

УДК 658.562, 621.74:629.7

## УПРАВЛЕНИЕ КАЧЕСТВОМ ПРОИЗВОДСТВА ЛОПАТОК ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ С НАПРАВЛЕННОЙ КРИСТАЛЛИЗАЦИЕЙ

© 2002 В. А. Барвинок<sup>1</sup>, В. П. Голанов<sup>2</sup>, А. Н. Чекмарев<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Самарский государственный аэрокосмический университет

<sup>2</sup>ОАО “Моторостроитель”, г. Самара

Предложена методика освоения статистических методов управления качеством производства лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с направленной кристаллизацией, позволяющая устанавливать количественные показатели качества, определять технологические нормы, предупреждать появление несоответствий в производстве и вводить упреждающие воздействия для корректировки технологического процесса (ТП).

Общеизвестно, что одной из важнейших проблем создания надежно работающих ГТД является повышение ресурса работы лопаток турбины. Перспективным направлением повышения их прочности и надежности является изготовление рабочих лопаток турбины литьем с направленной кристаллизацией или изготовление монокристаллических лопаток [1]. Однако в производстве таких лопаток до настоящего времени имеются определенные трудности, которые приводят часто к значительным несоответствиям, основные виды которых представлены в табл. 1. Основные виды дефектов, возникающие при производстве рабочих лопаток, носят качественный характер и часто трудно поддаются определению. Процесс производства очень сложен, и поэтому невозможно определить причину возникновения брака в реальной ситуации. В этом случае необходимо внедрять статистические методы, которые дают возможность проследить весь техноло-

гический процесс производства лопаток и держать под постоянным контролем самые ответственные этапы ТП. Поэтому повышение качества изготовления рабочих лопаток турбины является актуальным.

Данную проблему можно решать различными способами. Например, на ОАО “Моторостроитель” проводится сплошной контроль, который предотвращает выпуск дефектной продукции. Использование такого метода значительно увеличивает издержки предприятия. Кроме того, брак при данном методе контроля продукции обнаруживается после того, как затрачены средства на выпуск изделия, что также снижает эффективность производства.

Современной формой повышения качества продукции является управление качеством с использованием статистических методов [2]. Сущность управления качеством в производстве заключается в обеспечении условий, при которых в любой момент време-

Таблица 1. Виды несоответствий лопаток турбины

№	Тип несоответствий, %	1999 г.	2000 г.	2001 г.
1	Засор, шлак	16,92	12,98	8,65
2	Спай, корол	3,89	1,24	0,45
3	Смещение стержня	6,31	6,52	0,95
4	Плена	2,11	4,92	3,90
5	Трещины	3,24	1,32	0,75
6	Геометрия тонкой стенки	2,95	8,34	3,95
7	Неоформление профиля	0,92	-	-
8	Макроструктура струи	16,11	14,31	19,30
9	Незалив, пролив	4,7	2,15	-
10	Рыхлота	0,72	0,58	1,20
11	Прочий брак	0,43	2,29	3,15
	Выход годных, %	41,45	45,36	57,70

ни на любом этапе производственного процесса можно получить информацию о качестве изготавливаемой продукции и в случае обнаружения несоответствий установить, на каком этапе они возникли, и принять меры по их ликвидации. При этом эффективным инструментом получения и анализа информации являются статистические методы [3].

В данной работе анализируется технологический процесс изготовления лопаток ГТД с целью управления качеством с использованием статистических методов.

Для успешной работы по усовершенствованию качества производства рабочих лопаток ГТД необходимо выявить основные производственные дефекты и их приоритетность. В табл. 1 приведены данные видов несоответствий лопаток ГТД за три года, на рис. 3 – диаграммы Парето.

Из табл. 1 и диаграммы Парето видно следующее:

- расположение типов несоответствий друг относительно друга постоянно меняется;
- процент брака по конкретному виду несоответствий то увеличивается, то уменьшается;
- выход годной продукции постоянно увеличивается.

Все это свидетельствует о том, что мероприятия, направленные на уменьшение количества брака, оказывают малое влияние на качество продукции, а процент брака по

конкретному виду несоответствий остается случайной величиной.

