

## 67. Исследование методом голографической интерферометрии форм колебаний, вызывающих локальные разрушения покрывного диска рабочего колеса компрессора

А. М. Царева<sup>1</sup>, Р. Х. Макаева<sup>1</sup>, Г. А. Шайхутдинова<sup>1</sup>, К. А. Царева<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Казанский национальный исследовательский технический университет им. А. Н. Туполева — КАИ, Казань, Россия

<sup>2</sup> Казанский федеральный университет, Казань, Россия

Показана возможность практического применения оптического метода голографической интерферометрии для тестирования дефектного рабочего колеса центробежного компрессора. Найдена резонансная частота и соответствующая ей форма колебаний детали, при которой произошло разрушение полотна покрывного диска рабочего колеса.

*Ключевые слова:* Голографическая интерферометрия, резонансные частоты, формы колебаний, рабочее колесо компрессора.

*Цитирование:* Царева, А. М. Исследование методом голографической интерферометрии форм колебаний, вызывающих локальные разрушения покрывного диска рабочего колеса компрессора / А. М. Царева, Р. Х. Макаева, Г. А. Шайхутдинова, К. А. Царева // HOLOEXPO 2019 : XVI международная конференция по голографии и прикладным оптическим технологиям : Тезисы докладов. — М. : МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019. — С. 374–376.

Методы голографической интерферометрии успешно применяются в авиа- и машиностроении при исследованиях вибрационных характеристик деталей [1]. Резонансные формы колебаний, визуализированные этим методом, несут информацию о распределении узловых линий и участков пучностей. По картинам форм колебаний можно прогнозировать возможные дефекты, диагностировать техническое состояние деталей [2].

На интерферограмме, полученной голографическим способом, яркие белые участки соответствуют узловым линиям — местам отсутствия перемещений на поверхности объекта. Чередующиеся темные и светлые полосы — линии равных перемещений — показывают места смещений поверхности деталей от положения равновесия в процессе колебаний. Каждой гармонике присуща определенная форма колебаний. При малых потерях энергии резонансная частота и форма колебаний объекта совпадает с его собственной частотой и формой колебаний.

В процессе работы центробежного компрессора высокого давления при эксплуатационных режимах со скоростями вращения  $n = 168,3$  об/с встречались случаи усталостных разрушений закрытых рабочих колес в виде выкрашивания периферийных участков полотна покрывного диска (рисунок 1а). Они располагались непосредственно у выходных кромок лопаток.

Направление начала развития излома шло вдоль радиуса глубиной 15–18 мм. Протяженность излома в окружном направлении составляла 25–35 мм. Для выяснения причин разрушения исследовалось целое годное рабочее колесо центробежного компрессора аналогичной геометрии диаметром  $D = 534$  мм.

Методом голографической интерферометрии усреднения по времени определялись резонансные частоты и формы колебаний колеса, анализ которых позволил установить причину разрушений.



Рис. 1. Рабочее колесо центробежного компрессора с разрушениями покрывного диска

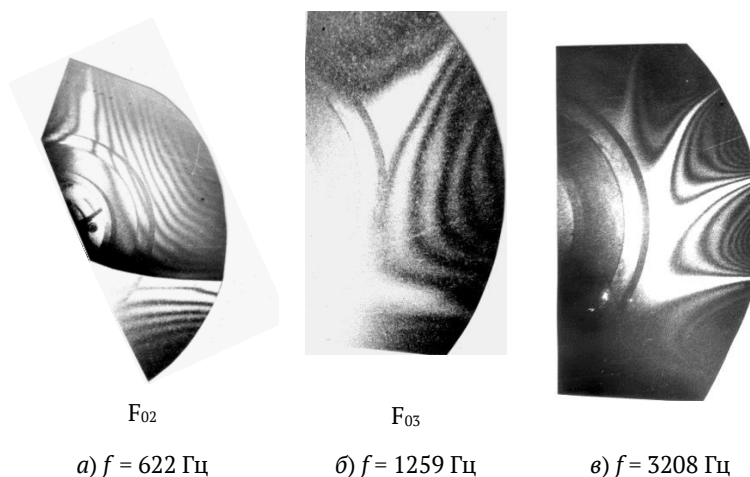


Рис. 2. Голографические интерферограммы резонансных колебаний рабочего колеса ЦК

Поскольку технические возможности экспериментальной установки ограничивали размеры сцен исследуемого объекта, съемки покрывного диска колеса центробежного компрессора проводились по секторам. Один из них представлен на рисунке 16. На фотографии сектора колеса штрихами обозначены расположения лопаток под покрывным диском. Исследования проводились в диапазоне частот 100–10 000 Гц.

Первые формы колебаний рабочего колеса аналогичны формам колебаний однородного диска. Основной тон, соответствующий форме колебаний F01 (с одним узловым диаметром), был зафиксирован при частоте  $f = 205$  Гц. Частота резонансных колебаний по форме с двумя узловыми диаметрами (F02) составила  $f = 622$  Гц (рисунок 2а), форма колебаний F03 – с тремя узловыми диаметрами – зафиксирована на резонансной частоте  $f = 1259$  Гц (рисунок 2б).

Особый интерес представляет форма резонансных (собственных) колебаний рабочего колеса на частоте  $f = 3208$  Гц (рисунок 2в). Как видно из рисунка, участки покрывного диска колеблются в пролете между лопатками.

Узловые линии совпадали с расположением лопаток под покрывным диском. Таким образом, при этой резонансной частоте участки диска, закрепленные между лопатками, совершали самостоятельные колебания. Это позволило предположить, что разрушение произошло при резонансных колебаниях на данной частоте ( $f = 3208$  Гц). Действительно, поскольку максимальные напряжения, приводящие к образованию трещин, имеют место вблизи узловых линий в местах жесткого закрепления (заделки) полотна. Образовавшиеся трещины в процессе эксплуатации развивались по направлению к центру. Далее, образовавшийся свободный кусок полотна, совершая собственные колебания, обрывался.

Данное предположение было подтверждено тем обстоятельством, что на рабочих режимах в процессе эксплуатации частота внешних возмущающих сил близка к частоте собственных колебаний колеса. По эксплуатационным данным рабочие режимы составили  $n = 10100$  об/мин = 168,3 об/с. Количество лопаток диффузора  $z = 19$ , следовательно, частота колебаний  $nz = 3198$  Гц.

По результатам исследований были выданы рекомендации по отстройке от резонанса на рабочих оборотах путем доработки конструкции рабочего колеса и изменения рабочих оборотов.

#### Список источников

- [1] **Жужукин, А. И.** Применение голографической и спекл-интерферометрии для исследования вибрационных характеристик деталей / Материалы докладов Международной н.-т. к. «Проблемы и перспективы развития двигателестроения». Самара: СГАУ, 2009. — С. 148–149.
- [2] **Макаева, Р. Х.**, Каримов А. Х., Царева А. М. Диагностика деталей и узлов турбомашин по их вибрационным характеристикам с применением голографической интерферометрии / Монография. Казань: Изд-во Казан. гос. техн. ун-та. 2011. — 242 с.