НАУЧНОЕ ИЗДАНИЕ МГТУ ИМ. Н. Э. БАУМАНА

НАУКА и ОБРАЗОВАНИЕ

Эл № ФС77 - 48211. Государственная регистрация №0421200025. ISSN 1994-0408

электронный научно-технический журнал

Исследование поверхности нагружения материалов дисков газотурбинных двигателей при разгонных испытаниях модельных дисков

05, май 2014

DOI: 10.7463/0514.0710005

Кузьмин Е. П., Серветник А. Н.

Россия, ФГУП "ЦИАМ им. П.И.Баранова"

servetnik@ciam.ru

evgeny_kuzmin@ciam.ru

Введение

Диски газотурбинных двигателей (ГТД) являются высоконагруженными деталями сложной формы с интенсивными концентраторами напряжений, работающие в условиях сложного повторно-статического нагружения. Потеря функциональной способности диска или его разрушение может привести к аварийной или катастрофической ситуации. В связи с этим, повышение достоверности методов оценки деформирования и предсказания разрушения дисков является важнейшей задачей как при проектировании, так и при сертификации двигателей.

Методы оценки прочности дисков используются на всех этапах создания двигателей. Отметим, что в отечественном двигателестроении с конца 50-х годов до настоящего времени подтверждение статической прочности дисков осуществляется с использованием теории предельного равновесия [1]. Метод основан на предположении, что разрушение происходит по меридиональному или цилиндрическому сечениям диска при выполнении следующих условий:

$$\sigma_\theta(r) = \sigma_B(r), \tag{1}$$

$$\sigma_r(r^*) = \sigma_B(r^*). \tag{2}$$

Условие (1) означает равенство окружных напряжений пределу прочности материала во всех точках меридионального сечения диска. Условие (2) означает равенство радиальных напряжений пределу прочности на цилиндрических сечениях различных радиусов r^*. При определении разрушающей частоты вращения по данному методу используются простые расчетные схемы, не позволяющие в полной мере учесть влияние концентрации напряжений, сложного напряженного состояния, пластичности материала, действия на диск сопрягаемых деталей и реального теплового поля.

При внедрении в двигатели последних тридцати лет новых конструктивных решений (блиски, сварные ротора барабанного типа и т.д.) возможности использования традиционных методов существенно ограничились, а различие расчетных величин (по формулам (1) (2)) и экспериментальных данных в некоторых случаях доходит до 20%.

Для учета действительного перераспределения напряжений в диске в процессе разгона до предельного значения был предложен метод [1,2], основанный на использовании в простых расчетных схемах (преимущественно, оболочечные расчетные модели) деформационной теории пластичности или теории пластического течения [3], а критерием наступления предельного состояния являлось достижение максимальным значениям эквивалентов напряжений или деформаций в точке диска предела прочности σ_B и истинной деформации материала в момент разрушения $\bar{\varepsilon}_K$ соответственно:

$$\sigma_{\max} = \sigma_B, \tag{3}$$

$$\varepsilon_i = \bar{\varepsilon}_K. \tag{4}$$

В последние годы при активном развитии численных методов, в частности МКЭ, стало возможным исследовать несущую способность дисков сложной конфигурации, использовать 3D расчетные схемы совместно с теорией пластического течения и различные варианты силовых и деформационных критериев разрушения [4–9]. Основной идеей методов является пошаговый расчет диска при последовательном увеличении внешней нагрузки на расчетную модель.

Следует отметить, что пластическое деформирование дисков под действием силовых и температурных нагрузок происходит в условиях сложного напряженного состояния и приводит к упрочнению материала, что характеризуется повышением его предела упругости. Теория пластического течения является удобным при расчетах инструментом, позволяющим учитывать сложное нагружение конструкций и их неодноосное напряженное состояние. В этом случае одной из основных проблем моделирования пластических деформаций является выбор параметров поверхности нагружения материала, включающей условие начала пластического деформирования (условие текучести) и условие упрочнения.

Несмотря на широкое развитие и практическое применение вышеуказанных методов, данные по детальному исследованию поверхности нагружения дисковых материалов отсутствуют. Основная цель работы заключается в подтверждении обоснованности использования основополагающих гипотез теории пластического течения и исследование параметров поверхности нагружения материалов при разгонных испытаниях модельных дисков (на примере диска из жаропрочного деформируемого сплава).

