

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ И РАСПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧИХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ И КОНИЧЕСКИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ПРИ ОБРАБОТКЕ МАЛОЖЕСТКИХ КОЛЕЦ ЗАГОТОВОК

© 2012 Ф. И. Дёмин, Т. В. Полякова

Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет)

Рассматриваются проблемы обеспечения заданной точности при изготовлении кольцевых деталей малой жёсткости. Проведены статистические исследования различных раскатанных колец из хромоникелевых сплавов. Предложена схема контроля погрешности формы и расположения цилиндрических поверхностей на специальном контрольно-измерительном оборудовании.

Маложёсткие детали, раскатка, остаточные напряжения, погрешность формы, статистические данные, вектор.

Детали газотурбинных двигателей отличаются большим разнообразием формы поверхностей как в поперечном, так и в продольном направлениях, а также расположением этих рабочих поверхностей относительно конструкторских. Точность формы таких поверхностей часто должна обеспечиваться в пределах 6-8 квалитетов, так как они определяют качественные показатели работы изделия. В то же время подобные детали двигателя должны обладать небольшим весом и достаточной жёсткостью. Эти условия предъявляют особые требования к производству маложёстких заготовок значительных габаритных размеров. Так, например, кольца корпусов компрессора и турбины ГТД имеют диаметры 600-800 мм при толщине стенки данного кольца 6-8 мм. Эти элементы двигателя влияют на основные показатели изделия, такие как расход топлива, тягу двигателя, герметичность соединения деталей, КПД компрессора и турбины.

В процессе изготовления таких маложёстких деталей обеспечить заданную точность обрабатываемых поверхностей различной формы весьма сложно. При механической обработке заготовок в процессе установки её на станке и закреплении действуют усилия, которые создают надёжное соединение с технологической системой. Это соединение позволяет применять необходимые режимы обработки на различных этапах технологического процесса. В то же время действующие усилия при закреплении ма-

ложёстких заготовок, приводят, соответственно, к искажению формы их поверхностей. В процессе точения поверхностей возникают погрешности формы и расположения обрабатываемых поверхностей относительно её первоначального исходного положения. Снимаемый слой металла в процессе обработки уменьшает сечение заготовки и, соответственно, влияет на остаточную погрешность формы как в продольном, так и в поперечном направлении. Так как в процессе закрепления заготовки и при обработке поверхностей усилия закрепления и резания находятся в пределах упругих деформаций, то после снятия заготовки из технологической системы они получают искажение формы и смещение обработанных поверхностей. Величина искажения определяется множеством факторов, которые при разработке технологического процесса стремятся свести к минимуму. Для этого оптимизируют схемы закрепления и установки заготовок, влияют на способы и режимы обработки и другие параметры производственного процесса.

Большое влияние на процесс формирования погрешности формы и расположения обрабатываемых поверхностей оказывает напряжённое состояние исходной заготовки колец, которые в основном обеспечиваются раскаткой колец в горячем состоянии. Так как при раскатке колец в горячем состоянии изменение напряжённого состояния материала происходит в пределах его текучести, то неравномерность механических свойств

трансформируется при снятии припуска в процессе механической обработки в виде погрешности формы изготавливаемых колец. Для уменьшения влияния свойств материала на производственные погрешности и уменьшения наследственности этих явлений в процессе изготовления исходной заготовки колец используются различные технологические операции: многократный нагрев при раскатке, режимы раскатки, использование термических операций, применение дополнительных операций по раскатке. Однако неравномерность механического состояния материала является значительным источником появления производственной погрешности формы и расположения рабочих и конструкторских поверхностей колец большого диаметра.

Проведены статистические исследования в производственных условиях раскатки колец для материалов хромоникелевых сплавов и сталей по показателям предела текучести $\delta_{0,2}$ [кгс/мм²] и временному сопротивлению материала δ_b [кгс/мм²], построены гистограммы испытываемых образцов раскатанных колец.

