

УДК 621.438.226+539.4

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОЦЕНИВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДИСКОВ ИЗ ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

© 2015 В. В. Кутырёв

Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова, г. Москва

Рассмотрены результаты разгонных испытаний модельных и натуральных дисков из титановых сплавов. Для дисков, разрушившихся по меридиональной схеме и по цилиндрической схеме, в выборках модельных и натуральных конструкций с отверстиями в полотне и без них, были определены параметры статистического распределения относительной прочности дисков. Показано, что в выборках модельных и натуральных дисков с отверстиями в полотне и без них при разрушении по меридиональному сечению средние значения относительной прочности дисков равны, что свидетельствует о незначимом влиянии на относительную прочность дисков типа рассмотренных конструкций и наличия отверстий. В выборках дисков с отверстиями в полотне и без них, разрушившихся по цилиндрической схеме, средние величины относительной прочности дисков также равны, что свидетельствует о незначимом влиянии на относительную прочность дисков отверстий. В выборках дисков, разрушившихся по меридиональной схеме и по цилиндрической схеме, средние значения относительной прочности дисков не равны, что свидетельствует о значимом влиянии на относительную прочность дисков схемы разрушения. Результаты могут быть использованы для прогнозирования запасов по разрушающей частоте вращения дисков.

Среднее значение, меридиональная и цилиндрическая схемы разрушения, относительная прочность, модельные и натурные диски, титановые сплавы.

doi: 10.18287/2412-7329-2015-14-3-65-70

На стадии проектирования турбомашин основной характеристикой несущей способности дисков является разрушающая частота вращения, которую можно оценить на основе теории предельного равновесия, предполагающей идеальное выравнивание напряжений в момент разрушения и равенство нормальных напряжений пределу кратковременной прочности материала во всех точках рассматриваемого критического сечения [1]. Однако известный расчётный метод не может в полной мере учесть многообразия факторов, влияющих на несущую способность дисков. В наиболее ответственных случаях для дисков сложных конструкций и дисков из новых материалов, согласно требованиям нормативных документов, необходимо проводить разгонные испытания. В этом случае испытания проводятся на единичных экземплярах, и оценить закономерности несущей способности дисков не представляется возможным.

В настоящей работе рассмотрены результаты разгонных испытаний ряда модельных и натуральных дисков из титановых сплавов ВТ8, ВТ9, ВТ18У, ВТ25У,

ВТ22. Рассматривались модельные и натурные диски с отверстиями в полотне и без них, разрушившиеся по меридиональной и по цилиндрической схеме. Не рассматривались хрупкие разрушения, как правило, начинающиеся от концентраторов напряжений.

Несущую способность дисков по результатам разгонных испытаний можно оценить относительной прочностью дисков (степенью отклонения фактической разрушающей частоты вращения дисков n_3 относительно величины, рассчитанной на основе теории предельного равновесия):

$$\alpha_{n1} = n_3 / n_1,$$

$$\alpha_{n2} = n_3 / n_2,$$

где n_1 и n_2 – значения разрушающих частот вращения диска, рассчитанные методом предельного равновесия при потере несущей способности по меридиональной и цилиндрической схеме соответственно (с использованием средних значений пределов кратковременной прочности материала). Использование коэффициента относительной прочности дисков позволяет

обобщить результаты разгонных испытаний модельных и натуральных конструкций.

Целью настоящей работы является статистическая оценка относительной прочности дисков в связи с их конструктивными отличиями и разными схемами разрушения.

Экспериментальная часть исследований дисков из сплава ВТ9 состояла в проведении разгонных испытаний трёх групп модельных дисков, изготовленных деформированием в разных областях (β и $\alpha + \beta$ - фазовый состав структуры материала дисков) и подвергнутых термообработке по различным режимам. Эскиз диска представлен на рис. 1, а.

Экспериментальная часть исследований дисков из сплава ВТ8 гранульной технологии (далее ВТ8П) состояла в проведении разгонных испытаний двух модельных дисков до разрушения. Модельные диски из сплава ВТ8П имели конструктивные отличия от дисков из

сплава ВТ9: в зоне центрального отверстия выполнено утолщение диска (рис. 1, б). Особенностью дисков является наличие внутренних дефектов материала типа инородных включений.

