

Н. Д. СТЕПАНЕНКО, Р. В. ЧУРАЕВ

## О РЕЗОНАНСНОЙ ПРОЧНОСТИ СТЕКЛОПЛАСТИКОВЫХ ЛОПАТОК ГТД

Для обоснованного применения стеклопластиков в конструкции ГТД и, в частности, для лопаток компрессоров необходимо решить большой круг задач, связанных с исследованиями механических свойств материала и прочности натуральных деталей при статическом и динамическом нагружениях.

В статье приводятся экспериментальные данные по исследованию усталостной прочности и демпфирующей способности стеклопластиковых лопаток компрессора, на основе которых дается приближенная оценка резонансной прочности лопаток.

Как известно, резонансная прочность лопаток характеризуется коэффициентом запаса  $n$

$$n = \frac{\sigma_{-1}}{\sigma_g}, \quad (1)$$

где  $\sigma_{-1}$  — предел усталости на выбранной базе испытаний;

$\sigma_g$  — максимальные действующие напряжения, замеренные при тензометрировании.

Не располагая достаточно надежными результатами замеров вибронпряженности стеклопластиковых лопаток на работающих двигателях, произведем оценку резонансной прочности, исходя из предположения, что переменные усилия, вызывающие колебания, одинаковы для металлических и стеклопластиковых лопаток. Это возможно вследствие близости собственных частот стеклопластиковых и металлических лопаток.

Тогда сопоставление прочности лопаток из разных материалов можно вести, оценивая произведение

$$\sigma_{-1} \delta, \quad (2)$$

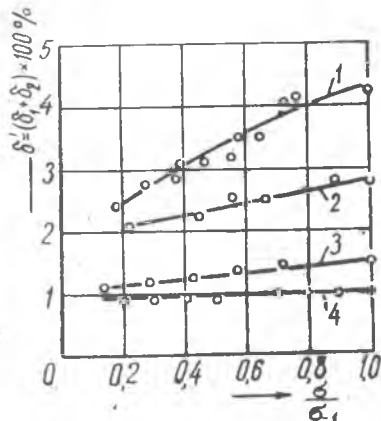
где  $\delta$  — декремент колебаний, характеризующий демпфирующую способность лопаток  $\delta = \delta_1 + \delta_2 + \delta_3$ ;

$\delta_1, \delta_2$  и  $\delta_3$  — декременты колебаний, характеризующие соответственно демпфирование в материале, в замковом соединении и аэродинамическое демпфирование.

На фиг. 1 представлены графики изменения декремента колебаний  $\delta^1 = \delta_1 + \delta_2$  в зависимости от напряжений для лопаток из разных материалов (кривые 1-27-63в «с»; 2-ЭИ-961; 3-ВД-17) и для сопоставления графика (кривая 4) изменения декремента колебаний, характеризующего демпфирующую способность однонаправленного стеклопластика 27—63 в «с» при колебаниях по основной изгибной форме

свободно парящей балки. Данные по демпфирующей способности материала 27—63в «с» получены при испытании образцов, влияние заделки на демпфирование было исключено.

В таблице 1 приведены декременты  $\delta^1$  для напряжений, соответствующих пределу усталости, и данные по усталостной прочности лопаток и материала 27—63 в «с», полученные при испытаниях в нормальных температурных условиях. Значения параметра  $\sigma_{-1} \delta^1$  и отношение  $\frac{\sigma_{-1} \cdot \delta^1}{\sigma_{-1} \cdot \delta^1 (\text{пласт. лоп.})}$  приведены в столбцах 3 и 4 табл. 1.



Фиг. 1.

Материал		$\sigma_{-1} \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2}$	$\delta = \delta_1 + \delta_2$	$\sigma_{-1} \delta^1$
Лопатки	ЭИ-961	45	0,0256	1,15
	ВД-17	14	0,015	0,21
	27—63в«с»	10	0,0428	0,428
Образец 27—63в«с»		20	0,01	0,2

Примечание. Стеклопластиковые лопатки изготовлены методом горячего поперечных слоев в среднем сечении пера 3:1.