По данным, приведённым в табл. 1, определены параметры рассеивания исследуемой величины. При этом центр группирования A_{cp} составил 69,9 кгс/мм². Среднеквадратичная величина рассеивания σ при этом равна 0,56. Теоретический центр группирования определяется в соответствии с законом нормального распределения

$$y = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{(A_{i,cp} - A_{cp})^2}{2\sigma^2}}$$

при этом $A_{\delta,cp} = 69,6$.

Таблица 1. Результаты статистических данных по изменению $\delta_{0,2}$

№	Средний размер интервала, $A_{i,cp}$	Количество случаев (частота), n_i	Частость, n_i/N
1	61,4	8	0,1
2	63,5	11	0,1375
3	66,3	12	0,15
4	69,6	15	0,1875
5	72,5	13	0,163
6	75,6	9	0,113
7	78,0	7	0,088
8	79,4	5	0,06

Для оценки механических свойств материала колец на этапе окончательного контроля готовых колец были также проведены исследования зависимости предела текучести и временного сопротивления материала от твёрдости этого материала в холодном состоянии.

Полученный график (рис. 1) показывает хорошую сходимость, которая может быть представлена линейной зависимостью. Статистические данные различных раскатных колец из хромоникелевого сплава представлены в табл. 2.

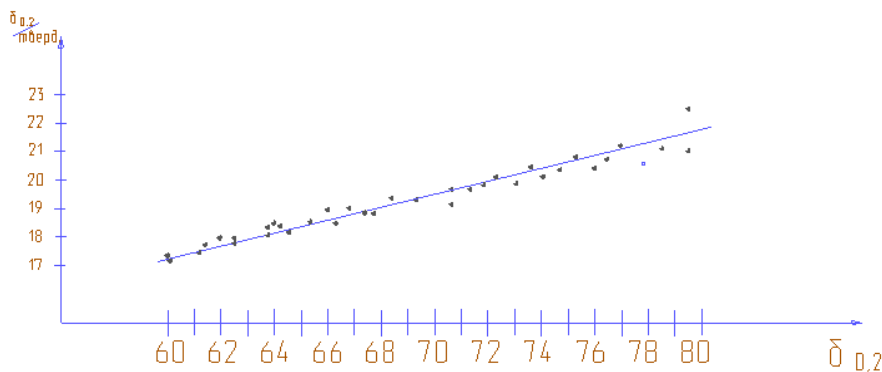


Рис. 1. Зависимость между твёрдостью и пределом текучести

Таблица 2. Статистические данные лабораторных испытаний раскатных колец

№	Деталь Обозначение Наименование	Марка материала	Режим термической обработки	Времени Сопротивл. кгс/мм ²	Предел текучности кгс/мм ²	Относ. Удлини. %	Относит. Сужение %	Ударная вязкость. кгс м/см ²	Твёрдость. Бринелль
1	152.411.003-1/1 Кольцо внутреннее	ХН68ВМТЮК- ВД ТУ14-1-3759-84	Зак. Т-1090°С выд. 2 часа. Охл. Воздух	111,1	69,3	32,4	42,2	11,0	3,58
2				111,3	70,7	31,6	46,6	10,4	3,66
3				112,6	70,7	30,8	46,6	10,4	3,60
Норма по ТУ 01-1203				≥110	≥60	≥20	≥25	≥4,0	3,3-3,75
4	152.411.003-1/2 Кольцо внутреннее	ХН68ВМТЮК- ВД ТУ14-1-3759-84	Стар. Т-900°С выд. 2 часа Охл. Воздух	114,1	72,3	32,8	48,2	9,0	3,56
5				117,1	76,9	30,8	45,2	11,3	3,64
6				102,9	58,1	33,2	36,0	7,25	2,86
Норма по ТУ 01-1203				≥95	≥53	≥30	≥35	≥4,0	3,4-4,1
7	36.440.009 Кольцо	ХН68ВМТЮК- ВД ТУ14-1-3759-84	Зак. Т-1090°С выд. 2 ч. Охл. Воздух	116,2	74,2	30,8	32,7	7,5	3,50
8				120,2	79,3	31,6	42,2	7,6	3,46
Норма по ТУ 01-1203				≥110	≥60	≥20	≥25	≥4,0	3,3-3,75
9	253.441.006 Козырёк	ХН68ВМТЮК- ВД ТУ14-1-3759-84	Зак. Т-1090°С выд. 2 часа. Охл. Воздух	111,5	69,8	31,2	39,1	9,7	3,64
10				108,5	66,3	32,4	45,2	11,5	3,70
11				110,5	66,2	34,4	45,2	13,8	3,68
12				108,5	64,7	37,6	42,2	14,5	3,72
13				113,0	68,7	35,2	45,2	6,1	3,90
Норма по ТУ 01-1203				≥95	≥53	≥30	≥35	≥4,0	3,4-4,1
14		ХН68ВМТЮК- ВД ТУ14-1-3759-84	Зак. Т-1090°С выд. 2 ч. Охл. Воздух	105,9	62,1	35,6	51,0	16,9	3,82
15				109,0	66,7	34,4	48,2	16,5	3,62
16				111,0	67,7	31,6	48,2	13,1	3,68
Норма по ТУ 01-1203				≥95	≥53	≥30	≥35	≥4,0	3,4-4,1