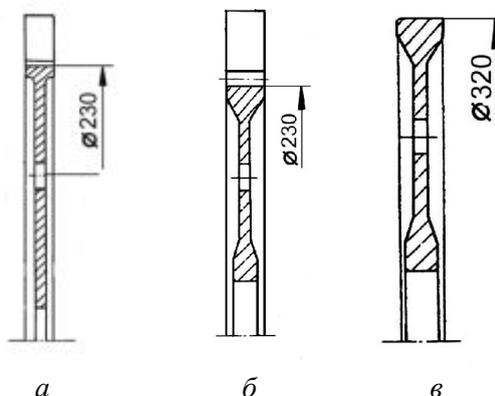


Рис. 1. Эскизы модельных дисков из титановых сплавов: а – ВТ9; б – ВТ8П; в – ВТ25У

Экспериментальная часть исследований модельных дисков из сплава ВТ25У состояла в разгонных испытаниях семи дисков. Результаты разгонных испытаний модельных дисков, изготовленных из титановых сплавов, представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты разгонных испытаний модельных дисков из титановых сплавов

Сплав	Технология	Наличие отверстий	n_9 , об/мин	α_n
ВТ9 1 группа	$\alpha + \beta$ - деформ. Стандартный режим т.о.	10 отв.	29200	1,018
			27500	0,959
			26500	0,924
ВТ9 2 группа	β -деформация Стандартный режим т.о.	нет	28350	0,957
		10 отв.	28500	0,992
			25800	0,898
ВТ9 3 группа	β -деформация регламент. режим т.о.	нет	27000	0,966
		10 отв.	24800	0,916
			26300	0,972
			24100	0,891
ВТ25У	Регламент. режим т.о.	нет	41000	0,939
		10 отв.	39500	0,965
			36000	0,96
			20 отв.	37600
		37000		0,909*
		31250		0,862*
		30950		0,854*
ВТ8П	Гранульной технологии	6 отв.	28800	0,970
		12 отв.	29400	1,01*

*Разрушение по цилиндрической схеме

Исследована несущая способность дисков натуральных конструкций.

Из сплава ВТ8 изготовлены диски: первых степеней компрессора низкого давления (КНД) №1 (рис. 2, а) и №2 и диск турбины высокого давления (ТВД) №6 (рис. 2, б).

Диски №3–5 первой и второй ступеней КНД были испытаны в связи с исследованиями сплава ВТ22.

Диски компрессора высокого давления (КВД) были изготовлены из сплава ВТ18У путём электронно-лучевой сварки полотна с ободом и ступицей (рис. 2, в). Испытано 3 диска.

Результаты разгонных испытаний натуральных дисков представлены в табл. 2.

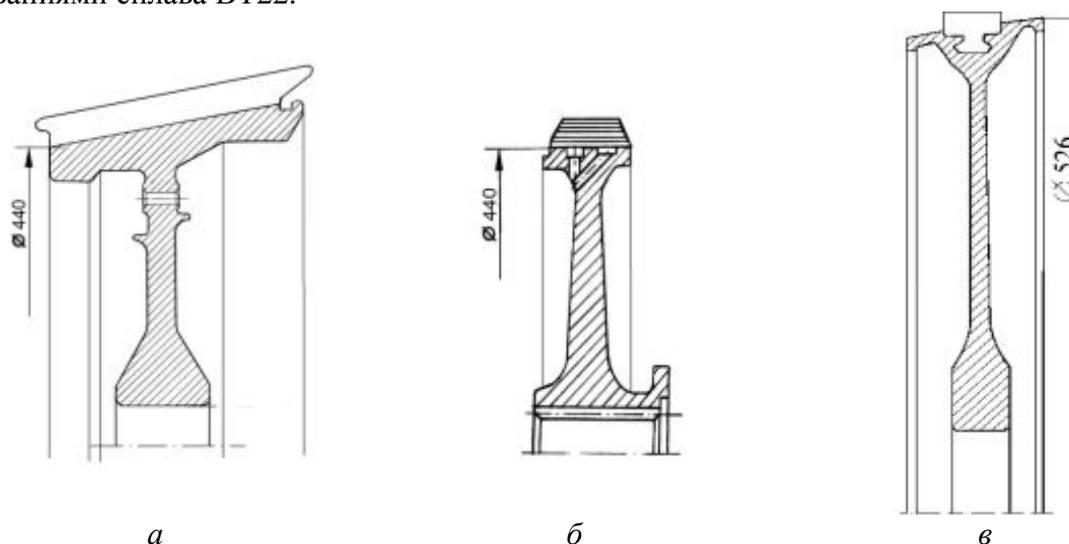


Рис. 2. Эскизы дисков натуральных конструкций: а – №1 1-й ст. КНД; б – №6 турбины; в – №7–9 КВД

