

В.Ф. Павлов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк. – Самара: Изд-во СНЦ РАН, 2012. – 125 с.

2. Иванов, С.И. К определению остаточных напряжений в цилиндре методом колец и полосок / С.И. Иванов // Остаточные напряжения. – Куйбышев: КуАИ. – 1971. – Вып. 53. – С. 32–42.

3. Сазанов, В.П. Определение первоначальных деформаций в упрочнённом слое цилиндрической детали методом конечно-элементного моделирования с использованием расчётного комплекса PATRAN/NASTRAN / В.П. Сазанов, В.А. Кирпичёв, В.С. Вакулюк, В.Ф. Павлов // Вестник УГАТУ. – 2015. – Т. 19. – № 2 (68). – С. 35–40.

УДК 621.452, 004.94

*Печенина Е.Ю., Кудашов Е.В.,
Чуриков Д.С., Вишневская В.Ю.*

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ ОЦЕНКИ НАТЯГОВ В РАБОЧЕМ КОЛЕСЕ КОМПРЕССОРА

Существующая технология сборки рабочих колёс с антивибрационными полками лопаток компрессора предусматривает предварительные сборки [1]. Наличие предварительныхборок приводит к повышению трудоёмкости процесса и ухудшению геометрии полок и хвостовиков лопаток. В настоящее время на производствах требуемая величина натягов достигается 3–5 предварительными сборками, в каждой из которых специалисты изменяют расстановку лопаток с учётом измерений углов установки профилей, характеризующих возникающие натяги.

Перспективным направлением совершенствования сборочного процесса является замена предварительных сборок узлов компьютерным моделированием [2]. Создание достоверной компьютерной модели процесса сборки рабочего колеса позволит оценивать натяги и определять вариант расстановки лопаток, обеспечивающий минимальную неравномерность натягов.

В данном исследовании были разработаны и сравнены две модели, которые позволяют выполнять оценку натягов в рабочем колесе компрессора. Рассмотрим подробнее каждую модель.

В первой модели рассматривалось сечение лопаток в месте антивибрационных полок (рис. 1, 2). Допущениями, принятыми при разработке данной модели, являются: 1) лопатка представляет собой абсолютно жёсткое тело; 2) учитываются только отклонения параметров, влияющих на натяг, прочие геометрические параметры берутся номинальными по чертежу; 3) средний натяг распределён равномерно в контакте между полками.

Моделирование натяга сводится к расчёту отклонения натяга в плоскости между лопатками – фактически, к расчёту площадей взаимного пересечения полок. Отклонение натяга G между двумя лопатками представляет собой сумму отклонений натягов со стороны корыта первой лопатки δS_{p1} и спинки второй δS_{s2} :

$$G = \delta S_{p1} + \delta S_{s2}. \quad (1)$$

Для расчёта отклонений натягов по формуле (1) со стороны корыта и спинки каждой лопатки определяются координаты точек четырёхугольника, образованного пересечением антивибрационной полки с линией номинального отклонения натягов (рис. 2). Координаты вершин четырёхугольника на рис. 2, представляющего собой часть антивибрационной полки со стороны спинки, определяются фактическими размерами полок. Линия номинального отклонения натягов остаётся на прежнем месте, а фактическое отклонение натя-

гов меняется. Аналогичные изменения отклонения натягов происходят и со стороны корыта.

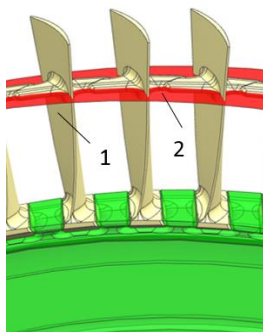


Рис. 1. Пояснение к разработанной модели:
1 – лопатка; 2 – сечение в месте антивибрационной полки

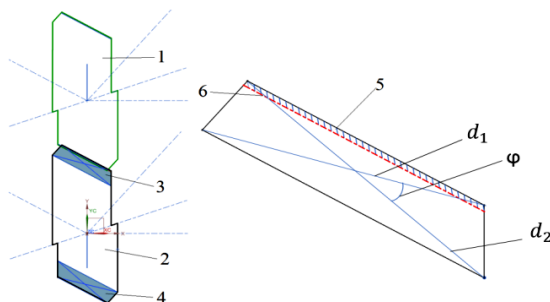


Рис. 2. Графическая иллюстрация модели оценки натягов:
1 – первая лопатка; 2 – вторая лопатка;
3 – отклонения натяга со стороны спинки, δS_{s2} ;
4 – отклонения натяга со стороны корыта, δS_{p1} ;
5 – отклонения натяга со стороны спинки;
6 – линия номинального натяга

Расчёт площадей S для вычисления отклонений натягов (2) производится по формуле:

$$S = d_1 \cdot d_2 \cdot \sin(\varphi) / 2, \quad (2)$$

где d_1, d_2 – диагонали получающегося четырёхугольника; φ – угол между диагоналями.