Механическая обработка крупногабаритных колец осуществляется в несколько операций технологического процесса. Черновые операции со снятием значительного слоя материала выполняются на токарно-карусельных или лобовых токарных станках. На этих операциях для установки и закрепления заготовок используют четырёхкулачковые патроны. Полуцистовые и чистовые токарные операции производятся на токарных станках повышенной точности. При установке и закреплении используются специальные планшайбы, закрепление заготовок выполняют по торцевым поверхностям колец. Этот способ закрепления заготовки позволяет уменьшить погрешность формы раскатываемых или обтачиваемых наружных цилиндрических поверхностей.

Полученные погрешности формы и расположения на различных этапах формирования исходной заготовки и выполнения черновых, получистовых и чистовых этапов обработки суммируются и проявляются на готовых деталях в виде многогранной формы. При суммировании этих погрешностей действуют случайные процессы формирования, которые определяются силовыми воздействиями при выполнении операций технологических процессов и положением заготовок в технологических системах. Характер погрешности формы при раскатке в горячем виде создаёт форму в виде эллипса, которая проявляется на готовой детали в виде наследственности. Изменение формы колец при закреплении в трёхкулачковом патроне проявляется в виде трёхгранности

обрабатываемых заготовок. Соответственно использование четырёхкулачковых патронов для закрепления создаёт четырёхгранную форму.

Результаты формирования многогранной формы на кольцах должны быть учтены и проконтролированы на готовой детали.

В технологических операциях часто проводят контроль точности обрабатываемых поверхностей непосредственно на станке при закреплённой в приспособлении заготовке. Такой способ обеспечения качественных показателей основных поверхностей колец не снимает проблему наследственности погрешностей от предшествующих этапов обработки, включая и процесс получения исходной заготовки методом горячей раскатки.

После снятия детали со станка возможная погрешность формы цилиндрической или конической поверхности и её расположение относительно базовой конструкторской поверхности искажаются.

На примере обработки цилиндрических кольцевых заготовок рассмотрим процесс контроля погрешности формы и расположения в свободном положении детали на специальном контрольно-измерительном поворотном столе или с помощью координатно-измерительной машины.

На рис. 2 представлена схема контроля образующей цилиндрической поверхности относительно произвольно выбранной начальной точки О. Эта точка является началом координатной системы и центром поворота проверяемого кольца на поворотном

столе специального контрольно-измерительного прибора.

