УДК 620.178.3,629.735, 62-192

ЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СНИЖЕНИЯ ПРЕДЕЛА ВЫНОСЛИВОСТИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ В РЕЗУЛЬТАТЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО НАГРУЖЕНИЯ

Л.В.Агамиров*, докт. техн. наук;* ***М.С.Сташкив****;*
И.В.Шевченко*, докт. техн. наук*
(*НИУ «Московский энергетический институт»*)

E-mail: itno_agamirov@mail.ru

. . . . . .
. . . . .
. . . . .

Ключевые слова: . . .
. . . . .

. . . .

L.V.Agamirov, Dr.Techn.Sc; M.S.Stashkiv; I.V.Shevchenko, Dr.Techn.Sc.

. . . . . .
. . . . .
. . . . .

Keywords: . . .
. . . . . .

Дальнейшее увеличение скорости полета современных военных и гражданских самолетов приводит к необходимости увеличения статических, динамических и тепловых нагрузок на элементы конструкции летательного аппарата. Для этого требуются новые материалы и технологии, совершенствование расчетных методов обоснования ресурса и надежности ответственных элементов конструкции планера и деталей воздушно-реактивных двигателей (ВРД).

В настоящее время методики расчета ресурса деталей, работающих в области многоцикловой усталости, как правило, базируются на линейной или корректированной линейной гипотезе накопления повреждений, предусматривающей постоянство в процессе расчета характеристик сопротивления усталости материалов и натурных деталей, в то время как эти характеристики изменяются по мере накопления повреждений. Подобные модели анализируются в работах [1–5] применительно к конструкциям самолетов и в работах [6–8] для газотурбинных двигателей. Очевидно, что циклическое нагружение деталей после наработки в процессе эксплуатации, имеющие определенные повреждения структуры материала, приводит к рассеянию энергии и новому снижению предела выносливости вплоть до разрушения. В связи с этим перспективной и физически оправданной альтернативой линейной модели является использование энергетического критерия усталостного разрушения, связанного с исчерпанной несущей способностью детали по мере снижения предела выносливости при регулярном и нерегулярном нагружениях.

Для построения модели непрерывного снижения предела выносливости при эксплуатационном нагружении, прежде всего, необходимо выявить закономерности вариации характеристик сопротивления усталостному разрушению хотя бы при однократном циклическом нагружении, что и является целью настоящей работы.

Исследования в области создания физических моделей [9–13] в большинстве случаев учитывают лишь регулярное действие нагрузки. Энергетические модели разрабатывались на основании анализа большого числа экспериментальных данных и литературных источников. Предлагается зависимость между энергией, рассеянной в материале за цикл $D(\sigma_a)$, и действующей амплитудой напряжения [9]:

$$D(\sigma_a) = 2D_{\max}\left(\frac{\sigma_a}{s_b}\right)^m, \quad (1)$$

где $D_{\max}$ – предельная работа деформирования (работа разрушения); s_b – истинное значение временного сопротивления; m – параметр, характеризующий интенсивность увеличения $D(\sigma_a)$ с увеличением σ_a для конкретного материала. Энергетический критерий усталостного разрушения имеет вид:

$$D_c = D_{\max}\left(\frac{s_b}{\sigma_a}\right)^\theta, \quad (2)$$

где θ – параметр, характеризующий интенсивность увеличения суммарной рассеянной энергии D_c по сравнению с величиной $D_{\max}$ при уменьшении напряжений σ_a, то есть при увеличении долговечности $N(\sigma_a)$. Анализ большого числа экспериментальных данных показал, что величина параметра θ в диапазоне долговечностей 10^4 – 10^7 циклов несущественно зависит от напряжений и может быть принята постоянной для каждого материала. Эмпирическая зависимость параметра θ от истинного удлинения e_p металла имеет следующее аналитическое выражение:

$$\theta = (0{,}085 + 0{,}37e_p)^{-1}, \quad (3)$$

где $e_p = \ln\left(\frac{1}{1-\psi}\right)$, ψ – относительное сужение.