Для проведения анализа технологического процесса изготовления рабочих лопаток ГТД (рис. 1) в различных сечениях (рис. 2) были собраны статистические данные на операции “Предварительный замер стенки” технологического процесса на механическую обработку и контроль лопатки. Минимальные толщины стенок по профилю пера лопатки представлены в табл. 2.

Толщина стенок играет огромную роль в долговечности лопаток турбины, поэтому при предварительном замере стенок устанавливается минимальное значение толщины. Но с увеличением толщины стенки увеличивается и масса лопатки, а следовательно, и масса всего ГТД, что нежелательно. Поэтому в технических условиях (ТУ) оговаривается интервал, в котором должна находиться толщина стенок лопатки (табл. 3).

Для упрощения и ускорения сбора статистических данных толщин стенок лопаток был разработан контрольный листок. Для каждого из 21 сечения необходим отдельный контрольный листок, пример которого представлен в табл. 4. При заполнении контрольного листка после каждого замера в соответствующей клетке ставится знак “X”.

Данные для построения гистограмм для каждого сечения приведены в табл. 5, а сами гистограммы – на рис. 4, 5.

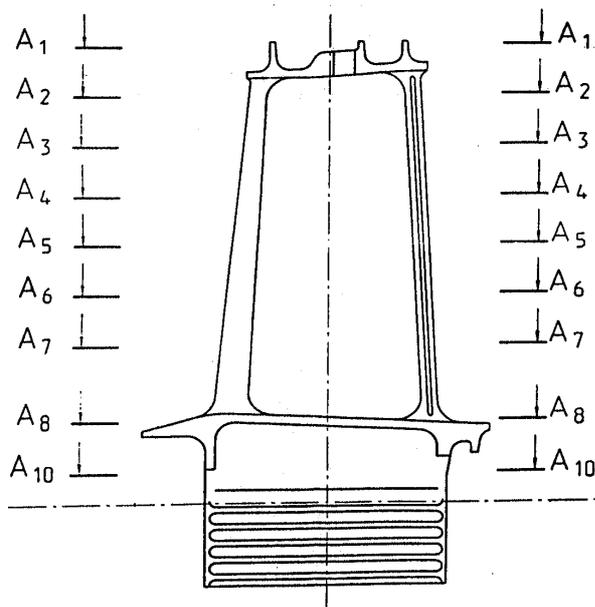


Рис. 1. Главный вид лопатки турбины

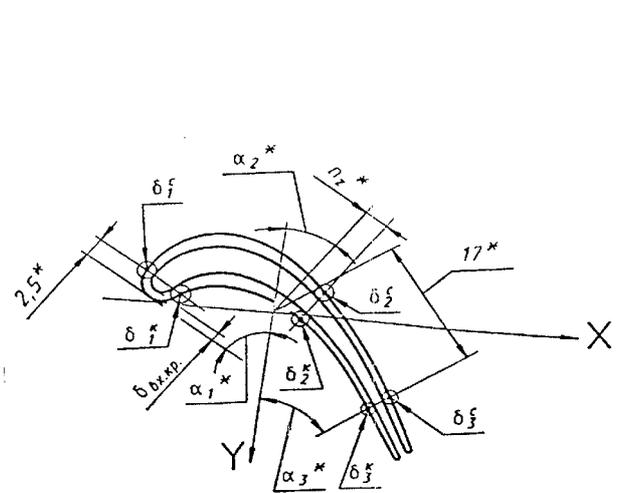


Рис. 2. Сечение лопатки турбины

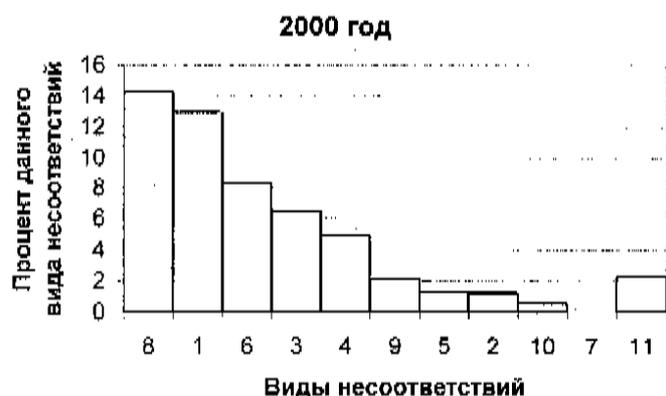
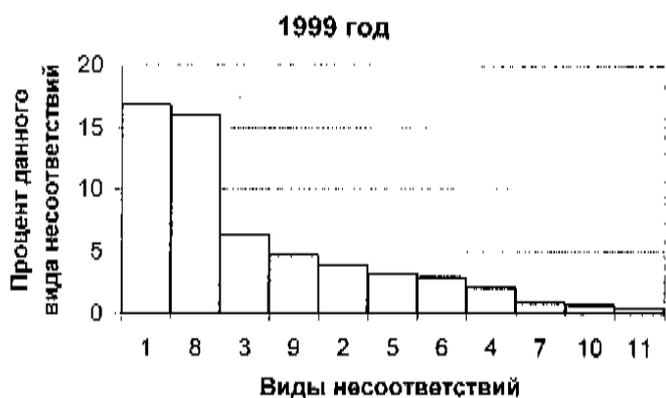


Рис. 3. Диаграммы Парето

Основным аспектом управления качеством изготовления лопаток ГТД статистическими методами является исследование воспроизводимости процесса, уровень которого в большинстве случаев количественно оценивается следующими коэффициентами:  $C_p$ ,  $C_{pv}$ ,  $C_{pK}$ ,  $C_{pL}$  и  $K$ .

Коэффициент  $C_p$  характеризует меру потенциальной характеристики процесса и вычисляется по формуле

