

В. П. ИВАНОВ, В. А. ФРОЛОВ

**МЕТОД ДВУХ ПРОБ ДЛЯ ОЦЕНКИ ДЕМПФИРОВАНИЯ
В ЗАМКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЛОПАТОК**

Прямое экспериментальное определение демпфирующих характеристик замковых соединений лопаток турбомашин бывает затруднительным [2], [3], в то время как оценка демпфирующих свойств всей упругой системы лопатка — замок (фиг. 1) особых

трудностей не вызывает. Оценивая демпфирование в системе лопатка — замок, можно оценить и демпфирование в местах крепления лопаток, если для этой цели использовать метод двух проб.

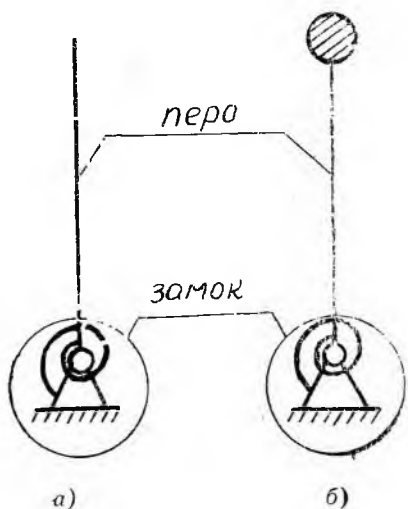
Упругие и демпфирующие характеристики всей системы и ее отдельных частей, в данном случае замок и перо лопатки, связаны следующим энергетическим соотношением:

$$\psi_c = \frac{\psi_z P_z + \psi_n P_n}{P_z + P_n},$$

где ψ_c , ψ_z , ψ_n — коэффициенты рассеяния энергии в системе, заделке и перо лопатки;

P_z , P_n — потенциальные энергии упругой деформации заделки и пера лопатки при колебаниях соответственно.

Коэффициент рассеяния энергии системы ψ_c может быть определен экспериментально по параметрам резонансной кривой или по осциллограммам затухающих колебаний, потенциальная энергия деформации незамковой части системы (в данном случае пе-



Фиг. 1.

ра лопатки Π_n) может быть также определена тем или иным способом, тогда как коэффициент рассеяния замковой части системы ψ_3 и ее потенциальная энергия деформации остаются неизвестными. Если же провести два эксперимента, при которых замковая часть одна и та же и загружена аналогично, а потенциальные энергии деформации незамковой части (пера лопатки) различны и известны, то из соотношений:

$$\psi'_c = \frac{\psi_3 \Pi_3 + \psi'_n \Pi'_n}{\Pi_3 + \Pi'_n},$$

$$\psi''_c = \frac{\psi_3 \Pi_3 + \psi''_n \Pi''_n}{\Pi_3 + \Pi''_n}$$

могут быть найдены коэффициент рассеяния энергии в замковой части лопатки и ее потенциальная энергия

$$\psi_3 = \frac{\frac{\psi'_n - \psi'_c}{\psi'_c} - \frac{\psi''_n - \psi''_c}{\psi''_c} \cdot \frac{\Pi'_n}{\Pi''_n}}{\frac{\psi'_n - \psi'_c}{\psi'_c \psi''_c} - \frac{\psi''_n - \psi''_c}{\psi''_c \psi'_c} \cdot \frac{\Pi'_n}{\Pi''_n}}, \quad (1)$$

$$\Pi_3 = \frac{(\psi''_n - \psi'_n) \cdot \Pi'_n}{\frac{\psi''_n - \psi''_c}{\psi''_c} - \frac{\psi'_n - \psi'_c}{\psi'_c} \cdot \frac{\Pi'_n}{\Pi''_n}} - \frac{\psi'_c}{\frac{\psi'_n - \psi'_c}{\psi'_c \psi''_c} - \frac{\psi''_n - \psi''_c}{\psi''_c \psi'_c} \cdot \frac{\Pi'_n}{\Pi''_n}}, \quad (2)$$

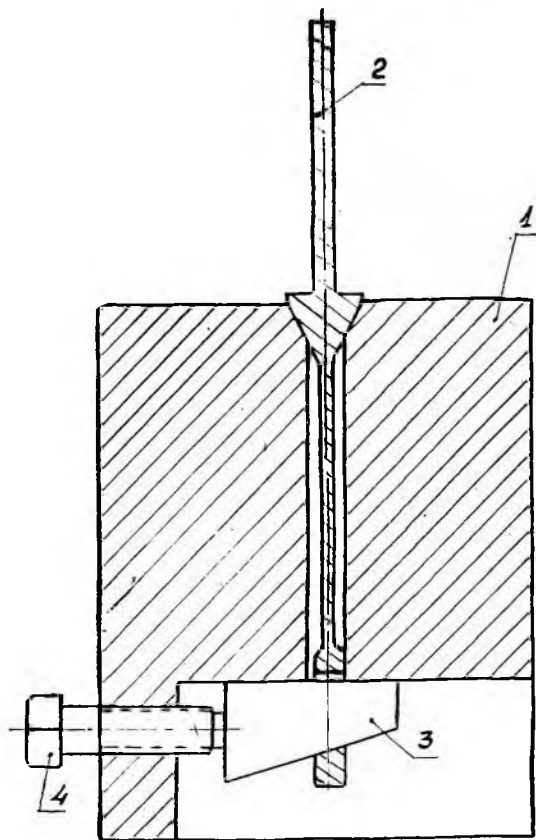
где ψ'_c, ψ''_c — коэффициенты рассеяния энергии в упругих системах, замеренные при первом и втором экспериментах;

ψ'_n, ψ''_n — коэффициенты рассеяния энергии в пера лопатки при первом и втором экспериментах;

Π'_n, Π''_n — потенциальные энергии деформации незамковой части (пера лопатки) при первом и втором экспериментах.

