

УДК 539.3

Д.Ю.Фокин (6 курс, каф. МПУ), А.С.Семенов, к.ф.-м.н., доц.

МНОГОКРИТЕРИАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОЧНОСТИ ВРАЩАЮЩИХСЯ ДИСКОВ

В последнее время все более актуальным становится расчет несущей способности вращающихся дисков турбин с детальным учетом особенностей их геометрии и условий нагружения, что приводит к необходимости применения МКЭ. Целью работы является сравнительный анализ разрушающих частот вращения диска, получаемых с применением различных критериев разрушения.

Проведен анализ НДС диска турбины (рис. 1), подверженного влиянию центробежной нагрузки, с учетом температурной зависимости характеристик материала. Задача решалась в упруго-пластической постановке. Использовалась теория пластического течения с изотропным упрочнением. Для данной задачи использовались 3 диаграммы деформирования (рис. 2) при разных значениях температур (20 °С, 550 °С, 600 °С). Распределение полей температур в диске показано на рис. 1.

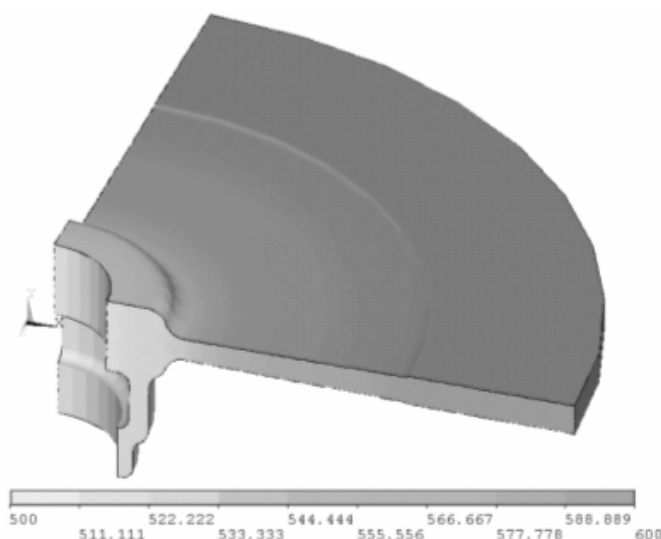


Рис. 1. Распределение температуры в диске

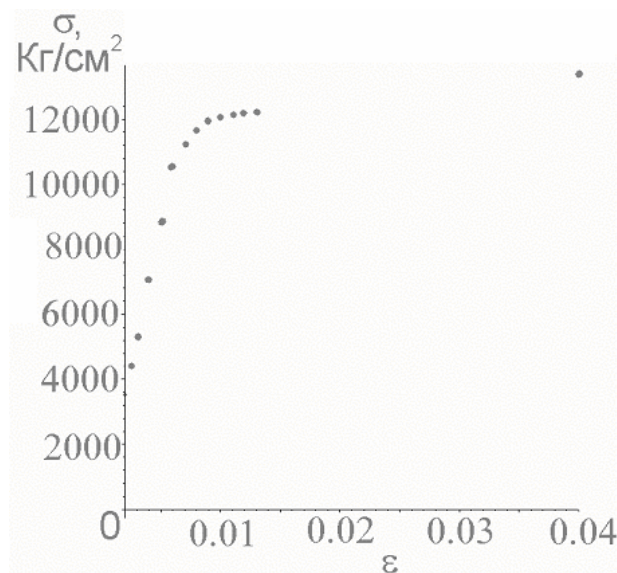


Рис. 2 Диаграмма деформирования (T=550°C)

Упругие свойства материала указаны в табл. 1. Предел прочности $\sigma_B = 1490$ МПа, относительное сужение при разрыве $\Psi = 10.4\%$, удлинение при разрыве $\delta = 10.4\%$. Экспериментально наблюдаемая разрушающая частота вращения рассматриваемого диска равна $\omega^{**} = 44000$ об/мин.