$$C_p = \frac{S_v - S_L}{6S}, \quad (1)$$

где  $S_v$ ,  $S_L$  – значения верхней и нижней границ поля допуска по ТУ;  $S$  – среднее стандартное отклонение, характеризующее реальный процесс.

Коэффициент  $C_p$  характеризует разброс наблюдаемых параметров, но не учитывает смещения среднего значения процесса  $\bar{X}$ . Этот учет осуществляется коэффициентами  $C_{pv}$ ,  $C_{pK}$ ,  $C_{pL}$ , отражающими меру реальной характеристики процесса и вычисляемыми по следующим формулам:

$$C_{pv} = \frac{S_v - \bar{X}}{3S}, \quad (2)$$

$$C_{pL} = \frac{\bar{X} - S_L}{3S}, \quad (3)$$

$$C_{pK} = \min(C_{pv}, C_{pL}). \quad (4)$$

Обозначение  $\min$  в выражении (4) означает, что коэффициент равен минимальному из двух значений (2) или (3), т. е. коэффициент  $C_{pK}$  характеризует нормированное расстояние между средним значением процесса и ближайшим пределом ТУ.

Коэффициент  $K$  дает количественную оценку нецентрированности процесса, характеризует степень приближения реальной характеристики процесса к уровню его потенциальной характеристики и вычисляется по формуле

$$K = \frac{2|m - \bar{X}|}{S_v - S_L}, \quad 0 \leq K \leq 1, \quad (5)$$

где  $m = 1/2(S_v + S_L)$  – среднее значение контролируемого параметра по ТУ.

Таблица 2. Минимальные толщины стенок по профилю пера лопатки, мм

Сечение	$\delta_1^K$	$\delta_1^C$	$\delta_2^K$	$\delta_2^C$	$\delta_3^K$	$\delta_3^C$	$\delta_{ВХ.КР}$
A <sub>3</sub> – A <sub>3</sub>	0,95 <i>min</i>	1,00 <i>min</i>	0,95 <i>min</i>	0,90 <i>min</i>	0,75 <i>min</i>	0,75 <i>min</i>	0,90 <i>min</i>
A <sub>5</sub> – A <sub>5</sub>	0,95 <i>min</i>	1,00 <i>min</i>	1,05 <i>min</i>	1,05 <i>min</i>	0,75 <i>min</i>	0,85 <i>min</i>	0,95 <i>min</i>
A <sub>7</sub> – A <sub>7</sub>	0,90 <i>min</i>	0,95 <i>min</i>	1,20 <i>min</i>	1,25 <i>min</i>	0,85 <i>min</i>	1,10 <i>min</i>	1,05 <i>min</i>

