

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ УСТАЛОСТИ АВИАЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ИСПЫТАНИЙ

Яковлева Т.Ю. *, Мозейко Б.Ю.** , Матохнюк Л.Е.* , Марков А.М.**.

*Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев,

**ООО ИТЦ «Самарайнжиниринг», г. Самара

Увеличение ресурса авиационных двигателей приводит к необходимости проведения исследований сопротивления усталости материалов и элементов конструкций на больших базах нагружения с учетом влияния конструкционных и эксплуатационных факторов. Реальным способом получения характеристик усталости на базах нагружения $10^9 \dots 10^{10}$ циклов являются высокочастотные усталостные испытания [1]. Обычно при этом необходимо учитывать влияние скорости циклического нагружения.

Исследования различных классов материалов - сплавов на основе алюминия, титана, никеля и железа показали сохранение локального характера и последовательности структурных изменений в конкретном материале в диапазоне частот от десятков Гц до 10 кГц [2 - 5]. С учетом этого на основании большого объема экспериментальных исследований эволюции дислокационных и физико-механических характеристик в процессе циклического нагружения металлических материалов сформулирована в аналитическом виде физическая модель усталостного разрушения металлов. Основное допущение модели заключается в представлении области локальной пластической деформации частицей квази-фазы, материал которой является сплошной средой. Геометрические размеры и свойства указанной частицы (или частиц, если разрушение многоочаговое) зависят от локального напряженного состояния, пластических и релаксационных свойств материала, заложенных в параметрах a_σ , b_σ , c_σ долговечности N , частоты f и коэффициента чувствительности материала к асимметрии цикла нагрузки k . Развиваясь в процессе циклического нагружения, частица или частицы квази-фазы после определенного числа циклов N_{Fr} приобретают критические свойства и становятся очагом или очагами усталостного разрушения.

В результате анализа условий энергетического баланса состояния материала квази-фазы при $N = N_{Fr}$ получено уравнение кривой усталости, в котором учтено влияние частоты действующей нагрузки и коэффициента асимметрии циклов R

$$\sigma_a = \left(1 - k \frac{1+R}{2}\right) \sigma_{-1} + a\sqrt{f} + b\sqrt{\frac{1}{N_{Fr}}} + c\sqrt{\frac{f}{N_{Fr}}}, \quad (1)$$

где k - коэффициент чувствительности материала к асимметрии циклов;
 σ_{-1} - напряжения симметричных циклов, воздействие которых еще не вы-

зывает усталостного разрушения при сколь угодно большом числе циклов нагрузки; a, b, c - параметры, зависящие от пластических и релаксационных свойств материала; f и N_{Fr} - частота и число циклов до разрушения соответственно. Следует заметить, что уравнение, как и другие уравнения кривых усталости предусматривает сохранение основных механизмов накопления усталостных повреждений во всем рассматриваемом диапазоне долговечности N_{Fr} .

Если в уравнении (1) зафиксировать значение частоты нагружения, с которой проводят испытания, получим уравнение кривой усталости

$$\sigma_a = \sigma_{a0} + \frac{C}{\sqrt{N_{Fr}}}, \quad (2)$$

т.е. уравнение с двумя параметрами, которые могут быть определены на основании усталостных испытаний на двух уровнях нагрузки. Справедливость этого уравнения была проверена на большом объеме экспериментальных данных об усталости металлических материалов различных классов - сплавах на основе алюминия, никеля, магния, титана, железа, нержавеющей стали.

Экспериментальная проверка применимости уравнения (1) для прогнозирования сопротивления усталости материала при различных частотах нагружения была проведена для сплавов на основе алюминия (АМг6Н, 01570), титана (ПТ7М) и никеля (ЭП202).

Процедура прогнозирования кривых усталости по результатам высокочастотных испытаний состоит в следующем.

На частоте нагружения, которая является верхней границей диапазона, проводят усталостные испытания на образцах и в условиях, идентичных тем, при которых будет осуществляться прогнозирование на низкие частоты. Это относится к размерам и форме образцов, наличию или отсутствию концентратора напряжений, температуре испытаний, окружающей среде, величине коэффициента асимметрии циклов. База нагружения должна включать базу, на которую осуществляется прогноз. Экспериментальные кривые усталости получали путем аппроксимации экспериментальных точек уравнением (2).

Чтобы получить коэффициенты уравнения (1) используем любую математическую программу, которая позволяет для заданного вида функциональной зависимости по табличным значениям аргумента и функции, т.е. экспериментальным точкам, получать график этой функции. То есть, используя экспериментальные данные и вид функции, получаем и решаем систему 4 уравнений с 4 неизвестными. Точность полученных значений слагаемого σ_{a1} , коэффициентов a, b, c и, следовательно, точность прогноза зависят от уровня рассеяния результатов эксперимента. Особенно это относится к величине σ_{a1} (циклический предел упругости при $f \rightarrow 0$).

Подставив в (1) полученные величины σ_{a1}, a, b, c и значение часто-

ты, для которой осуществляем прогнозирование, приводим (1) к виду (2), т.е. рассчитываем величины σ_{a0} и C для (2).