Таблица 1. Зависимость модуля Юнга от температуры:

T, °C	20	550	600
E, Па	2.02E+11	1.76E+11	1.73E+11

Для расчета разрушающей частоты вращения использовались несколько критериев:

- критерий максимальных главных истинных напряжений: $\sigma_{1,max} \geq \sigma_B$;
- критерий максимальных главных остаточных деформаций: $\epsilon_{1,max}^p \geq \delta$ (большие деформации);

- критерий предельной интенсивности пластических деформаций $\varepsilon_i^{pl} \geq \varepsilon_{limit}$, где ε_{limit} вычисляется по формуле: $\varepsilon_{limit} = \ln\{1/(1-\psi)\}[1-\sigma(1-\psi)/\sigma_B]^2$, $\sigma = (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)/3$ – напряжение гидростатического давления (большие деформации);
- критерий максимальных главных напряжений: $\sigma_{1,max} \geq \sigma_B/(1-\psi)$ (большие деформации);
- критерий максимальных главных деформаций (большие деформации):

$$\varepsilon_{1,max} \geq \ln\left(1 + \delta + \frac{\sigma_\varepsilon}{E(1-\psi)}\right).$$

Для получения разрушающей частоты вращения использовался следующий алгоритм расчета: прикладывалось поле центробежных сил, соответствующее определенной частоте ω , затем определялось НДС диска, по которому проверялось выполнение критериев, приведенных выше. Если критерий не выполнялся, то увеличивалась угловая скорость диска. Как только критерий выполнялся, то данная частота вращения ω и определялась за разрушающую частоту ω^* . В результате для каждого из критериев получили разрушающую частоту ω^* , которая приведена в табл. 2.

В табл. 2 также представлена фигурирующая в нормах прочности аналитическая оценка ω^* , получаемая на основе теории предельного равновесия, в которой предполагается, что при повышении частоты вращения возникающие пластические деформации приводят к перераспределению напряжений и постепенному выравниванию их в меридиональном сечении. Потеря несущей способности диска происходит при достижении окружными напряжениями в меридиональном сечении предела прочности. На основании этого в [1] выводится формула для расчета разрушающей частоты вращения диска:

$$\omega^* = \sqrt{\frac{\int_a^b \sigma_\varepsilon(r)h(r)dr}{\left(\frac{\pi}{30}\right)^2 \rho J + \frac{1}{n^2} \sigma_{rb} b h_b}}, \quad (1)$$

где $J = \int_a^b r^2 h(r)dr$ – момент инерции меридионального сечения, ρ – плотность материала, n – рабочая частота вращения, σ_{rb} – напряжения (радиальные), действующие на наружном контуре при рабочем режиме, h_b – толщина края диска, a и b – внутренний и внешний радиусы диска. Следствием (1) получим, что разрушающая частота равна 54000 об/мин.

Таблица 2. Сравнение разрушающих частот вращения диска по разным критериям.

Критерий	ω^* , об/мин	ω^{**} , об/мин	погрешность, %
$\sigma_{1,max} = \sigma_B$	39900	44000	-9,3
$\varepsilon_{1,max}^p = \delta$	48100	44000	9,3
$\varepsilon_i^{pl} = \varepsilon_{limit}$	42850	44000	-2,6
$\sigma_{1,max} = \sigma_B/(1-\psi)$	47250	44000	7,4
$\varepsilon_{1,max} = \ln\left(1 + \delta + \frac{\sigma_\varepsilon}{E(1-\psi)}\right)$	48100	44000	9,3
Теория предельного равновесия	54000	44000	22,7

Как видно из табл. 2, все критерии, основанные на КЭ расчетах, дают погрешность в сравнении с экспериментом менее 10%, в отличие от теории предельного равновесия, которая завывает критическую частоту вращения более чем на 20%. Проведенное исследование показало, что применение МКЭ при расчете разрушающих частот вращения диска является актуальным, поскольку позволяет значительно уменьшить погрешность по сравнению с неконсервативной оценкой по теории предельного равновесия, фигурирующей в нормах прочности.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Демьянушко И.В., Биргер И.А.. Расчет на прочность вращающихся дисков. М.: Машиностроение, 1978, 247с.