

Усталостная долговечность структурно-неоднородных элементов конструкций

Н.Г. Бураго¹, И.С. Никитин²

¹ ИПМех РАН, ² ИАП РАН

В данной работе, на примере титанового диска компрессора показана возможность повышения усталостной долговечности элемента конструкции за счет изменения структуры сплава в узкой приповерхностной зоне [1]. Исследуется усталостная долговечность структурно-неоднородного диска компрессора при малоцикловых (МЦУ) и сверхмногоцикловых (СВМУ) нагрузках. Предполагается, что с помощью технологических процедур управления структурой сплава при наплавлении и спекании, можно получать приповерхностный слой диска с повышенными усталостными свойствами [2]. На основе расчетов напряженно-деформированного состояния с использованием критериев многоосного усталостного разрушения получены оценки долговечности диска для различных усталостных режимов, в том числе и для диска с неоднородными усталостными свойствами. Для этого решены две задачи теории упругости о нагружении кольцевого диска.

В первой задаче было определено напряженно-деформированное состояние диска переменной толщины (элемент реальной конструкции) под действием центробежных нагрузок. Для этого на основе асимптотического анализа трехмерных уравнений теории упругости [3] были получены упрощенные уравнения для напряжений и смещений диска малой толщины с большой производной по радиальной координате. На внешнем контуре диска задавались переменные и периодические по углу радиальные напряжения, которые моделировали центробежное воздействие от лопаток и были согласованы с ним по амплитуде. Циклические воздействия данного типа соответствуют полетному циклу нагружения (режим МЦУ). Полученная система дифференциальных уравнений решалась по неявной разностной схеме с учетом большого параметра в правой части системы, связанного со значительным числом лопаток $n \sim 30$ и сильной изменчивостью решения по угловой координате. Результаты расчета по выбранной схеме сравнивались с точными решениями (для диска постоянной толщины) и с решениями, полученными методом конечных элементов. Из расчетов следует, что напряжения при вращении диска сильно повышаются под лопатками на относительно небольшом расстоянии от внешнего обода. На основе критерия многоосного усталостного разрушения Сайнса [4] были получены

распределения долговечности N (количества циклов нагружения до разрушения) по радиальной координате для титанового сплава с пределом усталости ~ 400 МПа (Рис. 1-а). Показано, что усталостная долговечность снижается до $N = 10^4$ циклов в окрестности обода диска, что является недопустимым для безопасной эксплуатации. В пересчете на реальное время процесса с периодом цикла 3 часа (среднее полетное время) время до разрушения составляет $\sim 30\,000$ час., вполне достижимое в процессе эксплуатации.

Была проведена оценка долговечности диска в зависимости от толщины упрочненного приповерхностного слоя (Рис.1-б). Было определено значение предела усталости ~ 700 МПа на периферии диска, с целью сохранения приемлемой долговечности на уровне $N = 10^6$ циклов.

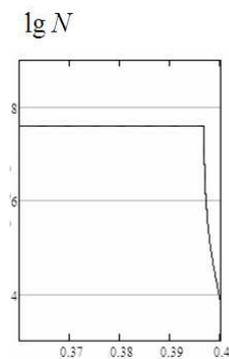


Рис. 1-а

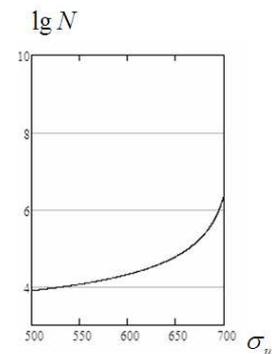


Рис. 1-б

Во второй задаче решается уравнение для изгиба диска под действием периодических по углу крутящих моментов на внешнем контуре. Циклически приложенные крутящие моменты моделируют влияние высокочастотных колебаний лопаток и соответствуют режиму СВМУ. И в этом случае были проведены оценки долговечности титанового диска по обобщенному критерию Сайнса с учетом подобия левой и правой ветвей бимодальной усталостной кривой. Расчет распределения долговечности по радиусу в окрестности ободной части титанового диска привел к результатам, показанным на рис. 2-а. Минимальное значение N , определяющее долговечность детали в целом, имеет величину $\sim 10^9 \div 10^{10}$ циклов. Пересчет на реальное время процесса с периодом цикла 0.01с (при выбранной частоте колебаний) дает величину $\sim 10\,000$ - $30\,000$ часов, достижимую в процессе эксплуатации.

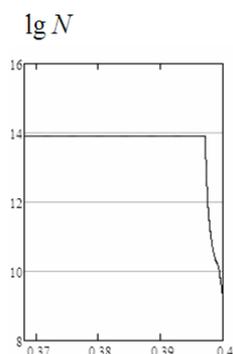


Рис. 2-а

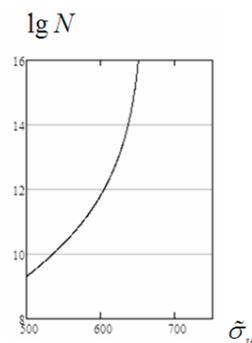


Рис. 2-б

Как и в режиме МЦУ, повышение усталостных свойств в приповерхностном слое диска за счет технологических процессов, влияющих на структуру титанового сплава, позволяет существенно повысить долговечность эксплуатации детали. Из рис. 2-б, где показана зависимость логарифма долговечности от предела усталости в приповерхностном слое, следует, что для сохранения приемлемой долговечности $\sim 10^{11}$ - 10^{12} циклов, на периферии диска должен быть обеспечен предел усталости ~ 600 - 650 МПа.

Из результатов расчетов следует, что повышение предела усталости в приповерхностном слое диска до 650 - 700 МПа за счет изменения структуры сплава в процессе изготовления детали, позволяет повысить долговечность детали до приемлемых значений как в режиме МЦУ (полетный цикл нагружения), так и в режиме СВМУ (вибрационные воздействия). В обоих случаях микроструктура диска, обеспечивающая выполнение требований к неоднородным усталостным свойствам, для обеспечения приемлемой долговечности по всему сечению должна иметь следующий вид [3] – глобулярно пластинчатая в центре и мелкодисперсная на ободу диска. Работа выполнена в рамках проектов РФФИ 12-08-00366-а, 12-08-01260-а.

Литература

1. Полькин И.С., Бураго Н.Г., Никитин И.С. Получение деталей из титана с "тэйлор" структурой и свойствами. Титан. 2012. №4.
2. Ильин А.А., Скворцова С.В. и др. Взаимосвязь структуры и комплекса механических свойств в титановом сплаве ВТ6. Титан. 2011. № 1. С. 26-29.
3. Новацкий В. Теория упругости. М.: Мир. 1975.
4. Бураго 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.