Для двух произвольных значений долговечности N_{Fr1} , N_{Fr2} и известных значений коэффициентов σ_{a0} , C рассчитываем величины σ_{a1} , σ_{a2} . То есть, получаем две точки $\sigma_{a1}(N_{Fr1})$ и $\sigma_{a2}(N_{Fr2})$, которые задают форму и положение прогнозируемой кривой усталости.

Задавая две пары значений $N_{Fr1} - \sigma_{a1}$ $N_{Fr2} - \sigma_{a2}$ и уравнение (2), используя ту же программу, что и для расчета коэффициентов, получаем прогнозируемую кривую усталости.

В качестве иллюстрации возможностей изложенной методики рассмотрим результаты прогнозирования для исследованных сплавов и сравним результаты прогноза с экспериментальными данными.

На рис. 1-3 приведены прогнозируемые по высокочастотным кривым (пунктирные линии) низкочастотные кривые усталости (сплошные линии).

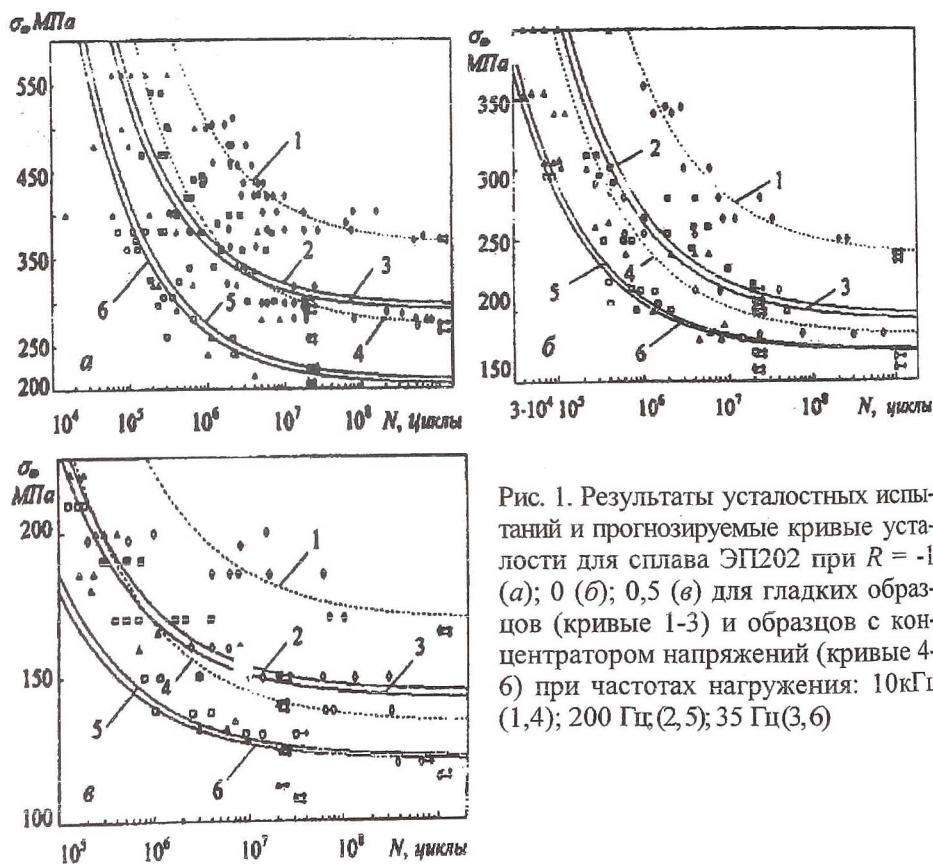


Рис. 1. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости для сплава ЭП202 при $R = -1$ (а); 0 (б); 0,5 (в) для гладких образцов (кривые 1-3) и образцов с концентратором напряжений (кривые 4-6) при частотах нагружения: 10кГц (1,4); 200 Гц (2,5); 35 Гц (3,6)

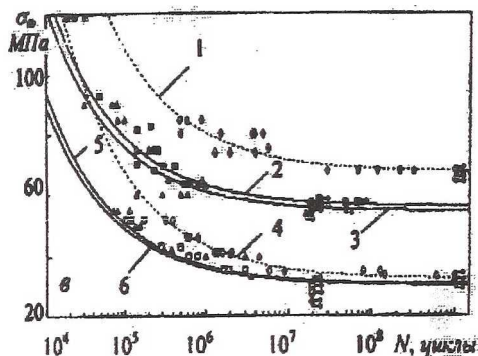
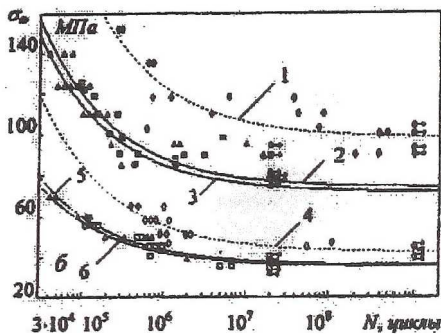
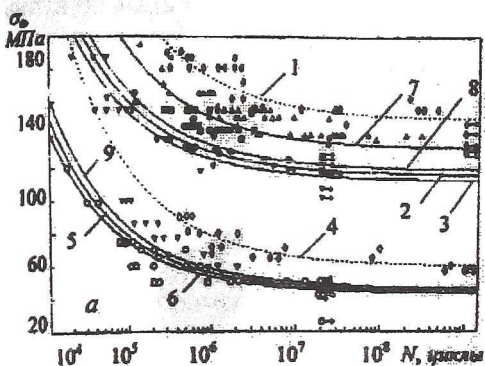