Приняв

$$D_c = D(\sigma_a)N(\sigma_a), \quad (4)$$

с учетом зависимостей (1) и (2) было получено уравнение кривой усталости в логарифмических координатах [9]:

$$\lg\sigma_a = \lg s_b - \frac{\lg\left[2N(\sigma_a)\right]}{\theta + m}. \quad (5)$$

где параметры уравнения определяются величинами истинного временного сопротивления s_b и значениями параметров θ и m.

Определим долговечность N_x образца, предварительно поврежденного при числе циклов n_0 на уровне σ_0, при последующем испытании его на уровне амплитуды напряжений σ_a. Предположим, что энергия, рассеянная в материале до разрушения поврежденного образца, пропорциональна энергии, рассеянной в материале неповрежденного образца при фиксированном значении σ_a независимо от величины σ_a, но в зависимости от наработки n_0 на уровне σ_0 и интенсивности снижения статических свойств в результате предварительного циклического деформирования. Уравнение энергетического баланса в этом случае

$$D_x(\sigma_a)N_x(\sigma_a) = D(\sigma_a)N(\sigma_a) - kD(\sigma_0)n_0, \quad (6)$$

где $D(\sigma_a) = D_{\max}\left(\frac{\sigma_a}{s_b}\right)^{m(\sigma_a)}$ – энергия, рассеянная в материале за цикл в неповрежденном образце при испытании его на уровне σ_a; $D(\sigma_0) = D_{\max}\left(\frac{\sigma_0}{s_b}\right)^{m(\sigma_0)}$ – энергия, рассеянная в материале за цикл в неповрежденном образце при испытании его на уровне σ_0; $D_x(\sigma_a) = D_{\max x}\left(\frac{\sigma_0}{s_{bx}}\right)^{m_x(\sigma_a)}$ – энергия, рассеянная в материале за цикл для поврежденного образца при испытании его на уровне σ_a;

$$k = \frac{D(\sigma_a)\,N(\sigma_a)}{D(\sigma_0)\,N(\sigma_0)}\left(1 - \frac{\sigma_0}{s_b}\right)^{\gamma} - \quad (7)$$

– коэффициент, учитывающий изменение разрушающей энергии неповрежденного образца при переходе от уровня σ_0 к уровню σ_a; $N(\sigma_a)$, $N(\sigma_0)$ – долговечности, определяемые по кривой усталости для соответствующих амплитуд напряжений.

Выражение в скобках в формуле (7) определяет изменение статических характеристик в результате предварительного циклического деформирования. В вышеприведенных уравнениях индексом x обозначены статические и циклические характеристики поврежденного образца. Подставляя вышеприведенные уравнения в выражение (6), получим

$$N_x(\sigma_a) = (\sigma_a/s_b)^{m(\sigma_a)}(s_{bx}/\sigma_a)^{m_x(\sigma_a)} \times$$
$$\times \frac{D_{\max}}{D_{x\max}} N(\sigma_a)\left[1 - (1 - \frac{\sigma_0}{s_b})^{\gamma}\right]\frac{n_0}{N(\sigma_0)}. \quad (8)$$

В работе [9] приведены эмпирические зависимости от долговечности параметра m для углеродистых, аустенитных и легированных сталей, сплавов на основе алюминия, меди и ее сплавов, латуни и других сплавов (табл. 1).

