

УДК 531.781.2

Ю.А. ГУСЕВ<sup>1</sup>, Р.Г. СКОЙ<sup>2</sup>, С.С. ТРИПОЛЬСКИЙ<sup>2</sup>, А.И. СКРИПКА<sup>1</sup>, С.И. ПРОНЕНКО<sup>1</sup><sup>1</sup>*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина*<sup>2</sup>*ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина*

### ПЛЕНОЧНЫЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫЕ ТЕНЗОРЕЗИСТОРЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРОНАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ГАЗОГЕНЕРАТОРА ДВИГАТЕЛЯ АИ-450

Статья посвящена экспериментальному исследованию вибронпряженного состояния лопаток турбин с применением высокотемпературных пленочных тензорезисторов.

**тензорезистор, чувствительный элемент, лопатка, турбокомпрессор, вибронпряжение**

Для исследования вибронпряженного состояния лопаток турбин применяются высокотемпературные тензорезисторы. Тензорезисторы, размещенные на рабочих лопатках турбин ГТД, испытывают воздействие высокоскоростных (до 600 м/с) и химически агрессивных газовых потоков с температурой до 1300-1500<sup>0</sup>С, приводящее к значительным механическим нагрузкам и эрозионным явлениям. Высокие обороты роторов вызывают предельно высокие растягивающие напряжения от центробежных сил. Так у современных маршевых малоразмерных газотурбинных двигателей частоты вращения турбокомпрессора (ТК) может составлять, 52000 об/мин.

В современной высокотемпературной вибротензометрии при прочностных исследованиях деталей авиационных двигателей широко используются высокотемпературные тензорезисторы с чувствительными элементами из нихромовой микропроволоки [1]. Основной недостаток этих датчиков – сравнительно низкий ресурс работы при температуре 900-1000<sup>0</sup>С и динамических относительных деформациях порядка 500\*10<sup>-6</sup>. Кроме того, в процессе препарировки лопаток турбин тензорезисторами подобного типа, как правило, перекрываются отверстия и выходные щели системы охлаждения, что недопустимо.

С 1972 года в Харьковском авиационном институте проводились работы по созданию и примене-

нию высокотемпературных пленочных тензорезисторов (ВПТР) [2], которые отличаются повышенной вибростойкостью и работоспособностью при температуре 1000 °С.

Чувствительный элемент ВПТР выполнен из сплава платины и палладия. В качестве связующего, т.е. электроизолирующей подложки, пленочного тензорезистора. используется цемент фосфатного твердения, имеющий коэффициент линейного расширения близкий к аналогичному параметру материала лопатки турбины.

В ГП «Ивченко-Прогресс» совместно с Харьковским национальным аэрокосмическим университетом проведены работы по оценке вибронпряженного состояния лопаток турбины турбокомпрессора двигателя АИ-450 с применением, как проволочных тензорезисторов типа ЗЖ 2, с базой 3 мм, а также пленочных ХАИ с такой же базой.

Исследование характеристик ВПТР проводилось ранее в ЦИАМ им. П.И. Баранова. Результаты этих исследований, представлены в работе [2].

Схема препарировки лопаток турбин тензорезисторами по технологии, представленной в работе [3], приведена на рис. 1, а общий вид лопаток, подготовленных к установке на диске, – на рис. 2.

Для проведения тарировки измерительного канала, используемого в процессе измерения вибронп-

ряжений, был препарирован пленочными тензорезисторами специальный камертон, используемый в ГП «Ивченко - Прогресс» для этих целей.

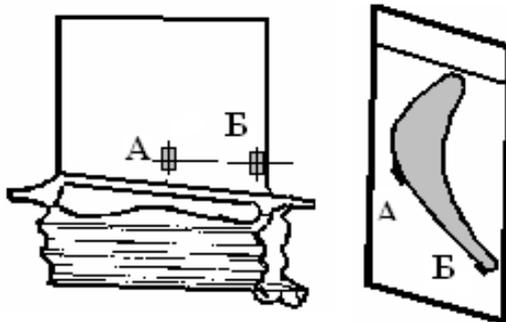


Рис. 1. Схема расположения ВПТР на спинке лопатки ТК



Рис. 2. Общий вид лопаток турбины ТК препарированных ВПТР

Проведено тезометрическое исследование вибронпряженного состояния лопатки № 692 – ВПТР установлен в позиции А и лопатки № 627 с тензорезистором в позиции Б (рис. 1).

Результаты тензометрирования рабочих лопаток ТК, препарированных проволочными тензорезисторами, в настоящей работе не приводятся. Они аналогичны тем, которые приведены ниже.

Резонансные колебания по первой изгибной форме ( $f = 9041 \dots 11653$  Гц) в исследуемом диапазоне частот вращения возбуждаются большим количеством гармоник газового потока, основными из которых являются  $K = 19$  ( $n = 45700 \dots 52325$  об/мин).