Таблица 2. Результаты разгонных испытаний натуральных дисков из титановых сплавов

№	Диск	Сплав	Концентраторы напряжений	n_z	α_n
1	1 КНД	ВТ8	Отверстия в полотне Острые надрезы в зоне галтели	9240	0,937**
2			Отверстия в ободу Галтель сопряжения обода и полотна	9800	0,885*
3		ВТ22	Отверстия в полотне	57900	>0,949
4	51230			0,890	
5	2 КНД			59200	>0,970 0,949**
6	ТВД	ВТ8	Отверстия в ободу, шлицы в ступице	18750	0,995
7	КВД	ВТ18У	Сварные соединения обода и ступицы с полотном	22000	0,954 0,935*
8				18950	0,930 0,918*
9				19600	0,952 0,940*

* Разрушение по цилиндрической схеме.

** Разрушение по цилиндрической схеме не по отверстиям.

Для дисков, разрушившихся по меридиональной и цилиндрической схемам, в выборках модельных и натуральных конструкций с отверстиями в полотне и без них

были определены средние значения ($\bar{\alpha}_n$) и средние квадратические отклонения (s_a) относительной прочности дисков. Статистические оценки приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты статистической обработки данных разгонных испытаний модельных и натуральных дисков

Конструктивные особенности	Схема разрушения	Количество испытаний	Сплав	$\bar{\alpha}_n$	s_a
Модельные диски с отверстиями в полотне	Меридиональная по отверстиям	10	BT9 BT25Y	0,950	0,041
Натурные диски с отверстиями в полотне и ободе, шлицами в ступице	Меридиональная по отверстиям	4	BT8 BT22	0,951	0,044
Модельные и натурные диски без отверстий в полотне и ободе	Меридиональная	6	BT9 BT25Y BT18Y	0,950	0,013
Модельные и натурные диски с отверстиями в полотне и ободе	Меридиональная по отверстиям	14	BT9 BT25Y BT8 BT22	0,950	0,040
Модельные и натурные диски с отверстиями и без отверстий в полотне	Меридиональная	20	BT9 BT25Y BT8 BT22 BT18Y	0,950	0,034
Модельные и натурные диски с отверстиями и без отверстий в полотне	Цилиндрическая не по отверстиям	6	BT8 BT22 BT18Y	0,927	0,021
Натурный и модельные диски с отверстиями в полотне	Цилиндрическая по отверстиям	5	BT25Y BT22	0,894	0,033
Модельные и натурные диски с отверстиями и без отверстий в полотне	Цилиндрическая	11	BT8 BT22 BT18Y BT25Y	0,912	0,031

Анализ данных, приведённых в табл. 3, выявил некоторые закономерности относительной прочности дисков. При этом с помощью t -критерия Стьюдента проверено равенство средних значений рассмотренных выборок. Равенство дисперсий проверялось с помощью критерия Фишера [2].

Для титановых сплавов BT8, BT9, BT18Y, BT25Y, BT22 подтверждено равенство средних значений в выборках модельных и натуральных дисков, а также в выборках дисков с отверстиями в полотне и без них при разрушении по меридиональному сечению, что свидетельствует о не-

значимом влиянии на относительную прочность дисков типа рассмотренных конструкций и наличия отверстий. Значения среднего и среднего квадратического отклонений относительной прочности дисков, объединённых в одну выборку, составили $\bar{\alpha}_{n1} = 0,95$, $s_a = 0,034$ соответственно.

При разрушении дисков по цилиндрической схеме по отверстиям и не по отверстиям средние величины относительной прочности дисков равны, что свидетельствует о незначимом влиянии на относительную прочность дисков отверстий. Значения среднего и среднего квад-

ратического отклонений относительной прочности дисков составили $\bar{\alpha}_{n2} = 0,912$, $s_a = 0,031$ соответственно.