Так, например, для легких сплавов параметр m определяется из выражения:

$$m(\sigma_a) = 15 - \theta - b \cdot \lg 2N(\sigma_a),$$
$$m_x(\sigma_a) = 15 - \theta_x - b \cdot \lg 2N_x(\sigma_a). \quad (9)$$

Подставляя формулу (9) в выражение (6), после преобразований получим

$$N_x(\sigma_a) = \left\{\left(\frac{\sigma_a}{\sigma_0}\right)^{14,8-\theta}\left(\frac{s_{bx}}{\sigma_a}\right)^{14,8-\theta_x} \times \right.$$
$$\times \frac{D_{\max}}{D_{x\max}}[N(\sigma_a)]^{1-b\lg\sigma_a/s_b} \times \quad (10)$$
$$\left. \times\left[1 - \left(1 - (\sigma_0/s_b)^{\gamma}\right)\frac{n_0}{N(\sigma_0)}\right\}^{\frac{1}{1-b\lg\sigma_a/s_{bx}}}.$$

Таблица 1

Выражения для определения параметра *m* для разных групп металлов

Материал	m
Углеродистые стали, легированные стали (60,20Х,40Х,1Х13,12ХН3, 12Х18Н10Т, 15Р2АФДпс и др.)	$m = a + \lg(2N_p)$ $a = \lg(2N_p)/\lg(\sigma_p/\sigma_a) - \theta$
Сплавы на основе алюминия (В95, АВ, Д16Т, АК4 и др.)	$m = 15 - \theta - b\lg(2N_p)$
Аустенитные стали в пластичном состоянии (ЭИ612, ОХ14АГ12М, 30Х10Г10, 1Х18НШТ и др.)	$m = [(0{,}68 + 0{,}13e_p)\lg(2N_p)]/\lg(\sigma_p/\sigma_{0,2}) - 0{,}85 - \theta$
Медь и ее сплавы в деформированном состоянии (медь, латунь, Л62, БрАЖЭ)	$m = 8{,}4$
Медь и ее сплавы в отожженом состоянии	$m = 1{,}9 + 0{,}55\cdot\lg(2N_p)$

Отношение $D_{\max}/D_{x\max}$ определяется из условия: при $\sigma_a = \sigma_0$, $N_x(\sigma_0) = N(\sigma_0) - n_0$. Окончательно искомая остаточная долговечность образца, поврежденного предварительным циклическим нагружением определяется уравнением

$$N_x(\sigma_a) = \Big\{(\sigma_a/\sigma_0)^{\theta_x-\theta}[N(\sigma_a)]^{1-b\lg\sigma_a/s_b} \times \\ \times\left[1-\frac{n_0}{N(n_0)}\right]^{1-b\lg\sigma_0/s_{bx}} \times \\ \times N(\sigma_0)^{b\cdot\lg s_{bx}/s_b}\Big\}^{\frac{1}{1-b\lg\sigma_a/s_{bx}}}. \quad (11)$$

Для построения расчетной кривой усталости образцов, поврежденных предварительным циклическим нагружением, необходимо для ряда уровней σ_a определить долговечности $N_x(\sigma_a)$ по формуле (11).

Статические испытания на изгиб [14] показывают, что разрушающие изгибающие моменты для исходных образцов и образцов, поврежденных переменными нагрузками вплоть до образования макротрещины длиной 0,1 – 0,5 мм, оказались практически одинаковыми. Таким образом, можно принять предположение, что условное временное сопротивление при изгибе, определяемое в предположении упругого распределения напряжений по сечению, не зависит от степени усталостного повреждения материала до появления макротрещины указанных размеров. Изменение статической прочности может быть выведено из уравнения энергетического баланса (6) при условии $N(\sigma_a) = 1$:

$$s_{bx} = s_b\left\{1-\left[1-\frac{\sigma_0}{s_b}\right]^{\gamma}\cdot\frac{n_{0pm}}{N_{0pm}}\right\}^{\frac{m_0}{m_0+1}}, \quad (12)$$

где m_0 – коэффициент деформационного упрочнения; $n_{0\,pm}$ – число циклов с момента образования трещины; $N_{0\,pm}$ – период развития усталостной трещины при амплитуде σ_0 до полного усталостного разрушения.