Расчетная модель

При моделировании полей упругопластических деформаций в диске с использованием теории пластического течения выбрана программа MSC.Marc. Принято, что пластическое течение развивается по нормали к поверхности текучести, т.е. используется ассоциированный закон пластического течения, связывающий приращения компонент вектора

пластических деформаций $\{\varepsilon^{pl}\}$ с производной функции текучести по соответствующим напряжениям:

$$\{\varepsilon^{pl}\} = d\lambda \left\{\frac{\partial f}{\partial \sigma}\right\}, \tag{5}$$

где $d\lambda$ - неотрицательный скалярный множитель.

Использование соотношения (5) позволило исследовать влияние на поле распределения упругопластических деформаций условие текучести нестандартного сложного вида. В качестве такого условия выбрана модель Хосфорда [10]:

$$|\sigma_1 - \sigma_2|^a + |\sigma_2 - \sigma_3|^a + |\sigma_3 - \sigma_1|^a = 2\sigma_{\text{экв}}^a, \tag{6}$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – главные напряжения.

Общепринятые условия текучести Треска ($a = 1$) и Мизеса ($a = 2$) являются частными и предельными случаями обобщенной модели Хосфорда. При $a > 4$ кривая текучести лежит между предельными условиями текучести и стремится к условию текучести Треска при $a \to \infty$(рис.1).

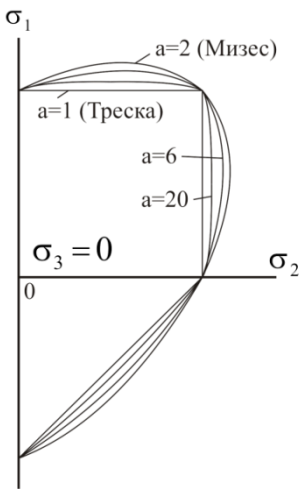


Рис. 1. Кривая текучести Хосфорда $|\sigma_1 - \sigma_2|^a + |\sigma_2 - \sigma_3|^a + |\sigma_3 - \sigma_1|^a = 2\sigma_{\text{экв}}^a$ для различных значений степени a

Накопленная пластическая деформация при условии, что упрочнение развивается во всех направлениях одинаково (изотропное упрочнение), определяется функцией текучести следующего вида:

$$f = \sigma_{\text{экв}} - \bar{\sigma}(\bar{\varepsilon}) = 0, \tag{7}$$

где $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ – зависимость, характеризующая меру упрочнения материала (условие упрочнения). При допущении о независимости данной функции от вида напряженного состояния (гипотеза единой кривой) используется истинная диаграмма деформирования материала, получаемая при испытаниях на растяжение стандартных цилиндрических образцов.

Основные уравнения теории пластического течения с изотропным упрочнением, устанавливающие связь между приращениями напряжений и деформаций в упругопластической области, и методы решения физически нелинейных задач с помощью МКЭ, можно встретить, например в монографии [11].

При решении поставленной задачи численными методами одной из проблем является выбор параметров итерационной процедуры (приращения по нагрузке и количества шагов итерационного процесса) для получения корректного решения. В результате проведения серии расчетов с помощью МКЭ оказалось, что приемлемые результаты получены при задании нагрузки отдельными приращениями величиной 2% от предполагаемого критического значения частоты вращения и организации итерационного процесса модифицированным методом Ньютона-Рафсона за несколько (от трех до пяти) шагов.

Результаты экспериментальных исследований

Для получения условия упрочнения, т.е. зависимости $\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ была проведена серия испытаний на разрыв стандартных цилиндрических образцов (всего было испытано десять образцов по методу [12]), где измерялись деформации рабочей части с помощью экстензометра. Заготовки под образцы были вырезаны из прибыльной части модельного диска, температура испытаний – $T = 20°\text{C}$. (рис.2).