В выборках дисков, разрушившихся по меридиональной и цилиндрической схемам, средние значения относительной прочности дисков не равны, что свидетельствует о значимом влиянии на относительную прочность дисков схемы разрушения. Минимальные значения, определённые как $\alpha_n^{\min} = \bar{\alpha}_n - 3s_a$, составили: при разрушении по меридиональной схеме $\alpha_{n1}^{\min} = 0,85$, при разрушении по цилиндрической схеме $\alpha_{n2}^{\min} = 0,82$.

Запас по прогнозируемой минимальной разрушающей частоте вращения

$$K_{\epsilon\omega}^{\min} = \frac{n_{\omega}^{\min}}{n_{\text{раб}}}$$

связан с расчётным запасом по разрушающей частоте вращения следующим образом:

$$K_{\epsilon\omega}^{\min} = \alpha_n^{\min} K_{\epsilon}$$

На основании минимальных значений относительной прочности дисков при разрушении по меридиональной схеме $\alpha_{n1}^{\min} = 0,85$ и при разрушении по цилиндрической схеме $\alpha_{n2}^{\min} = 0,82$ следует, что запасу по прогнозируемой минимальной разрушающей частоте вращения $K_{\epsilon\omega}^{\min} = 1,2$ соответствуют следующие расчётные запасы: при разрушении по меридиональной схеме $K_{\epsilon1} = 1,41$, при разрушении по цилиндрической схеме $K_{\epsilon2} = 1,46$. Эти запасы обеспечивают прочность дисков при выполнении требований «Авиационных правил» при сертификации двигателя, согласно которым с запасом 1,2 на разгонном стенде должны быть испытаны наиболее напряжённые диски с 5-минутной выдержкой. При этом материал дисков должен иметь минимальные значения механических характеристик, а размеры диска – наихудшее сочетание допусков.

Библиографический список

1. Демьянушко И.В., Биргер И.А. Расчёт на прочность вращающихся дисков. М.: Машиностроение, 1978. 247 с.
2. Степнов М.Н., Шаврин А.В. Статистические методы обработки результатов механических испытаний. М.: Машиностроение, 2005. 399 с.

Информация об авторе

Кутырёв Василий Владимирович, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И.

Баранова, г. Москва. E-mail: kem@ciam.ru. Область научных интересов: прочность дисков газотурбинных двигателей.

STATISTICAL ESTIMATION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF TITANIUM ALLOY DISCS

© 2015 V. V. Kutuyev

Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation

The results of overspeed tests of titanium alloy model and full-scale discs are presented in the paper. The parameters of static distribution of the discs' relative strength are determined for the discs destroyed according to the meridian pattern and the cylindrical pattern in samples of model and full-scale structures with and without holes in the casing. It is shown that in samples of model and full-scale discs with or without holes in the body in

the case of fracture along the meridian section the average values of relative disc strength are equal, which indicates insignificant influence of the above-mentioned designs and presence of holes on the relative disc strength. In samples of discs with and without holes destroyed according to the cylindrical pattern the average values of relative disc strength are also equal, which testifies to insignificant influence of holes on the relative disc strength. In disc samples destroyed by the meridian pattern and the cylindrical pattern the average values of relative disc strength are not equal, which testifies to significant influence of the fracture pattern on the relative disc strength. The results can be used for predicting margins on the disc break-up rotation frequency.

Average value, meridian and cylindrical fracture patterns, relative strength, model and full-scale discs, titanium alloys.

References

1. Demyanushko I.V., Birger I.A. *Raschet na prochnost' vrashchayushchikhsya diskov* [Strength calculation of rotating discs]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 1978. 247 p. (In Russ.)
2. Stepanov M.N., Shavrin A.V. *Statisticheskie metody obrabotki rezul'tatov mekhanicheskikh ispytaniy* [Statistical methods of processing mechanical test results]. Moscow: Mashinostroenie Publ., 2005. 399 p. (In Russ.)

About the author

Kutyrev Vasily Vladimirovich, Candidate of Science (Engineering), Senior Researcher, Central Institute of Aviation Motors named after P.I. Baranov, Moscow, Russian Federation. E-mail: kem@ciam.ru. Area of Research: strength of gas turbine engine discs.