

11 мм. Используемые при расчете зависимости и ОДХ приведены в работе [1]. При проектировании проводилась оптимизация по массе.

Полученный виброизолятор имеет расслоенную жесткость 112 Н/мм и коэффициент $a_n = 1,76$ мм, что близко к данным существующего виброизолятора ДКУ-68-20/15 ($\gamma_n/a_n = 125$ Н/мм, $a_n = 1,8$ мм), однако масса и диаметр УДЗ у него существенно ниже (соответственно 70 г и 54 мм против 133 г и 68 мм).

Библиографический список

1. Лазуткин Г.В. Виброизоляторы на основе материала МР/ Куйбышев. авиац. ин-т. - Куйбышев, 1985. - 150 с. - Деп. в ВИНТИ, №6112-85.
2. Лазуткин Г.В. Упругофрикционные и прочностные характеристики виброизоляторов типа ДКУ из материала МР // Вибрационная прочность и надежность двигателей и систем летательных аппаратов: Сб. науч. тр. - Куйбышев: КуАИ, 1985. - С. 66-72.
3. Хронин Д.В. и др. Основы автоматизированного проектирования двигателей летательных аппаратов. - М.: Машиностроение, 1984. - 183 с.

УДК 621.452.3.037:621.51

Ю.Н.Мальцев, В.А.Зрелов

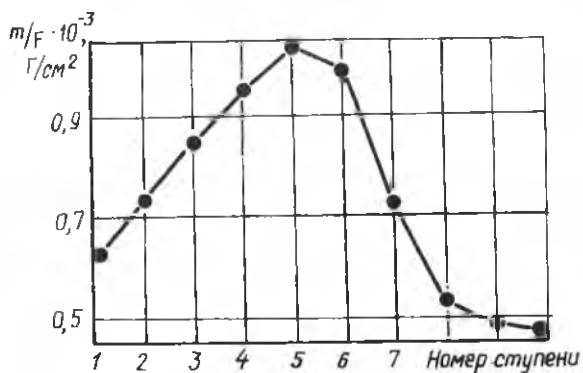
ИССЛЕДОВАНИЕ ОТЛОЖЕНИЙ НА ЛОПАТКАХ КОМПРЕССОРА ВЕРТОЛЕТНОГО ГТД

Эксплуатация вертолетов вблизи промышленных предприятий и с грунтовых площадок приводит к значительному ухудшению характеристик их силовых установок вследствие образования шероховатых отложений на лопатках компрессора. Механизм образования отложений представляет собой сложную картину взаимодействия частиц пыли и сажи с турбулентным пограничным слоем на поверхности лопаток. Осаждению способствуют вторичные течения в межлопаточных каналах и повышенная турбулентность потока. Отложения образуются на спинках лопаток и представляют собой слой сажи с мелкодисперсной пылью, который ухудшает качество их поверхности из-за роста шероховатости.

Учет влияния шероховатости на развитие пограничного слоя и расчет потерь в компрессоре с отложениями на лопатках необходимы при решении вопросов диагностирования загрязненных ГТД. Кроме того, распределение толщины слоя и плотности отложений по ступеням компрессора должно учитываться при разработке эффективных способов очистки его проточной части.

В настоящей работе приводятся результаты исследований массы m плотности ρ , толщины слоя h и микроструктуры отложений, образующихся на лопатках ротора компрессора вертолетного ГТД с номинальной мощностью 883 кВт после отработки 1500 ч.

На рис. 1 представлено распределение массы отложений на лопат-

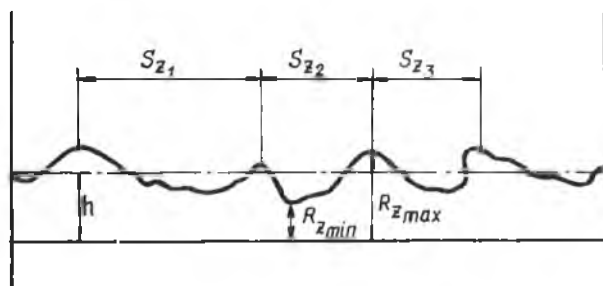


Р и с. 1. Распределение массы отложений на лопатках ротора по ступеням компрессора

нах ротора по ступеням компрессора. Измерение проводилось на аналитических весах *WA-3I* по данным взвешиваний десяти лопаток каждой ступени. Лопатки взвешивали до очистки и после нее, затем рассчитывали осредненную массу отложений, отнесенную к площади F поверхности спинки пера. Из рис. 1 видно, что наиболее загрязненными являются первые семь ступеней компрессора. Такой характер зависимости обусловлен наиболее сильным влиянием вторичных течений на первых ступенях, радиальным зазором в рабочих решетках и интенсивным вихреобразованием потока у лопаток регулируемых направляющих аппаратов.

Исследование микроструктуры рельефа отложений выполнялось на шлифах поперечного разреза пера лопаток каждой ступени. Анализирова-

лись фотографии, полученные на микроскопе МИМ-8 при 240-кратном увеличении. На рис. 2 показана характерная форма рельефа отложений, образующихся на спинке профиля пера лопатки первой ступени ротора. Они



Р и с. 2. Микроструктура рельефа отложений на лопатках ротора первой ступени ($\times 240$)

представлены в виде темного слоя между эпоксидным клеем, применявшимся при изготовлении шлифов, и поверхностью лопатки. Видно, что отложения имеют развитую шероховатую поверхность со сложной конфигурацией выступов и впадин. Обработка экспериментальных данных позволяет получить осредненную величину толщины слоя отложений $\frac{1}{2}$ для каждой ступени, по которой рассчитывается их плотность. Результаты измерений и расчетные параметры приведены в таблице.