Наибольшие напряжения в рабочей лопатке (рис. 3) составляют:

$$\sigma_{vmax} = 2,2 \text{ кгс/мм}^2; K = 19; n = 31850 \text{ об/мин};$$

$$F = 10086 \text{ Гц};$$

$$\sigma_{vmax} = 2,3 \text{ кгс/мм}^2; K = 12; n = 50820 \text{ об/мин};$$

$$F = 10164 \text{ Гц}.$$

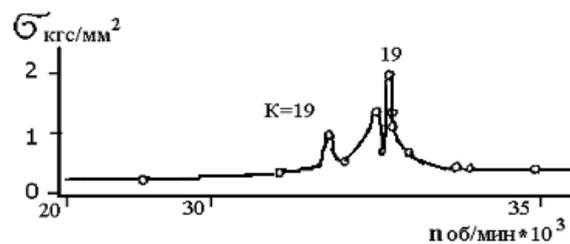


Рис. 3. График изменения напряжений в лопатке № 692 турбины ТК в зависимости от оборотов ротора (тензорезистор в позиции А)

Наибольшие напряжения в рабочей лопатке (рис. 4) составляют:

$$\sigma_{vmax} = 3,2 \text{ кгс/мм}^2; K = 19; n = 52968 \text{ об/мин};$$

$$F = 16773 \text{ Гц}.$$

График изменения вибронпряжений в рабочих лопатках турбокомпрессора в зависимости от оборотов ротора показан на рис. 5.

Общий вид колеса препарированного высокотемпературного пленочного тензорезистора после проведения эксперимента показан на рис. 6.

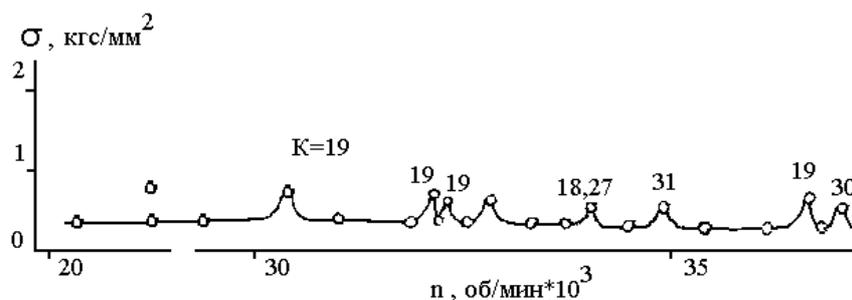


Рис. 4. График изменения вибронпряжений в лопатке № 627 турбины ТК (тензорезистор в позиции Б)

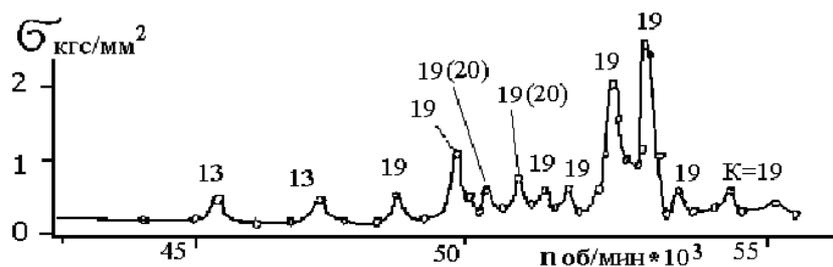


Рис. 5. График изменения вибронпряжений в рабочих лопатках турбокомпрессора в зависимости от оборотов ротора



Рис. 6. Общий вид колеса препарированного ВПТР после проведения эксперимента

Визуальный осмотр колеса ступени турбины препарированной ВПТР, после проведения эксперимента показал на наличие некоторого количества повреждений «проводящей трассы», что является свидетельством действия центробежных сил от масс элементов препарировки высокотемпературных пленочных тензорезисторов. Это позволяет сделать вывод о необходимости проведения тщательной конструкторской проработки прокладки «проводящей трассы» и соблюдение технологии подготовки поверхности лопатки.

### Заключение

Таким образом, анализируя результаты экспериментальных исследований, приведенных в данной статье, можно сделать вывод о том, что несмотря на

сложность технологического процесса препарировки лопаток турбин высокотемпературными пленочными тензорезисторами открывается возможность проведения анализа их вибронпряженного состояния как при высоких (более 1000 °С) температурах, так и при значительных оборотах вращения ротора (50000 об/мин и более) двигателя.

### Литература

1. Тензометрия в машиностроении: Справочное пособие / Под ред. Р.А. Макарова. – М.: Машиностроение, 1975. – 288 с.
2. Исследование характеристик высокотемпературных пленочных тензорезисторов на вибрационной установке применительно к испытаниям в ГТД / Ю.А. Гусев, А.П. Коротаев, С.И. Проненко, В.В. Глебов, Т.В. Гелета // Самолетостроение. Техника воздушного флота: Республ. межвуз. научн. сб. – Х.: ХАИ, 1983. – Вып. 50. – С. 27-30.
3. А.с. 877321 СССР Высокотемпературный тензодатчик и способ его изготовления / Ю.А. Гусев, Д.Ф. Симбирский, В.Е. Ведь, В.Я. Яловенко, М.Н. Резниченко, В.М. Фролов – 2707208/25-28; Заявл. 26.01.78; Опубл. 30.10.81. – Бюл. № 40, 1981. – 1 с.

Поступила в редакцию 4.06.2007

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Е. Ведь, Национальный технический университет «ХПИ», Харьков.