_{\text{сц1}}} \right)^{\beta}; \\ \frac{\delta_{\text{оц}}}{\delta_{\text{сц2}}} &= 1 - \left(\frac{\delta_{-1}}{\delta_{\text{сц2}}} \right)^{\beta}.\end{aligned}\tag{9}$$

При решении этой системы уравнений величина β получается точно такой, как и при решении системы (8). Это подтверждает справедливость замены рассеянных энергий логарифмическим декрементом затухания.

Для решения системы (8) необходимо найти величину полной рассеянной энергии за цикл нагружения по выражению (5). В это выражение входит $W_{\text{уц}}$ – энергия упругого деформирования образца за цикл нагружения.

Ее определили следующим образом. Было рассчитано перемещение конца образца от нагрузки в 1 Н. Далее по известной величине перемещений конца образца была найдена величина нагрузки при заданном перемещении. В пределах упругости работа внешних сил A равна внутренней энергии упругого деформирования:

$$A = \frac{1}{2}Py = W_{\text{уц}},\tag{10}$$

где P – усилие на конце образца, Н; y – перемещение конца образца, м.

Величина $\delta_{\text{сц}}$ была найдена так. Измерялся логарифмический декремент затухания до начала испытаний (δ_0 – начальное значение декремента), далее в процессе испытаний многократно измерялся декремент, чтобы максимально точно найти декремент при разрушении $\delta_{\text{к}}$ [4]. Отсюда

$$\delta_{\text{сц}} = \frac{\delta_{\text{к}} - \delta_0}{N_{\text{р}}}. \quad (11)$$

Эксперимент проводился следующим образом. Образец из сплава 2024 (Д16Т) имел толщину 1 мм, ширину 17 мм и длину рабочей части 135 мм. Образец закреплялся консольно и с помощью электродвигателя с эксцентриком его конец отклонялся на заданную величину. Таким образом, получался симметричный цикл нагружения с постоянной амплитудой напряжения при мягком режиме нагружения.

В результате проведенных исследований было обнаружено, что более точные результаты получаются, если провести экстраполяцию δ до разрушения образца. Так, при испытании с амплитудой перемещения $y = 19$ мм последнее измерение было при числе циклов $N_y = 10^4$, а разрушение произошло при $N_y = 104\,400$. Проведенные аппроксимация и экстраполяция позволили более точно оценить величину δ при разрушении.

Система (8) решалась путем взятия логарифмов, затем вычитания уравнений и получалось уравнение с неизвестной величиной β , далее путем подстановки β находилась величина W_{-1} .

Было испытано по шесть образцов на каждом уровне нагружения. В расчетах для сплава 2024 принималось $E = 70$ ГПа.

Экспериментальные данные для расчета α и W_{-1} приведены в табл. 1, где $\Delta\delta_{\text{с}} = \Delta\delta_0 + \Delta\delta_{\text{н}} = \delta_{\text{р}} + \delta_0$, а величина $\delta_{\text{р}}$ – значение δ при разрушении.

Вычисление энергетических параметров усталостного разрушения сплава 2024 дало следующие результаты: $\alpha = 0,709$; $W_{-1} = 2,3917 \cdot 10^{-10}$ Н·м. Эти результаты несколько отличаются от приведенных в [1] из-за уточнения δ при разрушении и близки к данным работы [2].

Таблица 1

Результаты измерения логарифмического декремента затухания при усталостных испытаниях сплава 2024

Амплитуда циклических перемещений, мм	Количество циклов нагружения, $N_{ц} \cdot 10^4$	δ_i	$\Delta\delta_c$	$\delta_{сц} \cdot 10^7$
19	0	0.0184	–	–
	2	0.0202	–	–
	4	0.0225	–	–
	6	0.0258	–	–
	8	0.0311	–	–
	10	0.0388	–	–
	10.44	0.0405	0.0221	2.12
25	0	0.0207	–	–
	1	0.0225	–	–
	2	0.0247	–	–
	3	0.0275	–	–
	4	0.0316	–	–
	5	0.0385	–	–
	5.22	0.400	0.0193	3.70

Таким образом, энергетические усталостные характеристики можно находить путем измерения логарифмического декремента затухания в процессе усталостных испытаний и применять их при прогнозировании долговечности.

Список литературы

1. Дибир, А. Г. Прогнозирование долговечности по изменению диссипативных характеристик [Текст] / А. Г. Дибир, А. А. Кирпикин, Н. И. Пекельный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «Харьк. авиац. ин-т». – Харьков, 2018. – Вып. 80. – С. 125–133.
2. Трощенко, В.Т. Усталость и неупругость материалов [Текст] / В. Т. Трощенко. – Киев : Наук. думка, 1971. – 268 с.
3. Буланов, В. В. Исследование физико-механических характеристик материалов конструкций [Текст] / В. В. Буланов, А. А. Кирпикин, В. А. Мизонов // Прочность конструкций летательных аппаратов. Сб. науч. тр. ХАИ. – 1978. – Вып. 5. – С. 126–130.

