

ального типа. Многие из этих решений стали классическими и применяются в современном ракетном двигателестроении.

При выборе схемы и конструировании ЖРД НК-33, НК-43 многократного применения сделана ставка на приобретенный опыт, знания и развитие параметров рабочего процесса, обеспечивающих конкурентоспособность по тяге, удельному импульсу тяги, массе двигателя.

Особое место при выборе конструкторских решений по важнейшим элементам ЖРД НК-33, которые определяют безопасность эксплуатации, занимает принцип авиационного подхода к ним при конструировании и отработке, позволяющий выполнить многократные запуски без снятия двигателя со стенда и осуществить повторные переборки двигателей в цехе с восстановлением исходного качества.

Технологическая система методов повышения надежности ЖРД «НК» включает в себя опережающие исследование запасов по производственно-технологическим факторам, внедрение специальных покрытий для защиты деталей от коррозии и эрозии при многократном применении; дальнейшее совершенствование методов упрочнения деталей методом поверхностного пластического деформирования, методов послеполетного осмотра, очистки, консервации и ремонта деталей.

При серийном производстве ЖРД «НК» создана такая организация сопровождения, которая позволяет выявить технологическую наследственность, критические места и принимать решения по исправлению их путем доработок или новых решений в конструкции.

Эксплуатационная система методов повышения надежности включает совершенствование параметрической диагностики двигателей в процессе их многократной эксплуатации в ракетном комплексе, обработку параметров в темпе полета (работы), реализацию метода эксплуатации ЖРД по техническому состоянию.

СТАТИСТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАПАСОВ ПО РАЗРУШАЮЩЕЙ ЧАСТОТЕ ВРАЩЕНИЯ ДИСКОВ

Кутырев В.В.

ЦИАМ им. П.И. Баранова, г. Москва

Запасы дисков по разрушающей частоте вращения являются одним из основных критериев их прочностной надежности.

Расчетные запасы по разрушающей частоте вращения K_{g1} и K_{g2} (в дальнейшем K_g) определяются следующим образом:

$$K_{g1} = n_1 / n_{\text{раб}}, \quad K_{g2} = n_2 / n_{\text{раб}}, \quad (1)$$

где n_1 - расчетная частота вращения диска при его разрушении по мери-

диональному сечению;

n_2 - расчетная частота вращения диска при его разрушении по цилиндрическому сечению;

$n_{\text{раб}}$ - максимально возможная рабочая частота вращения.

Экспериментальный запас по разрушающей частоте вращения определяется как

$$K_{\text{вз}} = n_2 / n_{\text{раб}}, \quad (2)$$

где n_2 - экспериментальная разрушающая частота вращения.

В настоящее время нормируемые запасы $[K_{\text{вз}}]$ и $[K_{\text{с}}]$ являются детерминированными величинами, которые не учитывают неодинаковые для разных материалов и конструкций соотношения между экспериментальными и расчетными значениями разрушающих частот вращения (n_2/n_p) и их рассеяние. Более обосновано использование в качестве нормативной характеристики статистической запас прочности [1].

Накопленный объем результатов разгонных испытаний дисков турбин и компрессоров, изготовленных из никелевых сплавов литьем, деформацией слитка и гранульным методом (число испытанных экземпляров $N = 96$) позволил в качестве такого статистического запаса предложить запас по минимальной разрушающей частоте вращения

$$K_{\text{вmin}} = n_{\text{min}} / n_{\text{раб}}, \quad (3)$$

где n_{min} - разрушающая частота вращения, определяемая по результатам разгонных испытаний выборки дисков, соответствующая нижнему толерантному пределу распределения величин n_2 .

Для дисков аналогичных конструкций значение n_{min} определяется как:

$$n_{\text{min}} = n_p a_{\text{min}}, \quad (4)$$

где n_p - расчетная разрушающая частота вращения рассматриваемого диска (меньшая из двух расчетных значений n_1 или n_2);

a_{min} - минимальное значение отношения n_2/n_p , определяемое по результатам разгонных испытаний дисков - прототипов (дисков аналогичных конструкций, материалов и технологий) следующим образом:

$$a_{\text{min}} = a_{\text{ср}} - K(N, P, \gamma) S_a, \quad (5)$$

где $a_{\text{ср}}$ - среднее значение отношения n_2/n_p , полученное для совокупности дисков, имеющих конструктивные и технологические особенности, характерные для проектируемого диска;

K - толерантный коэффициент, учитывающий вероятность разрушения диска P , доверительную вероятность γ и число испытанных экземпляров N ;

S_a - среднее квадратическое отклонение величины a .