Уравнение (12) получено с учетом следующих уравнений, связывающих параметры истинной диаграммы деформирования:

$$s_{bx} = s_b\left(\frac{e_{px}}{e_p}\right)^{m_0}, \; D_{x\max} = \frac{s_{bx}e_{px}}{m_0+1}. \quad (13)$$

При выводе уравнения (12) предполагается в первом приближении неизменность уравнения истинной диаграммы деформирования поврежденного и неповрежденного материала.

Коэффициент γ уравнения (12) может быть определен при условии $n_{0pm}/N_{0pm} = 1$: $s_{bx} = \sigma_0$, откуда получаем $\gamma = (m_0+1)/M_0$. Параметр нетрудно определить из уравнений (3), (12), (13). Сравним с формулой (12) эмпирическое уравнение для оценки изменения временного сопротивления применительно к сплаву АВ, приведенное в работе [14]:

$$s_{bx} = s_b - (s_b - s_0)\left(\frac{n_{0pm}}{N_{0pm}}\right)^{\beta}. \quad (14)$$

Для определения параметра β необходимо иметь минимум одно статическое испытание группы образцов с трещиной усталости с целью определить s_{bx}. Другая точка определяется по координате $\sigma_0 = \sigma_{a1}$: $n_{0\,pm} = N_{0\,pm}$. Для гладких образцов из сплава АВ диаметром 8 мм значение β оказалось равным 2,44.

Сопоставление относительных величин s_{bx}/s_b по энергетической модели (12) и модели (14), обоснованной эмпирически для сплава АВ приведено в табл. 2. Принято $\sigma_0/s_b = 0{,}4$, $m_0 = 0{,}272$ для сплава АВ, $\gamma = 4{,}673$, $b = 0{,}627$. Отношение истинных временных сопротивлений поврежденного и неповрежденного материала по расчетной (12) и эмпирической (14) моделям близки между собой для сплава АВ. Достаточно общие исходные предпосылки позволяют использовать методику обоснования модели (12) и для других сплавов.

Таблица 2

Сопоставление относительных величин s_{bx}/s_b

n_{0pm}/N_{0pm}	s_{bx}/s_b, модель	
	(12)	(14)
0,1	0,978	0,998
0,3	0,928	0,968
0,5	0,869	0,889
0,7	0,778	0,749
0,9	0,626	0,536

Следует отметить, что рассматриваемый подход к оценке изменения статических свойств в результате предварительного циклического деформирования опирается на некоторые упрощающие гипотезы, поэтому является приближенным. В соответствии с уравнением (12) снижение статической прочности происходит лишь после образования макротрещины, что подтверждается экспериментальными исследованиями. До образования макротрещины характеристики статических свойств остаются неизменными. При построении вторичных кривых усталости образцов с начальными дефектами снижение статической прочности определяется уравнением (12). Вторичные кривые усталости образцов без начальных дефектов строятся по параметру N_{pm}/N относительного периода развития трещины. Это отношение является величиной случайной и варьируется в широких пределах от 0,1 до 0,7 в зависимости от материала, уровня и характера нагрузки и других факторов. Таким образом, рассмотренная выше модель снижения предела выносливости в результате предварительного циклического деформирования учитывает разделение процесса усталостного разрушения на две стадии. Проведем анализ экспериментальных исследований материалов, поврежденных при предварительной циклической нагрузке без образования макротрещины и с образованием ее определенного размера.

Для проверки предлагаемой методики использовались результаты усталостных испытаний на плоский консольный изгиб гладких образцов сплава АВ диаметром рабочей части 8 мм [14]. Испытания проводились по двухступенчатой программе, регистровались изменения длины трещины с момента ее появления до разрушения образцов. Степень повреждения образцов, не достигших стадии образования макротрещины длиной 0,1 – 0,5 мм, составляла 0,25 на уровнях напряжений предварительного нагружения 165 и 200 МПа. Расчеты производились для двух типов уравнений кривых усталости [15]:

