УДК 621.55.13.17

Г.Г. Крушенко
Институт вычислительного моделирования СО РАН, г. Красноярск

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КОЛЕС ТУРБОНАСОСНОГО АГРЕГАТА ЖРД

Рабочие колеса (РК), входящие в состав турбонасосного агрегата ТНА [1] ЖРД, работают в условиях высоких нагрузок [2]: скорость вращения ротора ТНА достигает 50 000 об/мин, вибрация находится в диапазоне частот от 10 до 10 000 Гц, скорости движения жидких компонентов топлива – до 200 м/с., в связи с чем, к качеству РК предъявляются повышенные требования.

РК представляет собой деталь в форме диска, между ободом которого и ступицей, располагается несколько десятков тонкостенных лопастей сложного профиля. РК изготовляют литьем по выплавляемым моделям [3] из жаропрочного сплава на никелевой основе [4].

Из-за высоких силовых и температурных нагрузок, возникающих при работе РК, к качеству этих деталей предъявляются высокие требования, что вызывает их значительную отбраковку на каждой контрольной операции при выявлении разного рода дефектов, начиная от визуального осмотра и до рентгенопросвечивания. Применение «простых» мероприятий не во всех случаях не приводило к положительным результатам, что, по-видимому, можно объяснить незнанием всех факторов, определяющих качество отливок.

В связи с этим было принято решение применить метод экспертных оценок [5], основанный на априорном выявлении значения влияния отдельных факторов на возникновение тех или иных дефектов, что определяется на основании опыта специалистов, накопленного ими в предшествующей деятельности. С этой целью была разработана анкета экспертных оценок, в которой были указаны все виды выявленных дефектов (функций) на РК двух типоразмеров. В качестве независимых величин, влияющих на появление того или иного дефекта, были приняты, указанные в технологиях факторы. Таким образом, анкеты экспертных оценок по каждой детали включали по 8 видов дефектов и соответственно 21 и 19 фактор, предположительно влияющих на их появление. Ввиду относительной идентичности деталей, а, следовательно, аналогичности методологических подходов, вся процедура была подробно рассмотрена только для детали одного из типоразмеров. При этом в анкете были указаны 8 литейных дефектов и 21 фактор. Все число экспертов было разделено на 5 групп: 1 – научные сотрудники вуза, 2 – специалисты отдела металлурга предприятия, 3 – цеховые технологи, 4 – мастера, 5 – администрация цеха. Каждый эксперт внес в анкету соответствующие числовые ранги в графах, показывающие, с его точки зрения, связь рассматриваемого фактора и дефекта. При заполнении анкет не допускалось повторение числовых рангов по виду дефекта, за исключением случаев, когда группе факторов (от 2 до 11) присваивался соответствующий средний ранг, который для этой группы вычислялся как среднее арифметическое:

$$a_i = \frac{\sum_{n=x_{k-1}}^{x_p} a_n}{(x_p - x_{k-1})} \quad (1)$$

В случаях, когда эксперты в какой-либо группе, в общем по группе оценивали какое-то число факторов, но у отдельных экспертов некоторые из этих факторов не отмечались как значащие, анкета заполнялась средними рангами для всей группы неоцененных факторов, вычисленных, как указывалось выше, для равнозначащих факторов. Например, у экспертов группы 1 (вуз) по дефекту «недолив лопаток» значащими (то есть оцененными хотя бы одним экспертом) названы 15 факторов. У эксперта под номером 1 ранговая оценка дана семи факторам, тогда как остальным значимым факторам присваивается средний ранг, определяе-

мый как

$$\sum a^{x_p}$$

$$= \quad =$$

$$a$$

$$\bar{} \qquad n$$

$$8+9+10+11+12+13+14+15$$

$$i \quad \frac{n=x_k}{} \qquad \frac{}{}$$

$$= 11{,}5 \qquad (2)$$

$$(x_p - x_{k-1})$$

$$15-(8-1)$$

Если в группе экспертов какие-то факторы не упоминались ни одним из экспертов, то они в статистическую обработку в дальнейшем не включались и выявлялись как незначащие.