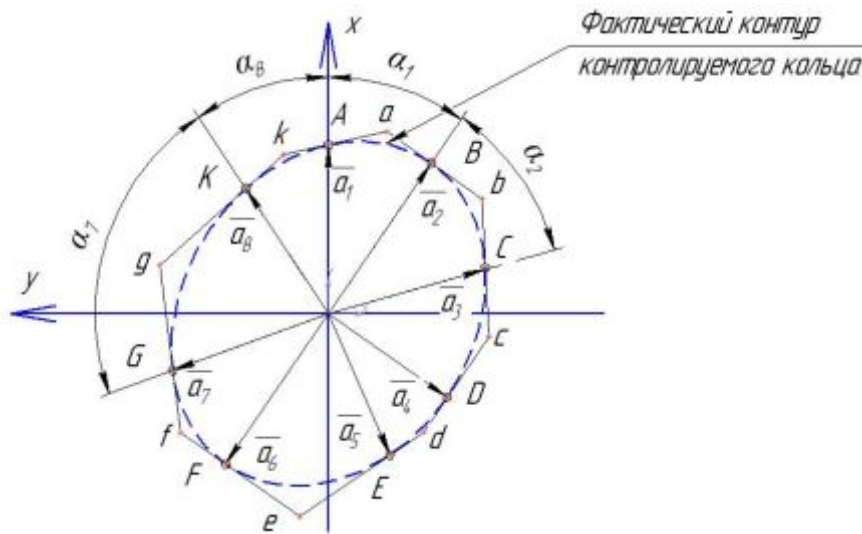


Рис. 2. Схема контроля образующей цилиндрической поверхности

В результате поворота проверяемого кольца производим контроль в точках А, В, С, ..., Г и К и фиксируем значения этих векторов $\vec{a}_1, \vec{a}_2, \vec{a}_3, \dots, \vec{a}_7, \vec{a}_8$. Эти векторы определяют наиболее приближённое положение контролируемых точек А, В, С, ..., Г и К в соответствующих секторах фактического контура контролируемого кольца. Углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_7, \alpha_8$ соответственно являются параметрами контролируемых векторов. Проведя в контролируемых точках касательные линии, получим многоугольник, вершины которого a, b, c, \dots, d и k создают векторную связь контролируемого объекта. Для определения векторов в точках a, b, c, \dots, d и k необходимо составить систему уравнений. Обозначив соответственно положение точки a вектором \vec{b}_1 , в точке b вектором \vec{b}_2 и т.д., получим систему связанных уравнений векторов. Так как точки А, В, С, ..., Г и К являются серединами сторон секторов, то имеем:

$$\begin{aligned} \vec{a}_1 &= 0,5(\vec{b}_8 + \vec{b}_1); \\ \vec{a}_2 &= 0,5(\vec{b}_1 + \vec{b}_2); \\ \vec{a}_3 &= 0,5(\vec{b}_2 + \vec{b}_3); \\ \vec{a}_4 &= 0,5(\vec{b}_3 + \vec{b}_4); \\ \vec{a}_5 &= 0,5(\vec{b}_4 + \vec{b}_5); \\ \vec{a}_6 &= 0,5(\vec{b}_5 + \vec{b}_6); \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \vec{a}_7 &= 0,5(\vec{b}_6 + \vec{b}_7); \\ \vec{a}_8 &= 0,5(\vec{b}_7 + \vec{b}_8). \end{aligned}$$

Для оценки фактического контура контролируемого кольца требуется определить векторы $\vec{b}_1, \vec{b}_2, \vec{b}_3, \vec{b}_4, \vec{b}_5, \vec{b}_6, \vec{b}_7, \vec{b}_8$.

Равенства (1) представляют собой систему восьми уравнений с восемью неизвестными. Для решения этой системы произведем преобразование векторов [1].

