

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ СБОРОЧНЫХ ПАРАМЕТРОВ РАБОЧЕГО КОЛЕСА КОМПРЕССОРА

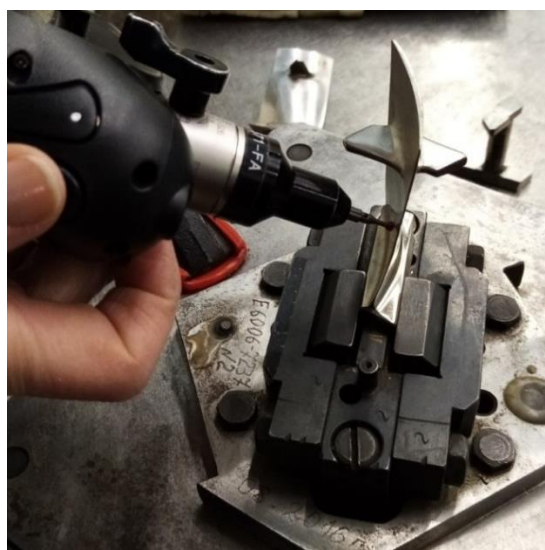
Заданная степень повышения давления, устойчивость и надёжность работы компрессора зависят от обеспечения равномерности сборочных параметров между лопатками [1]. Равномерность натягов по антивибрационным полкам обеспечивается точностью изготовления лопаток и их сборкой. Сужение допусков на изготовление экономически не целесообразно. Существенным резервом повышения эксплуатационных показателей является улучшение технологии сборки лопаточных венцов [2].

В работе рассматривается задача разработки достоверной цифровой модели [3] сборочного процесса рабочих колёс лопаточных машин. В качестве конкретного объекта выбраны лопатки диска рабочего колеса 8 ступени компрессора среднего давления (рис. 1, а), которые имеют достаточно небольшие размеры и стыкуются между собой по антивибрационным полкам. Обеспечение равномерного натяга является при сборке первостепенной задачей, иначе из-за недостаточного или излишнего напряжения между лопатками, а также его неравномерности лопатка становится излишне вибронегруженной, начинает колебаться и разрушается, оторванные части в работающем двигателе разрушают остальные лопатки диска, а кроме того и лопатки нескольких дисков за ним.

Было выполнено измерение комплекта из 84 лопаток диска компрессора 8 ступени (рис. 1, б).



а



б

Рис. 1. Фотографии рассматриваемых деталей: а – диск, б – лопатка

Измерения выполнялись на портативной координатно-измерительной машине SimCore. Был проведён контроль следующих геометрических параметров: а) фактические значения стыковых размеров по рабочим торцам антивибрационных полок лопаток l_{sp} ; б) расстояние от центра до рабочего торца со стороны корыта l_p ; в) фактические значения угла касательной к профилю в контрольных сечениях лопаток в свободном состоянии γ_b (угол установки); г) ширина хвостовика w_l .

Углы установки лопаток γ_b измеряются в сборе с диском. Лопатки устанавливаются в пазы через одну, контроль осуществляется оптическим угломером по разметке. Натяги в сборке лопаток определяют по изменению значения угла установки $\delta\gamma_b$ в сборке всех лопаток.

Расчёт изменения углов установки пера можно выполнить с использованием конечно-элементных моделей (КЭМ) в среде ANSYS. Для расчёта углов по КЭМ была разработана математическая модель и реализован скрипт в системе MATLAB. Опишем конечно-элементную модель, используемую для расчёта углов установки и формированию обучающей выборки для регрессионной модели.

В КЭМ упрощён хвостовик и пазы диска, осуществляется сдвиг и разворот торцевых контактных плоскостей антивибрационной полки. Кроме того, можно изменять угловое положение лопаток согласно погрешности деления пазов α_{ss} . На рис. 2 приведён эскиз модели с обозначенными параметрами геометрических отклонений, которые можно вносить в модель.

Отклонение толщины состоит из отклонения со стороны спинки δl_s и со стороны корыта δl_p , данные параметры вычисляются из параметров l_{sp} и l_p .

Создание конечно-элементной модели, как отмечалось выше, выполнялось в системе ANSYS Workbench с использованием модуля Static Structural. Этапы формирования КЭМ: 1) задание механических свойств; 2) импорт и связка параметризованных моделей лопаток и диска; 3) задание граничных условий; 4) задание выводимых параметров в препроцессоре.

Для расчёта углов разворота лопаток $\delta\gamma_b$ был разработан алгоритм, так же реализованный в среде MATLAB. На рис. 3 приведена блок-схема расчёта углов разворота лопаток.

