

ИССЛЕДОВАНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ АВИАЦИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ АНИЗОТРОПИИ УСТАЛОСТНЫХ СВОЙСТВ

Бураго Н.Г.¹, Никитин И.С.², Якушев В.Л.²

¹Институт проблем механики РАН им. А.Ю. Ишлинского

²Институт автоматизации проектирования РАН

В данной работе для оценки долговечности элементов авиационных конструкций предложено обобщение известных критериев многоосного усталостного разрушения на случай титановых сплавов, обладающих анизотропными усталостными свойствами.

Эффект зависимости пределов усталости от оси нагружения при одноосных усталостных испытаниях образцов с текстурой, наведенной в технологических процессах изготовления полуфабрикатов (в первую очередь - прокатки), отмечен в различных источниках [1,2]. В [3,4] было предложено обобщение многоосного усталостного критерия типа Лемэтра-Шабоша на случай сплава с анизотропией усталостных свойств. В основе этого обобщения лежит замена второго инварианта девиатора напряжений на функцию Хилла, предложенную им [5] для описания анизотропной пластичности металлов:

$$\Sigma_{Hill} = \sqrt{H(\sigma_{11} - \sigma_{22})^2 + G(\sigma_{11} - \sigma_{33})^2 + F(\sigma_{22} - \sigma_{33})^2 + 2N\sigma_{12}^2 + 2L\sigma_{13}^2 + 2M\sigma_{23}^2}$$

Параметры функции Хилла F , G , H , L , M , N могут быть определены по результатам одноосных усталостных испытаний вдоль и поперек направления прокатки. В данной работе идея такой замены положена в основу обобщения классических критериев Сайнса и Кроссланда [6,7] на анизотропный случай.

Например, обобщение критерия Сайнса на анизотропный случай с учетом вышеописанной замены принимает вид:

$$\Delta\tau_{Hill} / 2 + \alpha_s \sigma_{mean} = S_0 + AN^\beta$$

$$\Delta\tau_{Hill} = \frac{1}{3} \sqrt{(\Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{22})^2 + \tilde{G}(\Delta\sigma_{11} - \Delta\sigma_{33})^2 + \tilde{F}(\Delta\sigma_{22} - \Delta\sigma_{33})^2 + 2\tilde{N}\Delta\sigma_{12}^2 + 2\tilde{L}\Delta\sigma_{13}^2 + 2\tilde{M}\Delta\sigma_{23}^2}$$

$$\sigma_{mean} = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)_{mean},$$

где N – число циклов до разрушения, σ_{mean} – сумма главных напряжений, осредненная за цикл нагружения, $\Delta\tau_{Hill}$ – изменение напряжения Хилла за цикл; $\Delta\tau_{Hill} / 2$ – его амплитуда; α_s , S_0 , A , β – параметры, определяемые по данным эксперимента, $\tilde{G} = G / H$, $\tilde{F} = F / H$, $\tilde{N} = N / H$, $\tilde{M} = M / H$, $\tilde{L} = L / H$.

Процедура определения параметров критериев усталостного разрушения предложена в [8] и там же применена к критериям для изотропных материалов. Вычисление параметров обобщенного критерия по схеме, изложенной в [8], дает результат: $S_0 = \sqrt{1 + \tilde{G}} \sigma_u / 3$, $A = 10^{-3\beta} \sqrt{1 + \tilde{G}} (\sigma_B - \sigma_u) / 3$, $\alpha_s = \sqrt{1 + \tilde{G}} (2k_{-1} - 1) / 3$, где σ_u и σ_{u0} - пределы усталости по амплитудным усталостным кривым при коэффициентах асимметрии цикла $R = -1$ и $R = 0$ соответственно, σ_B - предел прочности. В качестве примера решена задача определения напряженно-деформированного состояния и оценки усталостной долговечности вращающегося диска переменного сечения под действием центробежных нагрузок в диске и лопатках. Циклические воздействия данного типа соответствуют полетному циклу нагружения (малоцикловая усталость). Для этого выведена упрощенная система обыкновенных дифференциальных уравнений для напряжений и смещений диска малой, но значительно изменяющейся по радиальной координате, толщины [9]. Предложена численная схема решения полученной жесткой системы уравнений.

Также учтены дополнительные напряжения в ободной части диска, связанные с изгибом лопаток под действием аэродинамических давлений. Аэродинамические давления рассчитаны на основе гипотезы «изолированного профиля» с использованием известных решений об обтекании пластины с отрывом потока [10,11].

На основе предложенных критериев многоосного усталостного разрушения в изотропном и анизотропном случаях получены распределения долговечности диска определенного радиального сечения (Рис. 1).