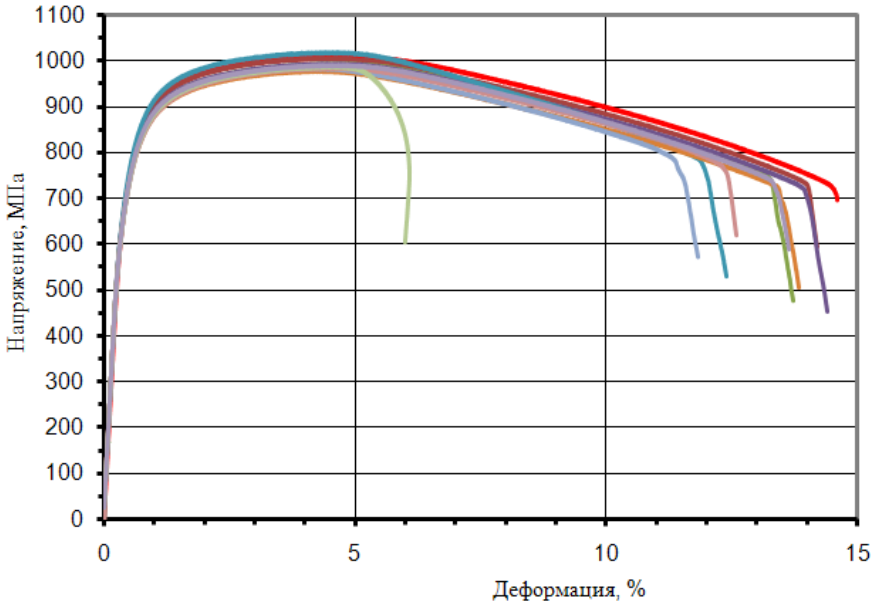


Рис. 2. Диаграммы растяжения жаропрочного деформируемого сплава

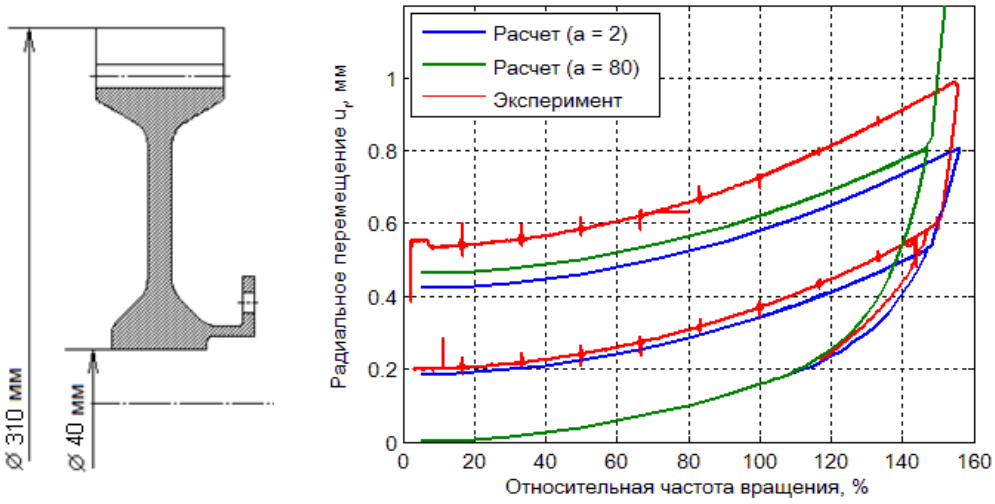
$\bar{\sigma}(\bar{\varepsilon})$ была получена из средней диаграммы растяжения в предположении постоянства объема материала до и после пластического деформирования [13]:

$$\sigma = \bar{\sigma}(1 + \bar{\varepsilon}), \tag{8}$$

$$\varepsilon = \ln(1 + \bar{\varepsilon}). \tag{9}$$

Испытания модельного диска (рис.3а) проводились в два этапа: на первом этапе относительная частота вращения составила $n_1/n_{\max} = 147\%$, на втором – $n_2/n_{\max} = 156\%$, где $n_{\max}$ – принятая за 100% частота вращения диска. После каждого этапа нагружения производился останов. Температура диска до и после испытаний составляла $20°\text{C}$.

Для определения параметров модели материала был разработан и использован экспериментальный метод определения в темпе нагрузка-разгрузка радиальных перемещений модельного диска при испытании на разгонном стенде. Метод основан на измерении вихретоковыми датчиками (использовалось два датчика, расположенных диаметрально) перемещений ободной части дисков (u_r).



а) б)

Рис. 3. Эскиз модельного диска (а) и сопоставление расчетных и экспериментальных данных (б)

Сопоставление результатов расчетного прогнозирования радиальных перемещений диска при условии текучести Мизеса ($a = 2$) и условии, близкому к Треска ($a = 80$), с экспериментальными данными показано на рис.3б.

Оказалось, что экспериментальная зависимость лежит ближе к условию текучести Мизеса, а проведенные исследования позволили установить, что при показателе степени $a = 6$ расчетные и экспериментальные данные по u_r соотносятся наилучшим образом.