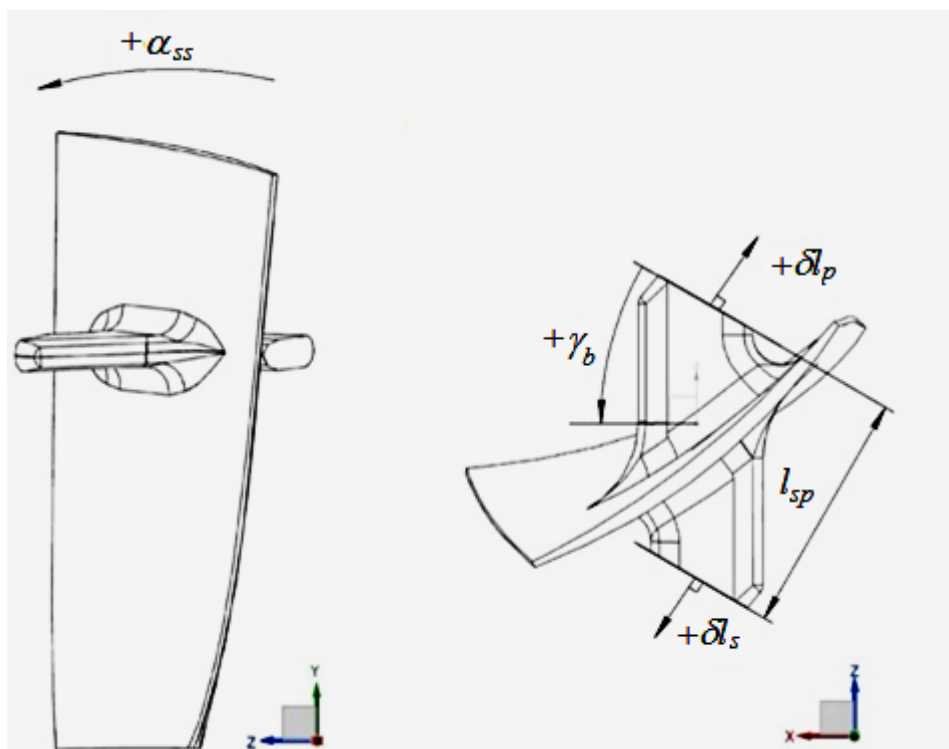


Рис. 2. Эскиз модели рабочей лопатки с параметрами отклонений



Рис. 3. Блок-схема алгоритма расчёта угла закрутки лопатки в эксперименте

Выполнены расчёты углов в собранном состоянии рабочего колеса с использованием цифрового двойника. Проведены расчёты разности вычисленных значений после сборки и до её выполнения. В табл. 1 приведены сравнения статистических характеристик (математического ожидания μ , среднеквадратического отклонения σ , минимального и максимального значений) полученных отклонений. Кроме того, приведены нижняя T_- и верхняя T_+ границы допусков.

Таблица 1. Обработка результатов измерений собранного рабочего колеса

Параметр	Оценка				Допуски	
	μ	σ	min	max	T_-	T_+
$\delta\gamma_b$ в эксперименте, град	-1,30	0,27	-1,80	-0,58	-2	-1
$\delta\gamma_b$ в модели, град	-1,23	0,25	-1,77	-0,32	-2	-1

Можно отметить, что гистограммы распределения имеют сходный закон, предположительно отклонения углов в обоих случаях подчиняются бета-закону распределения. Диапазоны изменения углов очень близки. Тем не менее, сравнивая разности полученных значений в каждой отдельной точке, можно отметить существенные отличия.

Расхождение между экспериментальными и расчётными величинами разностей углов установки лопаток до и после сборки в рабочем колесе составило ± 30 угловых минут. К числу факторов, влияющих на такие отклонения, относятся:

- 1) оценочная погрешность измерений углов установки лопаток примем равной $\pm 10^\circ$, как было указано ранее по тексту;
- 2) вариация размеров диска, влияющая на угол установки лопатки в диске;
- 3) погрешности измерения геометрических параметров лопатки.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках гранта Президента Российской Федерации (номер МК-2156.2022.1.6).

Библиографический список

1. Иноземцев, А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок / А.А. Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий. – М.: Машиностроение, 2008. – Т. 2 – 365 с.
2. Безъязычный, В.Ф. Некоторые проблемы современного сборочного производства и перспективы их преодоления / В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев // Сборка в машиностроении, приборостроении. – 2009. – № 8. – С. 18-25.
3. Samper, S. Modeling of 2D and 3D assemblies taking into account form errors of plane surfaces / S. Samper, P. A. Adragna, H. Favreliere, M. Pillet // Journal of computing and information science in engineering. – 2009. – Т. 9. – №. 4.