4. Дибир, А. Г. Аппроксимация изменения демпфирующих характеристик в процессе циклических нагружений [Текст] / А. Г. Дибир, А. А. Кирпикин, Н. И. Пекельный // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии : сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та «Харьк. авиац. ин-т». – Харьков, 2008. – Вып. 38. – С. 88–91.

References

1. Dibir, A. G. Prognozirovanie dolgovechnosti po izmeneniyu dissipativnykh kharakteristik [Forecasting longevity by changing dissipative characteristics]. Trudy Nats. aerokosm. un-t «Kharkov. aviats. in-t» // *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii* [Proc. of the Kharkiv National Aerospace University, “Open information and computer integrated technologies”], 2018. – Vol. 80, P. 125–133.

2. Troshchenko, V.T. *Ustalost' i neuprugost' materialov* [Fatigue and inelastic materials]. Kiev : Nauk. dumka, 1971. – 268 p.

3. Bulanov, V. V. Issledovanie fiziko-mekha-nicheskikh kharakteristik materialov konstrukcij // Prochnost konstrukcij letatel'nyh apparatov. – Har'kov: «NAI», 1978. – № 5. – S. 126–130.

4. Dibir, A. G. Approksimatsiya izmeneniya dempfiruyushchikh kharakteristik v protsesse tsiklicheskikh nagruzhenii [Approximation of the change in damping characteristics during cyclic loading] Trudy Nats. aerokosm. un-t «Kharkov aviats. in-t» // *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii* [Proc. of the National Aerospace University, “Open information and computer integrated technologies”], 2008, – Vol. 38, P. 88–91.

Надійшла до редакції 04.06.2019, розглянута на редколегії 07.06.2019.

Експериментальне визначення енергетичних утомних характеристик сплаву Д16Т (2024) методом вільних коливань

У процесі дослідження втомних характеристик матеріалів, вузлів, агрегатів і цілих конструкцій, а також прогнозування довговічності необхідно знати енергетичні втомні характеристики різних матеріалів. До таких параметрів відносяться α – параметр втомного руйнування і W_{-1} – незворотно розсіяна енергія за цикл навантаження при напрузі, рівних межі втоми на базі $N = 10^7$ циклов. Логарифмічний декремент загасання показує частку необоротно розсіяною енергії при загасання коливань від загальної пружної енергії коливань. Доведено, що для металів на втомне руйнування йде постійна величина «небезпечною» енергії. У даній роботі описується експериментальне визначення цих енергетичних характеристик для одного з найпоширеніших матеріалів в авіації Д16Т (2024). Шляхом вимірювання логарифмічного декременту загасання в процесі втомних випробувань знаходиться розсіяна енергія за цикл навантаження. Випробування проводяться на двох різних рівнях навантаження. Це дозволяє отримати систему з двох рівнянь для визначення двох енергетичних характеристик α і W_{-1} .

Ключові слова: логарифмічний декремент загасання, розсіяна енергія, енергетичні втомні характеристики.

Experimental determination of energy fatigue characteristics of the alloy D16T (2024) free oscillation method

In the process of studying fatigue characteristics of materials, components, assemblies and entire structures, as well as the prediction of durability, it is necessary to know the energy fatigue characteristics of various materials. These parameters include α – a fatigue failure parameter and W_{-1} – irreversibly dissipated energy per loading cycle at stresses equal to the fatigue limit based on $N = 10^7$ cycles. The logarithmic damping decrement shows the fraction of irreversibly scattered energy when the oscillations decay from the total elastic energy of the oscillations. It has been proven that for metals fatigue failure is a constant "dangerous" energy. This paper describes the experimental determination of these energy characteristics for one of the most common materials in aviation, D16T (2024). By measuring the logarithmic damping factor in the fatigue test process, the dissipated energy is found over the loading cycle. Tests are conducted at two different loading levels. This allows to obtain a system of two equations to determine the two energy characteristics α and W_{-1} .

Key words: logarithmic damping decrement, scattered energy, energy fatigue characteristics

Сведения об авторах:

Дибир Александр Геннадиевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина. ORCID 0000-0002-2366-6353.

Кирпикин Анатолий Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина. ORCID 0000-0001-8883-0663.

Пекельный Николай Николаевич – канд. техн. наук, ст. науч. сотр., доцент кафедры прочности летательных аппаратов Национального аэрокосмического университета им. Н. Е. Жуковского «Харьковский авиационный институт», Украина. ORCID 0000-0003-0989-2546.

About the authors:

Dibir Alexander - Ph. D., Associate Professor of the Department of Aircraft Strength of the National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky Kharkiv Aviation Institute, Ukraine. ORCID 0000-0002-2366-6353.

Kirpikin Anatoly – Ph. D., Associate Professor of the Department of Aircraft Strength of the National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky Kharkiv Aviation Institute, Ukraine. ORCID 0000-0001-8883-0663.

Pekelny Nikolay - Ph. D., Associate Professor of the Department of Aircraft Strength of the National Aerospace University. N. Ye. Zhukovsky Kharkiv Aviation Institute, Ukraine. ORCID 0000-0003-0989-2546.