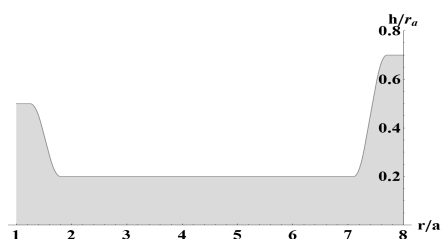
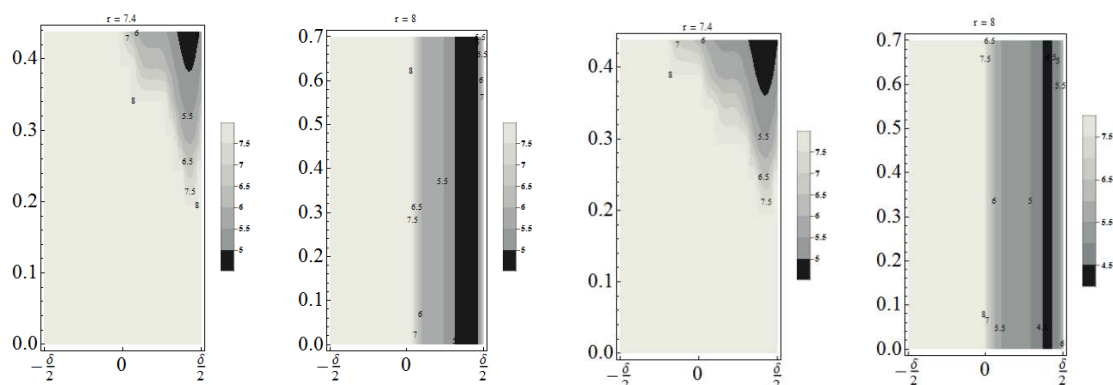


Рис. 1. Сечение диска

Определены опасные зоны и сроки зарождения усталостного разрушения в диске. Для примера приведем картину распределения долговечностей N с помощью изолиний в определенных опасных корневых сечениях под лопаткой на внешней части обода и его внутренней части. На Рис. 2-3 показаны результаты для сплава с изотропными и

анизотропными усталостными свойствами при фиксированном угле ориентации текстуры φ . Наименее долговечными выглядят сечения диска под лопатками, ориентированными под углом $\varphi=90^0$ (Рис. 3-а,б) к направлению оси анизотропной усталости (направлению прокатки, если говорить о технологическом процессе изготовления диска). Наиболее чувствительным к анизотропии усталостных свойств выглядит сечение на внешнем ободе диска под лопаткой (Рис. 2-б и 3-б).



а) Внутренняя часть б) Внешняя часть обода
Рис.2. Долговечность, изотропная усталость.

а) Внутренняя часть б) Внешняя часть обода
Рис.3. Долговечность, анизотропная усталость

В этих случаях результаты близки и принимают критические значения усталостной долговечности титанового диска для выбранных частот вращения $N \sim 10^4$ циклов, что является недопустимым для безопасной эксплуатации.

Работа выполнена в рамках проектов РФФИ № 12-08-00366-а, № 12-08-01260-а.

Литература

1. Ильин А.А., Колачев Б.А., Польшкин И.С. Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. - М.: ВИС-МАТИ. 2009. 520с.
2. Горынин И.В., Чечулин Б.Б. Титан в машиностроении. - М.: Машиностроение. 1990. 400с.
3. Marmi A.K., Habraken A.M., Duchene L. Multiaxial fatigue damage modeling at macro scale of Ti6Al4V alloy. // Int. J. of fatigue. 2009. V. 31. Pp. 2031-2040.
4. Marmi A.K., Habraken A.M., Duchene L. Multiaxial fatigue damage modeling of Ti6Al4V alloy. Proc. 9 Int. Conf. on Multiaxial Fatigue and Fracture (ICMFF9). Parma, Italy. 2010. Pp. 559-567.
5. Хилл Р. Математическая теория пластичности. - М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы. 1956. 407с.
6. Sines G. Behavior of metals under complex static and alternating stresses. Metal fatigue. McGraw-Hill, 1959. Pp. 145-169.
7. Crossland B. Effect of large hydrostatic pressures on torsional fatigue strength of an alloy steel. // Proc. Int. Conf. on Fatigue of Metals. London. 1956. Pp.138-149.
8. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С. Модели многоосного усталостного разрушения и оценка долговечности элементов конструкций. // Изв. РАН. МТТ. 2011. № 6. С. 22-33.
9. Бурого Н.Г., Журавлев А.Б., Никитин И.С., Юшковский П.А. Влияние анизотропии усталостных свойств титанового сплава на долговечность элементов конструкций. Препринт ИПМех РАН № 1064. 2014. 35с.
10. Мхитарян А.М. Аэродинамика. - М.: Машиностроение. 1976. 447с.
11. Гуревич М.И. Теория струй идеальной жидкости. - М.: Наука. 1979. 536с.