Вычитая из предшествующего уравнения следующее, составим систему уравнений:

$$\begin{aligned} \vec{a}_1 &= 0,5(\vec{b}_8 + \vec{b}_1); \\ -\vec{a}_2 &= 0,5(\vec{b}_1 + \vec{b}_2); \\ \vec{a}_3 &= 0,5(\vec{b}_2 + \vec{b}_3); \\ -\vec{a}_4 &= 0,5(\vec{b}_3 + \vec{b}_4); \\ \vec{a}_5 &= 0,5(\vec{b}_4 + \vec{b}_5); \\ -\vec{a}_6 &= 0,5(\vec{b}_5 + \vec{b}_6); \\ \vec{a}_7 &= 0,5(\vec{b}_6 + \vec{b}_7); \\ -\vec{a}_8 &= 0,5(\vec{b}_7 + \vec{b}_8). \end{aligned}$$

Сложив теперь все полученные равенства, получим:

$$\vec{a}_1 - \vec{a}_2 + \vec{a}_3 - \vec{a}_4 + \vec{a}_5 - \vec{a}_6 + \vec{a}_7 - \vec{a}_8 = \vec{b}_8. \quad (2)$$

Соотношение (2) позволяет определить и построить вектор \vec{b}_8 и тем самым найти

вершину вогнутости К на одном из участков многогранника.

Используя полученное значение вектора \vec{b}_8 по уравнениям (1), возможно определить векторы b_i для всех вершин многоугольника. Это позволяет определить минимальный диаметр вписанной окружности в исследуемый многогранник и, соответственно, определить максимальный диаметр описанной окружности для данного многогранника. Центры данных окружностей определяют линию, на которой находится центр фактической фигуры проверяемого кольца. На примере сектора многогранника с углом α_1 рассмотрим искажение фигуры, которая может быть получена при закреплении маложесткого кольца на различных этапах обработки.

Рассмотрим методику оценки погрешности формы и расположения проверяемого кольца. На рис. 3 показан элемент схемы многогранной кольцевой фигуры, погреш-

ность искажения формы которой сформирована на участке сектора с углом α . Это искажение определяется разностью модулей векторов \vec{a}_1 и \vec{a}_2 . Если радиус R_{\max} определяется модулем вектора $|\vec{a}_1|$, то R_{\min} определяется модулем вектора $|\vec{a}_2|$. Фактический, наиболее вероятный радиус R_B , показанный на рис. 3 пунктирной линией, будет сформирован за счёт перемещения из номинального центра O в новые положения. Центр вектора \vec{a}_1 переместится в точку O_1 , а центр вектора \vec{a}_2 в точку O_2 . При этом величины перемещений образующих радиусов R_{\max} и R_{\min} будут определять величины вылетов их над линией АВ, соединяющей измеренные точки многогранника. Величины вылетов f_1 и f_2 , соответственно, определяют возможные образующие поверхности многогранника фактической фигуры кольца.