Таким образом, запас $K_{\text{вmin}}$ можно рассматривать как критерий прочности дисков, определяемый с учетом параметров статистического распределения результатов разгонных испытаний ($a_{\text{ср}}$ и S_a), числа испы-

таных экземпляров, вероятности разрушения и доверительной вероятности.

Ниже рассмотрены некоторые совокупности дисков разных конструкций, изготовленных из никелевых сплавов разными методами, и кривые распределения разрушающих частот вращения, взятых в процентах от расчетной величины ($a = n_s / n_p, \%$). Характерные особенности дисков и объемы выборок представлены в табл. 1.

Расчетные значения разрушающих частот вращения определялись с использованием теории предельного равновесия, за характеристику прочности материала принимались средние значения пределов кратковременной прочности (σ_0).

Таблица 1
Конструктивные и технологические особенности дисков из никелевых сплавов.

№ совокупности	Типы дисков Размеры по наружному диаметру	Технологии изготовления	Марки сплавов	Уровень пластичности $\delta, \%$
1	2	3	4	5
1	1. Диски турбин и компрессоров 2. Модельные диски $\varnothing 128 \dots 870$	Деформация слитка и гранулярная металлургия	ЭИ437БУ ЭИ698ВД ЭП742ИД ЭК79ИД ЭП741П ЭП741НП ЭП962ИД ЭП962П	10-28
2	1. Диски турбин с центральным отверстием и ступицей 2. Диски турбин с радиальными отверстиями у ступицы $\varnothing 280 \dots 734$	—	ЭИ698ВД ЭП742ИД ЭК79ИД ЭП741П ЭП741НП	12-28 24-28
3	1. Диски компрессоров 2. Тонкие диски турбин 3. Диски турбин без центрального отверстия 4. Модельные диски $\varnothing 128 \dots 870$	—	ЭИ437БУ ЭИ698ВД ЭП741П ЭП741НП ЭП962ИД ЭП962П	10-28
4	1. Диски турбин с радиальными отверстиями у ступицы 2. Диски турбин с острыми надрезами, трещинами или дефектами в ободе $\varnothing 128 \dots 544$	—	ЭИ698ВД ЭП742ИД ЭП741НП ЭП962ИД	10-20

1	2	3	4	5
5	Тонкие диски с центральным отверстием и ступицей [2] Ø 186	Литье	ЭП202Л	15
6	Сплошные диски (профиль меридионального сечения, близкий к равнопрочному) Ø 190	Литье по выплавляемым моделям	ЖСЗ-ДКВИ	10-16
7	Диски турбин с центральным отверстием и ступицей [2] Ø 345	Литье	ЖСЗ-ДК	2-4

Предварительный анализ результатов испытаний, указанных выше выборок показал целесообразность рассмотрения дисков, изготовленных деформацией слитка и гранульным методом, отдельно от дисков, изготовленных литьем. Совокупность дисков, изготовленных деформацией из слитка и методом гранульной металлургии, образовала выборку $N = 60$ экземпляров, литые диски – 36 экземпляров. (Данные получены в ЦИАМ, МНПО «Сатурн», ИПП Украины, НПО «Машпроект» и др. ОКБ).

Кривая распределения значений a для первой совокупности построена на рис.1 на нормально-вероятностной сетке. Среднее значение a_{cp} для этой совокупности составило 87%, среднее квадратическое отклонение $S_a = 3,3\%$.

Анализ полученной кривой и особенностей дисков, соответствующих разным участкам кривой 1, показал, что ее нижний, средний и верхний участки относятся к дискам, имеющим конструктивные отличия, обуславливающие возможность разделения общей совокупности дисков по крайней мере на три отдельные совокупности. Результаты такого разделения представлены на рис.2, а характерные особенности дисков приведены в табл.1. При таком разделении средние значения (a_{cp}) в выделенных совокупностях неоднородны, а рассеяние значений (S_a) в каждой из выделенных совокупностей меньше, чем для общей и составляют $S_a = 1,5...2,2\%$.

Анализ результатов разгонных испытаний литых натуральных дисков также показал нецелесообразность объединения всех полученных значений a в единую совокупность. Разные значения a и S_a были получены на дисках разных конструкций как из разных сплавов (ЖСЗ-ДК и ЭП202Л), так и из одного и того же сплава с разной пластичностью (ЖСЗ-ДК и ЖСЗ-ДКВИ). В связи с этим все результаты испытаний литых дисков были представлены тремя отдельными совокупностями, приведенными в

виде кривых распределения значений a на рис.3. Представленные совокупности характеризовались неоднородными значениями a_{cp} и S_a .