Таким образом, используя измеренные и конструкторские значения параметров полок, модель позволяет для каждой лопатки рассчитывать величины отклонений натягов со стороны спинки и корыта и натяги между лопатками.

Вторая модель является конечно-элементной (КЭМ), которая была реализована в программной системе ANSYS Workbench. По конструкторским чертежам были построены упрощённые 3D-модели диска и лопаток. Далее была произведена их виртуальная сборка в программном пакете. Этапы формирования КЭМ: 1) задание механических свойств материалов; 2) импортирование и связка параметризованных моделей лопаток и диска; 3) задание граничных условий; 4) задание выводимых параметров в препроцессоре.

Механические свойства материалов задавались исходя из материала лопаток рабочего колеса. Для выполнения КЭ моделирования сборки рабочего колеса задавались следующие механические свойства материала диска и лопаток: коэффициент Пуансона – 0,36; модуль продольной упругости $9,6 \cdot 10^{10}$ Па; плотность материала 4620 кг/м^3 ; предел прочности $1,07 \cdot 10^9$ Па; физический предел текучести $9,3 \cdot 10^8$ Па; условный предел текучести $9,3 \cdot 10^8$ Па; коэффициент теплового расширения $9,4 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$.

С целью увеличения скорости и точности задания параметров (геометрических отклонений, измеренных на деталях или сгенерированных) для КЭМ был разработан скрипт в пакете MATLAB. Скрипт управляет процессом в программной системе ANSYS с помощью отправки APDL команд и сохраняет результаты расчётов. Загрузка исходных данных для модели производится из электронных таблиц.

Было проведено по 6 экспериментов с использованием каждой модели. Эксперименты проводились на двух рабочих колёсах компрессора. Первый, второй и третий эксперименты – это перестановка лопаток первого рабочего колеса; четвёртый, пятый, шестой – второго.

В табл. 1 приведены статистические характеристики отклонений натягов первой модели (среднее выборочное μ , среднеквадратическое отклонение σ , минимальное и максимальное значения), характеризующих натяг, для шести проведённых виртуально сборок по разработанной двумерной модели.

Таблица 1. Характеристики рассчитанных отклонений натягов (мм^2) в двумерной модели

Параметр	1 экс.	2 эксп.	3 эксп.	4 эксп.	5 эксп.	6 эксп.
μ	-1,400	-1,400	-1,400	-1,174	-1,173	-1,172
σ	1,507	0,984	0,880	1,852	1,370	1,196
<i>min</i>	-4,939	-4,352	-3,996	-5,518	-4,811	-4,603
<i>max</i>	1,750	0,139	0,885	2,316	1,020	2,216

Теоретические расчёты позволяют говорить о вероятном превышении нижней границы поля допуска в экспериментах даже после оптимизации расстановки.

В табл. 2 приведены статистические характеристики изменений углов установки, характеризующих натяг, для шести проведённых сборок, рассчитанных в конечно-элементной модели.

Сравнивая результаты, полученные при использовании двумерной модели и КЭМ, можно отметить, что в экспериментах 1-2 σ натягов снизилось на 34,7%, а в КЭМ получилось снижение на 26,8%; в экспериментах 1-3 при моделировании в двумерной модели σ снизилось на 41,6%, а в КЭМ снижение составило 42,0%. Для 4 и 5, а также 4 и 6 экспериментов при использовании двумерной модели снижение σ составило 26% и 35,4% соответственно, в

случае КЭМ – 23,3% и 31,5%. В среднем при использовании разработанной двумерной модели результаты получаются лучше, чем при использовании КЭМ. Расхождение можно объяснить отсутствием учёта жёсткости лопаток при моделировании. Тем не менее полученные при использовании разработанной модели данные позволяют прогнозировать результаты, получаемые в КЭМ.

Таблица 2. **Характеристики изменения углов установки (мин), рассчитанных по КЭМ**

Параметр	1 экс.	2 эксп.	3 эксп.	4 эксп.	5 эксп.	6 эксп.
μ	76,09	78,36	77,58	75,42	80,14	77,63
σ	19,13	14,01	11,1	17,01	13,04	11,66
<i>min</i>	30	45	50	35	50	50
<i>max</i>	125	115	105	120	115	110

Перспективой дальнейших исследований является создание регрессионной модели, которая на основании результатов двумерной модели оценки натягов позволит быстро рассчитывать углы установки лопаток.

Библиографический список

1. Кравченко, И.Ф. Сборка роторов ГТД барабанно-дискового типа: типовые процессы, алгоритмы расчётов: монография / И.Ф. Кравченко, Э.В. Кондратюк, В.А. Титов [и др.]. – Киев: КВИЦ, 2011. – 198 с.
2. Архипов, А.Н. Анализ влияния геометрических отклонений рабочих лопаток вентилятора на прочностные характеристики / А.Н. Архипов, М.В. Волгина, А.А. Матушкин [и др.] // Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. – 2019. – № 4. – С. 9–16.