Параметр	Номер ступени									
	I	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$m \cdot 10^{-3}, \text{ г}$	13,6	12,1	10,1	8,30	7,60	6,00	3,50	2,40	2,00	1,60
$F, \text{ см}^2$	22,0	16,3	11,6	8,70	7,20	6,00	4,80	4,50	4,10	3,50
$h, \text{ мкм}$	53,0	42,0	32,5	24,5	18,0	12,5	7,60	4,80	4,00	3,40
$m/F \cdot 10^{-3}, \text{ г/см}^2$	0,62	0,74	0,87	0,95	1,05	1,00	0,73	0,53	0,49	0,46
$\rho, \text{ г/см}^3$	0,12	0,18	0,27	0,38	0,58	0,80	0,96	1,10	1,23	1,35
$R_z, \text{ мкм}$	35,0	22,0	15,1	10,4	7,10	4,80	3,20	2,20	1,60	1,30
$R_{zm}, \text{ мкм}$	6,0	4,7	4,2	3,9	3,7	3,5	3,3	3,1	2,9	2,7
$S_z, \text{ мкм}$	110	76	59	48	40	33	28	25	23	22
N	3,1	3,5	3,9	4,6	5,6	6,9	8,7	11,2	14,4	16,9

Анализ изменения плотности отложений по ступеням компрессора позволяет сделать вывод, что на последних ступенях плотность больше, чем на первых. Увеличение плотности происходит под действием повышенных давления и температуры газа, а также под влиянием активной турбулентной диффузии.

Статистическое описание параметров шероховатости позволяет определить для каждой ступени среднеарифметический размер высоты неровностей R_z (см. таблицу), характеризующийся разностью средних величин пяти наибольших выступов и наибольших впадин на определенной базе.

Шероховатость поверхности вносит существенный вклад в формирование пограничного слоя, который при определенных условиях может реализоваться в квазигладкое течение или режим с полным проявлением шероховатости [1]. Шероховатость не проявляется до тех пор, пока выступы элементов шероховатости утоплены в вязком ламинарном подслое. Это происходит до достижения некоторого критического числа Рейнольдса $Re_{кр} = 100$, вычисленного по величине эквивалентной шероховатости. В работе [2] за величину эквивалентной шероховатости принят параметр R_z . Используя данные о газодинамических параметрах потока и геометрических размерах лопаток вертолетного ГТД, можно рассчитать для каждой ступени допускаемые значения Re_m , при которых проявление шероховатости отсутствует (см. таблицу).

Сравнение полученных величин R_z с расчетными Re_m показывает, что режим с полным проявлением шероховатости для двигателя, имеющего наработку 1500 ч, реализуется на первых шести ступенях компрессора. На этом режиме пульсационное движение в пограничном слое посредством кажущихся напряжений извлекает часть энергии из потенциального потока. Затем эта энергия за счет турбулентной диссипации преобразуется в тепло. Коэффициент трения на шероховатой поверхности при таком режиме течения в несколько раз больше, чем на гидравлически гладкой.

Величина коэффициента трения и характеристики пограничного слоя на шероховатой поверхности, кроме того, зависят от продольного расстояния между вершинами элементов шероховатости и распределения ее по поверхности. В таблице представлены данные о параметре распределения элементов шероховатости N по поверхности. Этот параметр характеризуется отношением среднеарифметического расстояния между вершинами неровностей S_z к величине R_z .

В работе [3] экспериментальным путем получены значения параметра N , при которых возникают различные режимы и структуры течения. Например, при $N \leq 7$ сопротивление поверхности практически постоянно, так как за элементами шероховатости образуются небольшие вращающиеся вихри, которые остаются между ними и не оказывают влияния на течение газа вдали от стенки. Увеличение параметра $N > 7$ приводит к интенсивному росту амплитуды скорости и изменению структуры течения за счет отрыва крупных вихрей и их проникновения в основной поток. Сопротивление такой поверхности увеличивается в 2...2,5 раза. При $N > 16$ происходит постепенное снижение сопротивления поверхности вследствие повторного присоединения потока.

Из таблицы видно, что значения параметра $N > 7$ имеют место на четырех последних ступенях. Однако здесь по параметру R_z режим течения соответствует гидравлически гладкому. Значит, структура турбулентного течения вблизи таких элементов шероховатости соответствует режиму без взаимодействия аэродинамических следов и не зависит от параметра N на всех ступенях компрессора.

Таким образом, исследование микроструктуры рельефа отложений, образующихся на лопатках ротора компрессора вертолетного ГТД после отработки 1500 ч, показывает, что при расчете влияния шероховатости на характеристики пограничного слоя и при оценке коэффициента трения на поверхности лопаток необходимо учитывать параметр R_z , а влиянием параметра N можно пренебречь. Полученные данные о распределении плотности и массы отложений по ступеням компрессора позволяют разработать эффективные способы очистки проточной части компрессора.

Библиографический список

1. Шлихтинг Г. Теория пограничного слоя. - М.: Наука, 1969. - 742 с.
2. Белянин Н.М. Влияние шероховатости поверхности лопаток на течение газа в компрессоре // Тр. ЦИАМ. - М., 1985. - Вып. II 28. - С. 138-149.
3. Штjкель, Хопке, Нурмохаммади. Параметры осредненного турбулентного течения воздуха около шероховатых поверхностей // Тр. Американ. об-ва инж.-мех. Теоретические основы инженерных расчетов. - 1984. - Т. 106, № 4. - С. 153-157.