Рис. 2. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости для сплава АМг6Н при $R = -1$ (а), 0 (б), 0,5 (в) для гладких образцов (кривые 1,2,3,7,8) и образцов с концентратором напряжений (кривые 4,5,6,9) при частотах нагружения: 10 кГц (1, 4); 200Гц (2, 5); 35Гц (3, 6); 3кГц (7); 500Гц (8,9)

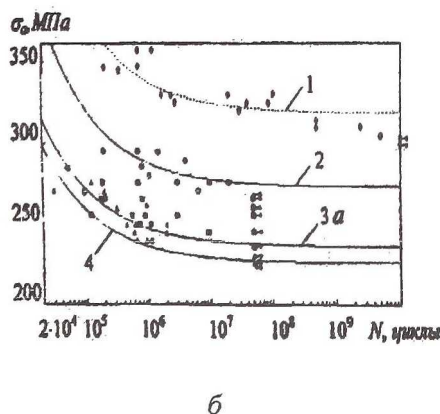
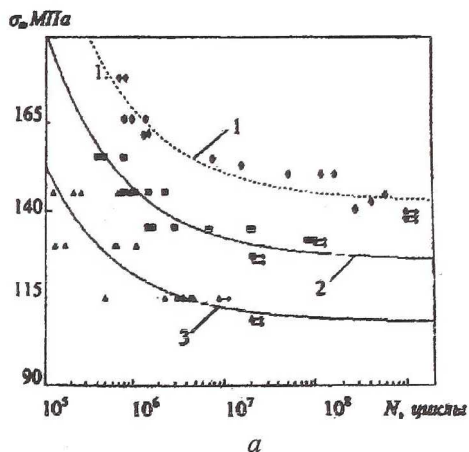


Рис. 3. Результаты усталостных испытаний и прогнозируемые кривые усталости для сплава 01570 (а) и ПТ7М (б) при $R = -1$ и частотах нагружения: 10кГц (1); 3кГц (2); 35Гц (3); 300Гц (3а); 500 Гц (4)

Сопоставление расчетных значений и экспериментальных данных проводили на базе $2 \cdot 10^7$ циклов, которая была достигнута для всех частот нагружения. Результаты сопоставления прогноза с экспериментом показали, что максимальное расхождение расчета и эксперимента составляет 12,2% и всего в двух случаях из 32 превышает 10%, что вполне приемлемо для усталостных испытаний.

Список литературы

1. Матохнюк Л.Е. Ускоренные усталостные испытания высокочастотным нагружением. - Киев: Наук. Думка, 1988.-200 с.
2. Яковлева Т.Ю. Взаимосвязь микромеханизмов структурной перестройки титанового сплава ВТ18У в процессе усталостного нагружения // Пробл. прочности. - 2000. - № 4. - С. 33 - 44.
3. Яковлева Т.Ю. Дислокационная структура титанового сплава ВТ22 в условиях циклического нагружения // Там же. - 2000. - № 6. - С. 73-83.
4. Яковлева Т.Ю. Дислокационная структура зоны пластической деформации и микромеханизмы усталостного разрушения титанового сплава ВТ22 // Там же.-2001.-№5.-С. 65-75.
5. Яковлева Т.Ю., Войналович О.В., Матохнюк Л.Е. Структурні зміни у сплаві Амг6Н за дії високочастотного асиметричного навантажування // Металознавство та термообробка металів. - 2000. - № 4.-С. 12-19.

МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛОПАТОК ГТД ПРИ МНОГОЦИКЛОВОЙ УСТАЛОСТИ

Писаренко Г.Г.* , Васинюк И.М.* , Войналович А.В.* , Мозейко Б.Ю.** , Марков А.М**.
Институт проблем прочности им.Г.С. Писаренко НАН Украины, г. Киев,
** ООО ИТЦ «Самаринжиниринг», г. Самара

Прочностные характеристики газотурбинных двигателей во многом определяются надежностью их лопаточного аппарата, на многоцикловую усталость которого комплексно влияют многочисленные технологические и эксплуатационные факторы. По различным литературным данным на долю усталостных разрушений на этапе освоения нового двигателя приходится около 60...70 % всех поломок. И только индивидуальная оценка ресурса лопаток газотурбинных двигателей позволит обоснованно уменьшить коэффициенты запаса по долговечности, повысить безопасность и экономические показатели эксплуатации.