$$\sigma_a = \sigma_{-1\infty} + A \lg N^{-\beta}, \qquad (15)$$

$$\sigma_a = \sigma_{-1\infty} + CN^{-\alpha}. \qquad (16)$$

Параметры исходных кривых усталости при окончательном разрушении оценивались по результатам испытаний и составили: $\sigma_{-1\infty} = 63$ МПа, $A = 2000$ МПа, $\beta = 2{,}84$ – для кривой (15) и $\sigma_{-1\infty} = 80{,}59$ МПа, $C = 3305{,}7$ МПа, $\alpha = 0{,}2607$ – для кривой (16). Степени повреждения образцов с макротрещинами длиной 5, 10 и 13 мм составляли 0,39, 0,73 и 0,86 соответственно в диапазоне уровней предварительного повреждения 165 – 200 МПа. В целях разделения процесса усталостного разрушения на две стадии (до образования макротрещины и развития макротрещины до разрушения) оценивались параметры кривой усталости, характеризующей зависимость полного периода развития трещины от амплитуды напряжений. Эти параметры составили $\sigma_{-1\infty} = 0$, $A = 8400$ МПа, $\beta = 2{,}17$. Оценки параметров закладывались в расчет по уравнению (11) для образцов с макротрещинами. Учитывалось также изменение статических характеристик образцов с макротрещинами. Значения истинных временных сопротивлений s_b при изгибе образцов без макротрещины и с трещинами указанных размеров составили 756, 700 и 378 МПа соответственно. Осевой момент сопротивления определялся

Таблица 3

Изменение пределов выносливости в результате предварительного повреждения без образования усталостной трещины (эксперимент/расчет)

Амплитуда предварительного нагружения	Уравнение кривой усталости	Значения пределов выносливости, МПа, при долговечности				Параметры кривых усталости поврежденных образцов		
		10^5	10^6	10^7	$5{\cdot}10^7$	σ_{-1}, МПа	A (C), МПа	β (α)
165 МПа	(15)	255/254	171/179	132/139	117/121	61,3	1524,2	2,71
	(16)	255/257	171/180	132/139	117/121	80,2	2933,8	0,26
200 МПа	(15)	248/256	171/180	130/139	112/121	62,5	1639,9	2,76
	(16)	248/258	171/180	130/139	117/122	80,2	2966,0	0,26

Таблица 4

Изменение пределов выносливости в результате предварительного повреждения с образованием усталостной трещины (эксперимент/расчет)

Длина трещины, мм	Степень повреждения	Значения пределов выносливости, МПа, при долговечности				Параметры кривой усталости (15)		
		10^5	10^6	10^7	$5{\cdot}10^7$	σ_{-1}, МПа	A, МПа	β (α)
5	0,39	235/234	158/159	113/115	92/94	1,2	7327	2,1
10	0,73	201/203	136/133	97/95	79/79	21,9	13799	2,6
13	0,86	178/175	120/112	86/82	70/70	38,2	32244	3,3

в предположении упругого распределения напряжений по сечению. Статические характеристики при растяжении составили $\sigma_{0,2}$ = 341 МПа, s_k = 514 МПа, σ_b = 407 МПа, δ_5 = 15 %, ψ_k = 42,3 %.

Значение e_p для сплава АВ составляет 0,35. В табл. 3, 4 представлены результаты экспериментальных и расчетных исследований снижения предела выносливости поврежденных образцов в диапазоне долговечностей от 10^5 до $5{\cdot}10^7$ циклов. Там же приведены оценки параметров уравнений кривых усталости (15), (16) предварительно поврежденных образцов. Расхождение экспериментальных и расчетных значений пределов ограниченной выносливости образцов, поврежденных предварительным циклическим нагружением без образования усталостной трещины в соответствии с моделью (11) не превышает 5 – 9 % в диапазоне долговечностей 10^5 – $5{\cdot}10^7$ циклов. Расхождения в значениях пределов ограниченной выносливости образцов, поврежденных при предварительном циклическом нагружении с образованием трещины усталости в том же диапазоне долговечностей не превышает 7 % (табл. 4).