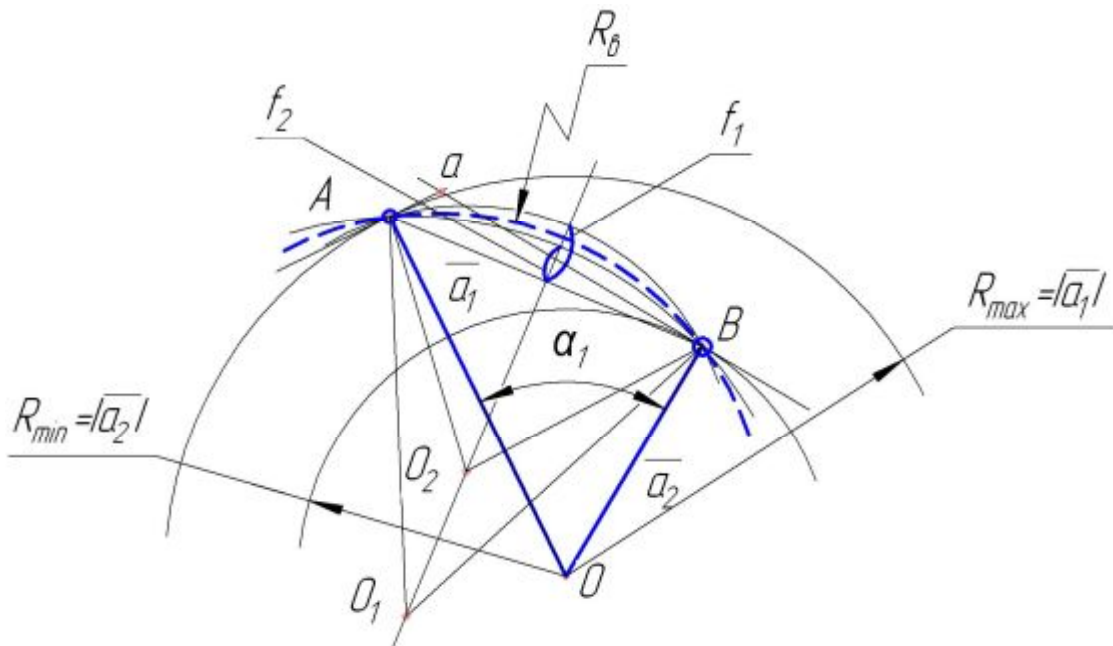


Рис. 3. Элемент схемы многогранной кольцевой фигуры

Наиболее вероятная величина f_B , определяющая образующую поверхность фактического радиуса R_B относительно максимального радиуса $R_{\max} = |\vec{a}_1|$, равна

$$f_B = 0,5(f_1 - f_2).$$

На основании схемы, представленной на рис. 3, величина f_B равна

$$f_B = 0,5(R_{\max} - R_{\min})(1 - \cos 0,5\alpha_1).$$

Значение измеренного контура в этом сечении находится между измеренными векторами \vec{a}_1 и \vec{a}_2 . Длина окружности кольца остаётся постоянной, т.е. полученной и измеренной на токарном станке при его изготовлении. Эта величина равна $2\pi R_{\text{фак}}$.

Используя это условие, можно найти фактическое отклонение профиля кольца на всех участках проверяемого контура с угла-

ми $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \dots \alpha_7$ и α_8 . Суммарный угол при этом должен составлять 360° .

Таким образом, возможно производить контроль колец, которые получали искажение профиля на различных этапах обработки, и выявлять источники их проявления. Это позволяет намечать пути совершенствования технологических процессов изготовления маложестких деталей и влиять на наследственность технологических операций различного вида.

Библиографический список

1. Дёмин, Ф.И. Технология изготовления основных деталей газотурбинных двигателей [Текст]: учеб. пособие / Ф.И. Дёмин, Н.Д. Проничев, И.Л. Шитарев – М.: Машиностроение, 2002.
2. Болтянский, В.Г. Преобразование векторов [Текст] / В.Г. Болтянский, И.М. Яглом. - М.: Просвещение, 1964.

DETERMINATION OF ACCURACY OF THE FORM AND ARRANGEMENT OF WORKING CYLINDRICAL AND CONIC SURFACES WHEN PROCESSING DETAILS WITH SMALL RIGIDITY

© 2012 F. I. Dyomin, T. V. Polyakova

Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov
(National Research University)

This paper deals with the problem of providing a given accuracy in the manufacture details with small rigidity. A statistical study of different roll out rings of nickel-chromium alloys. A scheme for error control in the shape and location of the cylindrical surfaces in a special control-measuring equipment.

Small rigidity, workpiece, rolling, residual stresses, form error, statistics, vectors.

Информация об авторах

Дёмин Феликс Ильич, доктор технических наук, профессор кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). Область научных интересов: исследование точности изготовления деталей газотурбинных двигателей.

Полякова Татьяна Викторовна, аспирант кафедры производства двигателей летательных аппаратов, Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королёва (национальный исследовательский университет). E-mail: tatjana-galuzina@rambler.ru. Область научных интересов: исследование точности изготовления маложестких деталей.

Dyomin Felix Pyich, doctor of technical sciences, professor. Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University), department of Aircraft Engines Industry. Area of research: accuracy research problem when manufacturing details of gas-turbine engines.

Polyakova Tatyana Victorovna, engineer, Samara State Aerospace University named after academician S.P. Korolyov (National Research University), department of Aircraft Engines Industry. E-mail: tatjana-galuzina@rambler.ru. Area of research: accuracy research problem when manufacturing pads with small rigidity.