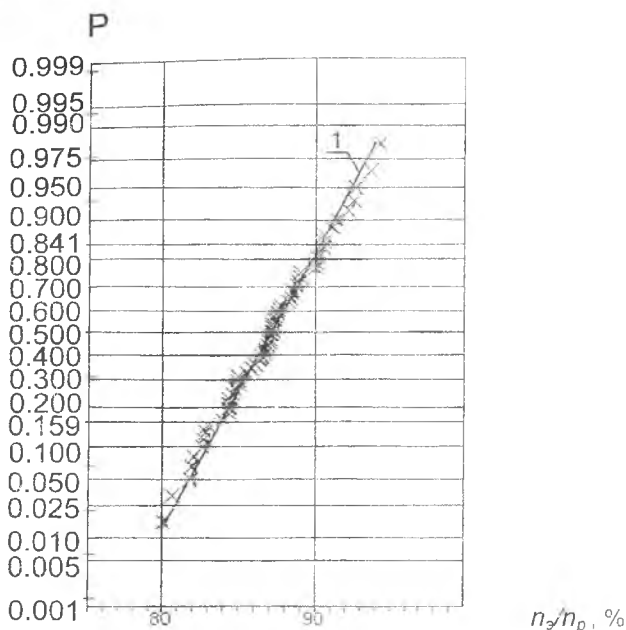


Рис. 1. Кривая распределения $a = n, / p_p$ для общей совокупности дисков из никелевых сплавов, полученных деформацией из слитка и методом гранульной металлургии.

Различие в значениях a и S_a для совокупностей, представленных на рис. 2 и 3, показывает, что равенство детерминированных запасов по разрушающей частоте вращения, используемых в настоящее время для оценки несущей способности дисков, свидетельствует о неодинаковой прочностной надежности дисков разных конструкций, материалов и технологий.

Следовательно, для того чтобы расчетные запасы, используемые на стадии проектирования, обеспечивали одинаковую вероятность разрушения дисков разных групп, необходимо ранжировать их регламентируемые значения в зависимости от принадлежности рассматриваемого диска к соответствующей совокупности.

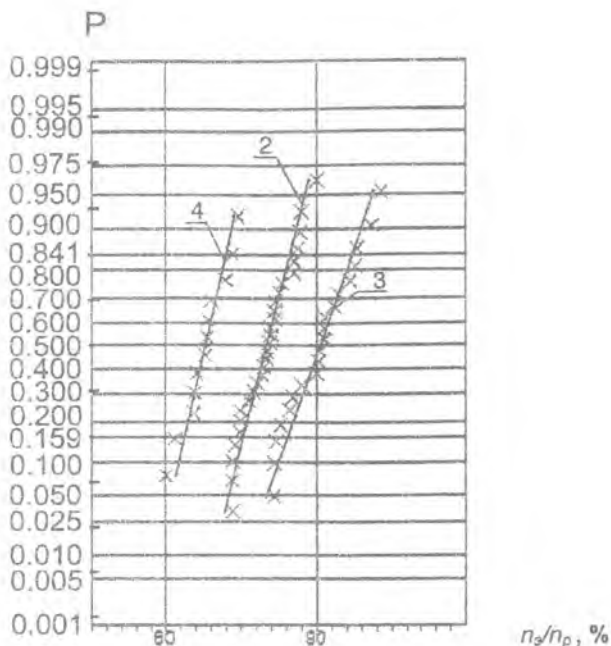


Рис. 2. Кривые распределения значений $a = n_s / n_p$ для дисков из никелевых сплавов. Конструктивные и технологические особенности дисков представлены в табл.1.

Основой ранжирования запасов по разрушающей частоте вращения являются величины a_{cp} и a_{min} и зависимость между K_σ , K_{σ_2} и K_{amin} :

$$K_{\sigma_2} = a_{cp} K_\sigma, \quad (6)$$

$$K_{amin} = a_{min} K_\sigma. \quad (7)$$

В табл. 2 приведены параметры распределения (a_{cp} и S_a), значения толерантных коэффициентов и a_{min} , запасы K_σ и K_{σ_2} , полученные для рассмотренных выше совокупностей дисков. Величины толерантных коэффициентов, принятые для оценки a_{min} в формуле (5) определялись для вероятности разрушения диска $P=0,005$ и доверительной вероятности $\gamma=0,75$. При определении K_σ и K_{σ_2} в качестве детерминированной величины принят запас $K_{amin}=1,2$, что обусловлено требованиями отечественных и зарубежных нормативных документов к обеспечению целостности диска при испытаниях его на разгонном стенде.