Проведенная работа подтверждает обоснованность использования основополагающих гипотез теории пластического течения и может являться основой для совершенствования методов оценки несущей способности роторных деталей ГТД.

Заключение

1. Предложен метод экспериментального и расчетного исследования поверхности нагружения материалов дисков ГТД при проведении разгонных испытаний модельных дисков на разгонном стенде.

2. Экспериментальное исследование поверхности нагружения проводилось с помощью определения в темпе нагрузка-разгрузка зависимости радиальных перемещений ободной части модельного диска u_r от частоты вращения.

3. Результаты численного моделирования разгонных испытаний модельного диска из жаропрочного деформируемого сплава показали, что при использовании в теории пластического течения с изотропным упрочнением критерия текучести Мизеса расчетные дан-

ные лежат ближе к экспериментальным данным. В случае использования критерия текучести, близкому к Треска ($a = 80$ в условии текучести Хосфорда), расхождение данных значительно увеличивается.

4. При исследовании поверхности нагружения было установлено, что при показателе степени $a = 6$ в уравнении Хосфорда расчетные и экспериментальные данные соотносятся наилучшим образом.

5. Проведенная работа показала обоснованность использования основополагающих гипотез теории пластического течения при оценке несущей способности роторных деталей ГТД. Дальнейшие работы будут направлены на расширение количества исследуемых материалов, анализ разброса свойств материалов и исследования различных критериев предельного состояния.

Список литературы

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф. Термопрочность деталей машин. М.: Машиностроение, 1975. 454 с.
2. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчет на прочность вращающихся дисков. М.: Машиностроение, 1978. 274 с.
3. Качанов Л.М. Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969. 420 с.
4. Горохов М.Ю., Гецов Л.Б., Кутырев В.В., Голубовский Е.Р. Расчетно-экспериментальное исследование несущей способности модельных вращающихся дисков // Труды СПбГПУ № 489. Механика материалов и прочность конструкций. 2004. С. 194-200.
5. Михайлов А.Л. Проектирование и вибродиагностика деталей ГТД на основе исследования объемного напряженно-деформированного состояния. Рыбинск: РГАТА, 2005. 216 с.
6. Каримбаев К.Д., Серветник А.Н. Численное моделирование разгонных испытаний дисков турбомашин // Вестник двигателестроения. 2008. № 3. С. 130-134.
7. Бирфельд А.А., Волгин А.В. Верификация инженерной методики компьютерного моделирования разгонных испытаний дисков компрессоров ГТД // Двигатель. 2011. № 5. С. 28-29.
8. Maziere M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., Vogel F. Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks. Part I: Analytical and numerical stability analysis // European Journal of Mechanics A/Solids. 2009. Vol. 28, no. 1. P. 36-44. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2008.07.008
9. Maziere M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., Vogel F. Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks. Part II: Burst of a superalloy turbine disk // European Journal of Mechanics A/Solids. 2009. Vol. 28, no. 3. P. 428-432. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2008.10.002
10. Hosford W. Mechanical behavior of materials. Cambridge University Press, 2005. 531 p.

11. Морозов Е.М., Никишков Г.П. Метод конечных элементов в механике разрушения. 2-е изд., испр. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 256 с.
12. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. М.: Стандартинформ, 2005. 24 с.
13. Надаи А. Пластичность и разрушение твердых тел: пер. с англ. В 2 т. Т. 1. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. 648 с.

SCIENTIFIC PERIODICAL OF THE BAUMAN MSTU

SCIENCE and EDUCATION

EL № FS77 - 48211. №0421200025. ISSN 1994-0408

electronic scientific and technical journal

Yield surface investigation of alloys during model disk spin tests

05, May 2014

DOI: 10.7463/0514.0710005

E. P. Kuzmin, A. N. Servetnik

Central Institute of Aviation Motors, 111116, Moscow, , Russian Federation

servetnik@ciam.ru

evgeny_kuzmin@ciam.ru

Gas-turbine engines operate under heavy subsequently static loading conditions. Disks of gas-turbine engine are high loaded parts of irregular shape having intensive stress concentrators wherein a 3D stress strain state occurs. The loss of load-carrying capability or burst of disk can lead to severe accident or disaster. Therefore, development of methods to assess deformations and to predict burst is one of the most important problems.