Хорошее для инженерных расчетов совпадение опытных и расчетных значений пределов выносливости поврежденных образцов свидетельствует о возможности применения предлагаемой модели для оценки снижения предела выносливости после предварительного циклического повреждения во всем диапазоне долговечностей.

Экспериментальная проверка разработанной модели включала анализ результатов усталостных испытаний на плоский консольный изгиб образцов сплава АВ по двухступенчатой программе с регистрацией процесса изменения длины трещины с момента ее появления до разрушения. Расхождение экспериментальных и расчетных значений пределов ограниченной выносливости образцов, поврежденных предварительным циклическим нагружением без образования усталостной трещины не превышает 5 % – 9 % в диапазоне долговечностей $10^5 – 5{\cdot}10^7$ циклов. Расхождения в значениях пределов ограниченной выносливости образцов, поврежденных предварительным циклическим нагружением с образованием трещины усталости, в том же диапазоне долговечностей не превышает 7 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Серенсен С.В.** Усталость материалов и элеметов конструкций. Избранные труды. Т. 2. Киев: Наукова думка, 1985. 256 с.
2. **Когаев В.П.** Расчеты на прочность при напряжениях, переменных во времени. М.: Машиностроение, 1977. 232 с.
3. Авиационные правила, часть 25. Нормы летной годности самолетов транспортной категории. Оценка усталостной прочности. 25.571. Анализ допустимости повреждений и усталостной прочности конструкции. Межгосударственный Авиационный Комитет, 1984.
4. **Райхер В.Л.** Усталостная повреждаемость. М.: МАТИ, 2006. 238 с.
5. **Фомичёв П.А, Клепцов В.И.** Обоснование долговечности конструкции транспортного самолета при многоцелевом применении по результатам ресурсных и летных испытаний // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2013. № 2. С. 46–52.
6. Временное положение об установлении и увеличении ресурсов и сроков службы газотурбинных двигателей гражданской авиации, их агрегатов и комплектующих изделий / ГНЦ РФ и ФГУП «ЦИАМ им. П.И. Баранова». М., 2006.
7. **Петухов А.Н.** Сопротивление усталости деталей ГТД. М.: Машиностроение, 1993. 240 с.
8. **Кутырев В.В.** Оценка циклической долговечности дисков авиационных двигателей с учетом влияния технологических факторов // Конверсия в машиностроении. 2008. № 2. С. 24–28.
9. **Трощенко В.Т.** Деформирование и разрушение металлов при многоцикловом нагружении. Киев: Наукова думка, 1981. 343 с.
10. **Schijve J.** Fatigue of structures and materials in the 20th century and thestate of the art // 2nd Ed. Springer, 2009. 621 p.
11. **Petinov S., Guchinsky R.** Criteria for Fatigue Failure of Materials: Application in Fatigue Assessment of Structures // Advanced Engineering Forum. 2018. V. 26. P. 1–8.
12. **Ahmadzadeh GR., Varvani-Farahani A.** Energy-based damage descriptions to assess fatigue life of steel samples undergoing various multiaxial loading spectra. First Published November 22, 2017 Research Article. https://doi.org/10.1177/1056789517741531.
13. **Yan H., Zhu H.Z., Tang B.M.** Study on fatigue dissipated energy model of AC-13 asphalt mixture // J. Chongqing Jiaotong Univ. (Nat. Sci.) 2010, 29.
14. **Степнов М.Н., Трушкин М.А.** Вторичные кривые усталости деформируемых алюминиевых сплавов // В сб. Усталостная прочность и долговечность авиационных конструкций. Куйбышев, 1974. С. 4–14.
15. **Агамиров Л.В.** Статистические методы анализа результатов научных исследований. М.: Изд-во МЭИ, 2018. 72 с.