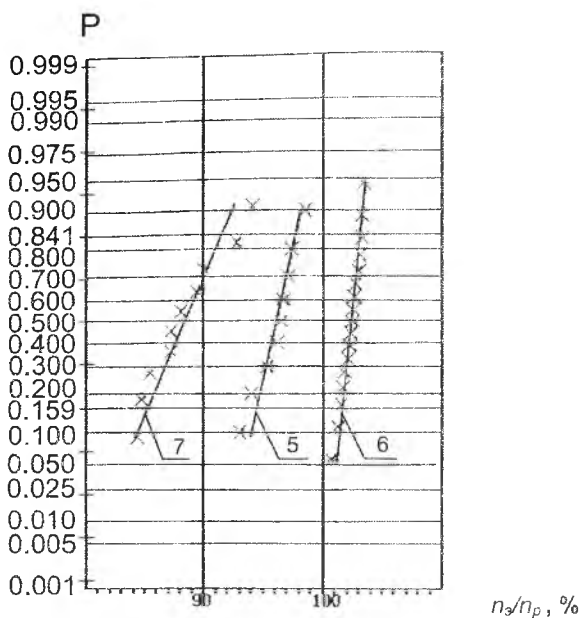


Рис. 3. Кривые распределения значений $\alpha = n_s / n_p$ для литых дисков из никелевых сплавов. Конструктивные и технологические особенности дисков представлены в табл. 1.

Таблица 2
 Параметры статистического распределения, толерантные коэффициенты и запасы K_σ и K_{σ_2} дисков из никелевых сплавов (конструктивные и технологические особенности дисков приведены в табл. 1)

совокупности	Объем выборки, N	Параметры распределения		Толерантный коэффициент K при $\gamma = 0,75$ $P = 0,005$	Минимальное значение $a_{\min}, \%$	Запасы при $K_{\sigma_{\min}} = 1,2$	
		$a_{\text{ср}}, \%$	S_a			K_σ	K_{σ_2}
1	60	87,1	3,3	2,809	78,0	1,54	1,34
2	28	86,7	1,6	2,920	82,0	1,46	1,27
3	20	90,2	2,2	3,013	83,5	1,44	1,30
4	12	82,6	1,5	3,223	78,0	1,54	1,27
	9	96,2	1,8	3,400	90,0	1,33	1,28
6	17	102,5	0,8	3,069	100,0	1,2	1,23
7	10	88,3	3,5	3,328	77,0	1,56	1,38

Как видно из табл. 2, если использовать в качестве нормативной характеристики запас по минимальной разрушающей частоте вращения ($K_{gmin} \geq 1,2$), то для одной и той же вероятности разрушения дисков, регламентируемые экспериментальные и расчетные запасы могут назначаться различными в зависимости от параметров статистического распределения результатов разгонных испытаний. Так, например, для дисков из никелевых сплавов разных конструкций и технологий изготовления при $K_{gmin} = 1,2$; $\gamma = 0,75$ и $P = 0,005$, допустимые запасы по разрушающей частоте вращения находятся в пределах

$$K_{gs} = 1,23 \dots 1,38,$$

$$K_g = 1,20 \dots 1,56.$$

Выводы. Для обеспечения одинаковой вероятности неразрушения дисков разных конструкций, материалов и технологий целесообразно принимаемые значения запасов по разрушающей частоте вращения (K_g и K_{gs}) ранжировать в зависимости от принадлежности проектируемого диска к одной из типичных совокупностей с использованием параметров статистического распределения (a_{cp} и S_a) значений отношения экспериментальных разрушающих частот вращения к расчетным ($a = n_s / n_p$).

Список литературы

1. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1979.- 702 с.
2. Козлов И.А. и др. Прочность рабочих колес турбомашин. - Киев: Наукова думка, 1972,- 215 с.

ШТРИХИ К ПОРТРЕТУ ГЕНЕРАЛА

Веселов С.И.

Самарский государственный аэрокосмический университет, г. Самара

На фирме Н.Д. Кузнецова я работаю уже 50 лет. Значительную часть этого стажа перед Николаем Дмитриевичем я одновременно выступал в двух ипостасях. Во-первых, как конструктор, а впоследствии начальник отдела в ОКБ, во-вторых, как преподаватель и декан вечернего факультета КуАИ. Так что о генеральном конструкторе мне, как и другим старожилам фирмы, можно было бы написать много различных воспоминаний: о его великом таланте, подвижническом трудолюбии, бескорыстной честности, добропорядочности и о других выдающихся качествах. Но многое уже написано, многое еще напишут профессиональные писатели. Мне бы хотелось кратко изложить лишь несколько эпизодов, добавить, так сказать, некоторые штрихи к портрету Н.Д.