По каждой группе, включающей *m* экспертов, и по обобществленному коллективу вычислялись: сумма рангов по факторам, сумма рангов по всей группе экспертов, средняя сумма рангов, отклонение от средней суммы рангов, квадраты отклонений от средней суммы рангов. По этим данным вычислялся коэффициент согласия-конкордации.

$$S$$

$$W =$$

$$1 \qquad n$$

$$(3)$$

$$\frac{}{}$$

$$j$$

$$m^2(n^3-n) - m\sum T$$

$$12 \qquad j=1$$

$$n$$

где $S =$

$$\sum(\Delta i_x \quad x=1$$

$$\underline{1}$$

$$)^2$$ – сумма квадратов отклонений от средней суммы рангов;

$$3$$

$$T_i =$$

$$\sum(t_j$$

$$12 \quad e_j$$

$$- t_j)$$; (t_j – число одинаковых рангов в j-ом ранжировании)

Коэффициент W позволяет оценить степень согласованности мнений экспертов и внутри одного коллектива, и в обобщенном, сводном коллективе. Максимально согласованность может быть оценена коэффициентом W = 1 только в том случае, когда все эксперты дали одинаковую ранговую оценку всем учитываемым факторам. При обработке экспертных оценок в настоящей работе получены следующие коэффициенты согласия – минимальное W = 0,147 (группа 4 – мастера, деталь 1, дефект «корольки»), максимальное W = 0,966 (группа 4 – мастера, деталь 2, дефект «недолив лопаток»)

По полученным расчетным данным были построены 96 гистограмм ранговой оценки

влияния учитываемых факторов на появление конкретных дефектов, как по отдельным группам экспертов, так и по обобщенному коллективу.

Оценка, осуществленная по результатам обработки данных коллективов в обобщенном коллективе, характеризуется наибольшей полнотой привлечения факторов, высокой согласованностью и доверительностью. По всем дефектом на деталях обоих типоразмеров получена высокая доверительная вероятность ($\alpha > 0{,}999$).

По обобщенному коллективу для детали каждого типоразмера установлена ранговая последовательность значимости факторов, анализ которой показал, что качество отливок по ряду факторов связано с процессом заполнения формы металлом. К ним относятся нетехнологичность конструкции детали, конструкция литниковой системы, скорость заливки, высота струи, попадание инородных тел в оболочку при хранении и при заливке, температура заливки металла и температура формы. К косвенным факторам можно отнести прочность оболочки, вибрация формы при ее выемке из печи прокаливания и транспортировки к месту заливки. Полученные данные были использованы для изменения конструкции ЛПС, которая характеризуется наличием шаровой прибыли со щелевым подводом в нее металла, что обеспечило 100-процентную годность отливок по рентгеновскому контролю и уменьшило в 2,5-3

раза отсев на других контрольных операциях при одновременном уменьшении расхода дорогостоящего сплава до 3 кг на одну отливку.

Библиографический список

1. Добровольский, М. В. Жидкостные ракетные двигатели / М. В. Добровольский. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. – 488 с.

2. Прочность и ресурс ЖРД / Н. А. Махутов [и др.]. – М. : Наука, 2011. – 525 с.

3. Технология производства жидкостных ракетных двигателей : учебник / В. А. Моисеев [и др.,]. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. – 381 с.

4. Жеребцов, С. Н. Исследование, разработка и внедрение технологии модифицирования никелевых сплавов ультрадисперсными частицами карбонитрида титана при электрошлаковом переплаве с целью получения изделий с высокими физико-механическими свойствами : автореф. дис. … докт. техн. наук : 05.16.02 / С. Н. Жеребцов. – М., 2011. – 39 с.

5. Clemen, R.N. Combining probability distributions from experts in risk analysis / R. N. Clemen, R. L. Winkler // Risk Analysis. – 1999. –V. 19, Issue.2. – P. 187-203.