Strength assessment approaches are used at all levels of engine creation. In recent years due to actively developing numerical method, particularly FEA, it became possible to investigate load-carrying capability of irregular shape disks, to use 3D computing schemes including flow theory and different options of force and deformation failure criteria. In spite of a wide progress and practical use of strength assessment approaches, there is a lack of detailed research data on yield surface of disk alloys. The main purpose of this work is to validate the use of basis hypothesis of flow theory and investigate the yield surface of disk alloys during the disks spin test.

The results of quasi-static numerical simulation of spin tests of model disk made from high-temperature forged alloy are presented. To determine stress-strain state of disk during loading finite element analysis is used. Simulation of elastic-plastic strain fields was carried out using incremental theory of plasticity with isotropic hardening. Hardening function was taken from the results of specimens tensile test. Specimens were cut from a sinkhead of model disk. The paper investigates the model sensitivity affected by V.Mises and Tresca yield criteria as well as the Hosford model. To identify the material model parameters the eddy current sensors were used in the experimental approach to measure rim radial displacements during the load-unload of spin test. The results of calculation made using different material models were compared with the experimental results.

A good agreement of numerical and experimental data has been shown in case of using V.Mises yield criteria.

Publications with keywords: FEM, theory of plasticity, drive, yield surface
Publications with words: FEM, theory of plasticity, drive, yield surface

References

1. Birger I.A., Shorr B.F. *Termoprochnost' detaley mashin* [Thermal strength of machine parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1975. 454 p. (in Russian).
2. Dem'yanushko I.V., Birger I.A. *Raschet na prochnost' vrashchayushchikhsya diskov* [Stress calculation of rotating disks]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 274 p. (in Russian).
3. Kachanov L.M. *Osnovy teorii plastichnosti* [Fundamentals of theory of plasticity]. Moscow, Nauka Publ., 1969. 420 p. (in Russian).
4. Gorokhov M.Yu., Getsov L.B., Kutyrev V.V., Golubovskiy E.R. [Numerical and experimental research of bearing capacity of model rotating disks]. *Trudy SPbGPU no. 489. Mekhanika materialov i prochnost' konstruktsiy* [Proceedings of SPbSPU № 489. Mechanics of materials and strength of constructions], 2004, pp. 194-200. (in Russian).
5. Mikhaylov A.L. *Proektirovanie i vibrodiagnostika detaley GTD na osnove issledovaniya ob"emnogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Designing and vibrodiagnostics of GTE parts based on research of three-dimensional stress-strain state]. Rybinsk, RGATA Publ., 2005. 216 p. (in Russian).
6. Karimbaev K.D., Servetnik A.N. [Numerical simulation of overspeed tests of disks of turbomachines]. *Vestnik dvigatelestroeniya*, 2008, no. 3, pp. 130-134. (in Russian).
7. Birfel'd A.A., Volgin A.V. [Verification of engineering techniques of computer simulation of overspeed tests of disks of GTE compressors]. *Dvigatel'*, 2011, no. 5, pp. 28-29. (in Russian).
8. Maziere M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., Vogel F. Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks. Part I: Analytical and numerical stability analysis. *European Journal of Mechanics A/Solids*, 2009, vol. 28, no. 1, pp. 36-44. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2008.07.008
9. Maziere M., Besson J., Forest S., Tanguy B., Chalons H., Vogel F. Overspeed burst of elastoviscoplastic rotating disks. Part II: Burst of a superalloy turbine disk. *European Journal of Mechanics A/Solid*, 2009, vol. 28, no. 3, pp. 428-432. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2008.10.002
10. Hosford W. *Mechanical behavior of materials*. Cambridge University Press, 2005. 531 p.
11. Morozov E.M., Nikishkov G.P. *Metod konechnykh elementov v mekhanike razrusheniya* [The finite element method in fracture mechanics]. Moscow, LKI Publ., 2008. 256 p. (in Russian).

12. *GOST 1497-84. Metally. Metody ispytaniy na rastyazhenie* [State Standard 1497-84. Metals. Methods of tension test]. Moscow, Standartinform Publ., 2005. 24 p. (in Russian).
13. Nadai A. *Theory of Flow and Fracture of Solids. Vol. 1*. McGraw-Hill, New-York, 1950. (Russ. ed.: Nadai A. *Plastichnost' i razrushenie tverdykh tel. V 2 t. T. 1*. Moscow, Publishing house of foreign literature, 1954. 648 p.).