При проведении таких экспериментов необходимо, чтобы в том и другом случаях силовые факторы, действующие в замке, были одинаковыми. Предположим, что действие перерезывающих сил на демпфирование в заделке сказывается несущественно и, что демпфирование замковой части лопатки зависит только от величины момента, прилагаемого к заделке [3], тогда поддерживая неизменным уровень напряжений в лопатке непосредственно у заделки, можно сохранить одинаковые силовые факторы в том и другом экспериментах. Потенциальная энергия деформации замковой части так же, как и рассеяние энергии в замке, будет одинаковой в обоих случаях.

Изменение потенциальной энергии $P_{\text{п}}$ при том же значении момента в заделке может быть достигнуто обрезкой пера лопатки, постановкой сосредоточенной массы на перо лопатки (фиг. 1б) или проведением экспериментов на двух различных формах колебаний. Конкретные значения потенциальной энергии определяются расчетом по замеренному распределению напряжений по длине пера либо по заданному моменту в заделке, если известна форма колебаний лопатки.



Фиг. 2.

Ниже приводятся результаты экспериментального определения рассеяния энергии колебаний в замковом соединении лопаток методом двух проб, выполненных на специальной установке (фиг. 2). В массивном корпусе 1 имеется замковый паз, в который вставляется замок модели лопатки. Лопатка 2 постоянного сечения имеет замок, перевернутый по отношению к перу на 180° и переходящий в тонкую пластину. При помощи винта 4 и клина 3 создается необходимое растягивающее усилие в пластине, вызывающее соответствующие реакции на опорных поверхностях замка. Перед экспериментом пластина тарируется. Выбор такой схемы загрузки замкового соединения позволил имитировать значительные центробежные силы на замок при несложном грузочном устройстве, а использование сравнительно длинной и тонкой пластины с малой жесткостью на изгиб в плоскости колебаний пера свести к минимуму потери энергии в нем. Для исключения рассеяния энергии колебаний через фундамент установка подвешивалась на струнах.

Чтобы получить достоверные результаты по демпфированию в замковой части и проверить их сходимость при двух разных пробах, проводилось три эксперимента, причем в каждом из них изменение потенциальной энергии пера лопатки $P_{\text{п}}$ осуществля-

лось переходом с одной формы колебаний на другую и измением колебательной системы при помощи добавления сосредоточенного груза к перу лопатки (рассеяние энергии на контактных поверхностях замка не зависит от частоты колебаний [4]). Величины потенциальных энергий деформации пера лопатки Π_n , входящие в формулу (1), определялись по экспериментально снятым эпюграмм напряжений. Для этого перо лопатки обклеивалось проволочными тензодатчиками и по ним снималось распределение напряжений по длине пера.

Потенциальная энергия деформации пера лопатки постоянного сечения может быть вычислена по формуле

$$\Pi_n = \frac{\sigma_0^2 W l}{2 E h} \int_0^1 \bar{\sigma}_{(x)}^2 dx, \quad (3)$$

где σ_0 — напряжение в корневом сечении;

W — момент сопротивления изгибу;

l — длина лопатки;

h — расстояние от нейтральной оси сечения до наиболее удаленного волокна;

E — модуль упругости;

$\bar{\sigma}_{(x)}$ — относительное распределение напряжений по длине пера лопатки.

Рассеяние энергии колебаний в упругой системе ψ_c определялось по ширине резонансной кривой. Лопатка при экспериментах возбуждалась воздушным вибростендом типа КуАИ-ВВ [1]. Частоты замерялись электронносчетным частотомером.

Во всех экспериментах статическое усилие на замковом соединении было одинаковым, а перо лопатки выводилось на резонанс по датчику в корневом сечении на один и тот же уровень напряжений (момент в заделке).

Рассеяние энергии в пере лопатки ψ_n определялось экспериментально при очень больших статических нагрузках на замок, обеспечивающих жесткое защемление, при котором рассеяние энергии колебаний в замковой части становилось достаточно малым. Напряжение в корневом сечении было таким же, как и при остальных экспериментах. Опыты показали, что декремент от частоты колебаний не изменялся.

Величины демпфирования в замковой части получались путем совместной обработки результатов экспериментов по первой и второй изгибным формам, по первой изгибной форме и упругой системе с грузом на конце, по второй изгибной форме и системе с грузом на конце по формулам (1) и (3) и приведены в табл. 1.

Как видно из таблицы, для одного и того же замкового соединения при одинаковых силовых факторах в нем, расхождение в декрементах колебаний замковой части, определенных методом

Таблица 1

	Декремент колебаний системы	Отношение потенц. энергии	Декремент колебаний в замке
I изгибная	0,014	1,97	0,0563
II изгибная	0,01		
I изгибная, система с грузом на конце	0,014 0,013	1,15	0,0590
II изгибная, система с грузом на конце	0,013 0,01	1,71	0,0565

двух проб по трем экспериментам, не превышает 5%, что свидетельствует о возможности практического использования этого метода.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. П. Иванов, В. Т. Огородов. Высокочастотный воздушный вибростенд. «Вибрационная прочность и надежность авиационных двигателей». Труды КуАИ. Выпуск XIX, 1965.
2. К. А. Прокофьев, М. М. Епанчиков, И. Л. Меерсон. В кн.: «Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем», Киев, 1966.
3. В. В. Матвеев, В. В. Панчин. В кн.: «Рассеяние энергии при колебаниях упругих систем», Киев, 1966.
4. Д. Н. Решетов, З. М. Левина. Демпфирование колебаний в соединениях деталей машины. «Вестник машиностроения», № 12, 1956.