Анализ обсуждаемых результатов показывает, что стеклопластиковые лопатки характеризуются повышенной демпфирующей способностью. Вместе с тем, для укладки материала по перу, при которой большинство слоев направлено вдоль оси лопатки, демпфирующая способность  $\delta^1$  стеклопластиковых лопаток лишь в

2,8 раза превосходит демпфирующую способность алюминиевых лопаток и в 1,6 раза — стальных.

Исследование демпфирования образцов из однонаправленного стеклопластика 27—63 в «с» при колебаниях по первой изгибной форме показало, что демпфирование в материале составляет  $\delta_1 = 0,01$ . Значения параметра (2) равны 1,15; 0,21; 0,428 и 0,2 для стальных, алюминиевых, стеклопластиковых лопаток и материала 27—63 в «с», соответственно.

Отсюда следует вывод, что без учета аэродинамического демпфирования стеклопластиковые лопатки при преимущественной однонаправленной укладке слоев материала занимают по резонансной прочности промежуточное положение между алюминиевыми и стальными. При колебаниях лопаток по первой изгибной форме основным видом демпфирования является аэродинамическое. Приближенный расчет декремента колебаний аэродинамического демпфирования можно выполнить по соотношению

$$\delta_3 = 2,18 \frac{\rho \cdot b}{\rho_m \cdot K} \frac{dc_y}{di} \frac{\sin^2(\beta_m + \varphi)}{c_k} \psi, \quad (3)$$

где  $\rho$  — плотность потока;

$\rho_m$  — плотность материала;

$\frac{dc_y}{di}$  — производная от коэффициента подъемной силы по углу атаки;

$\beta_m$  — угол между фронтом решетки и средней геометрической скоростью потока;

$\psi$  — коэффициент формы колебаний;

$c_k$  — толщина корневого сечения лопатки;

Таблица 1

$\frac{\sigma_{-1} \delta'}{(\sigma_{-1} \delta')_{\text{пласт. лоп}}}$	$\delta_3$	$\delta$	$\sigma_{-1} \delta$	$\frac{\sigma_{-1} \delta}{(\sigma_{-1} \delta)_{\text{пласт. лоп}}}$
2,68	0,053	0,0786	3,54	1,37
0,49	0,15	0,0165	2,3	0,89
1,0	0,217	0,2598	2,59	1,0
0,47	—	—	—	—

прессования; отношение числа продольных (параллельных оси лопатки) и  
Пределы усталости получены на базе испытаний  $N = 10^7$ .

$k$  — частотный параметр;

$b$  — хорда;

$\varphi$  — угол между плоскостью колебаний лопатки и фронтом решетки.

Расчетные значения декремента  $\delta_3$  для лопаток из различных

материалов представлены в столбце 5, а значения декремента  $\delta$ , характеризующего суммарную демпфирующую способность лопаток, представлены в столбце 6 табл. 1.

Параметр (2) и отношение  $\frac{\sigma_{-1} \delta}{(\sigma_1 \cdot \delta) \text{ пласт. лоп.}}$  приведены в столбцах 7 и 8 той же таблицы. Сопоставление резонансной прочности стеклопластиковых и металлических лопаток с учетом аэродинамического демпфирования показывает, что вышеприведенные выводы относительно прочности стеклопластиковых лопаток не изменяются.

Оценка резонансной прочности стеклопластиковых лопаток хотя и является приближенной, вместе с тем позволяет сделать ряд полезных выводов, касающихся применения стеклопластика 27—63 в «с» и конструирования стеклопластиковых лопаток:

1. Демпфирующая способность однонаправленного стеклопластика 27—63 в «с» при изгибных колебаниях практически не выше, чем демпфирование в металлах. Вследствие этого следует ожидать, что при умеренных температурах основным видом демпфирования при колебаниях лопаток по первой изгибной форме является аэродинамическое демпфирование.

2. Стеклопластиковые лопатки из материала 27—63 в «с» обладают сравнительно высокой вибрационной прочностью, что позволяет использовать стеклопластик 27—63 в «с» вместо алюминиевых сплавов.

3. Использование стеклопластиковых лопаток в конструкции ГТД связано с необходимостью решения вопроса об оптимальной укладке материала по перу.