Таблица 3. Толщина стенки лопатки по ТУ, мм

№	Сечение			Min	Max
1	Спинка	A <sub>3</sub> – A <sub>3</sub>	1	0,9	1,55
2			2	0,8	1,45
3			3	0,65	1,15
4		A <sub>5</sub> – A <sub>5</sub>	1	0,9	1,6
5			2	0,95	1,65
6			3	0,75	1,25
7		A <sub>7</sub> – A <sub>7</sub>	1	0,85	1,6
8			2	1,15	1,9
9			3	1,0	1,55
10	Корыто	A <sub>3</sub> – A <sub>3</sub>	1	0,85	1,5
11			2	0,85	1,55
12			3	0,65	1,15
13		A <sub>5</sub> – A <sub>5</sub>	1	0,85	1,55
14			2	0,95	1,65
15			3	0,65	1,15
16		A <sub>7</sub> – A <sub>7</sub>	1	0,8	1,55
17			2	1,15	1,95
18			3	0,75	1,3
19	Кромка	A <sub>3</sub> – A <sub>3</sub>		0,85	1,35
20		A <sub>5</sub> – A <sub>5</sub>		0,85	1,4
21		A <sub>7</sub> – A <sub>7</sub>		0,95	1,55

 Таблица 4. Контрольный листок для сечения 5 (спинка, A<sub>5</sub> – A<sub>5</sub>, 2)

Номинал	Толщина																					Частота
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
	0,8																					0
	0,9	X																				1
*	1	X	X	X	X																	4
	1,1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X								13
	1,2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	19
1,3	1,3	X	X	X	X	X	X	X	X													8
	1,4	X	X	X																		3
	1,5	X	X																			2
*	1,6																					0
	1,7																					0
		Итого:																				50

\* – граница поля допуска (по чертежу).

Таблица 5. Данные для построения гистограмм

1				
№	Начало	Конец	Центр	Частота
1	0,85	1,01	0,93	1
2	1,01	1,17	1,09	1
3	1,17	1,33	1,25	3
4	1,33	1,49	1,41	3
5	1,49	1,65	1,57	22
6	1,65	1,81	1,73	20
2				
№	Начало	Конец	Центр	Частота
1	0,67	0,76	0,715	5
2	0,76	0,85	0,805	8
3	0,85	0,94	0,895	16
4	0,94	1,03	0,985	10
5	1,03	1,12	1,075	8
6	1,12	1,21	1,165	3
3				
№	Начало	Конец	Центр	Частота
1	0,67	0,76	0,715	3
2	0,76	0,85	0,805	9
3	0,85	0,94	0,895	17
4	0,94	1,03	0,985	12
5	1,03	1,12	1,075	8
6	1,12	1,21	1,165	1
4				
№	Начало	Конец	Центр	Частота
1	1,09	1,21	1,15	2
2	1,21	1,33	1,27	1
3	1,33	1,45	1,39	3
4	1,45	1,57	1,51	8
5	1,57	1,69	1,63	14
6	1,69	1,81	1,75	22
5				
№	Начало	Конец	Центр	Частота
1	0,85	0,96	0,905	1
2	0,96	1,07	1,015	4
3	1,07	1,18	1,125	13
4	1,18	1,29	1,235	19
5	1,29	1,4	1,345	8
6	1,4	1,51	1,455	5
6				
№	Начало	Конец	Центр	Частота
1	0,74	0,82	0,78	9
2	0,82	0,9	0,86	0
3	0,9	0,98	0,94	17
4	0,98	1,06	1,02	15
5	1,06	1,14	1,1	7
6	1,14	1,22	1,18	2

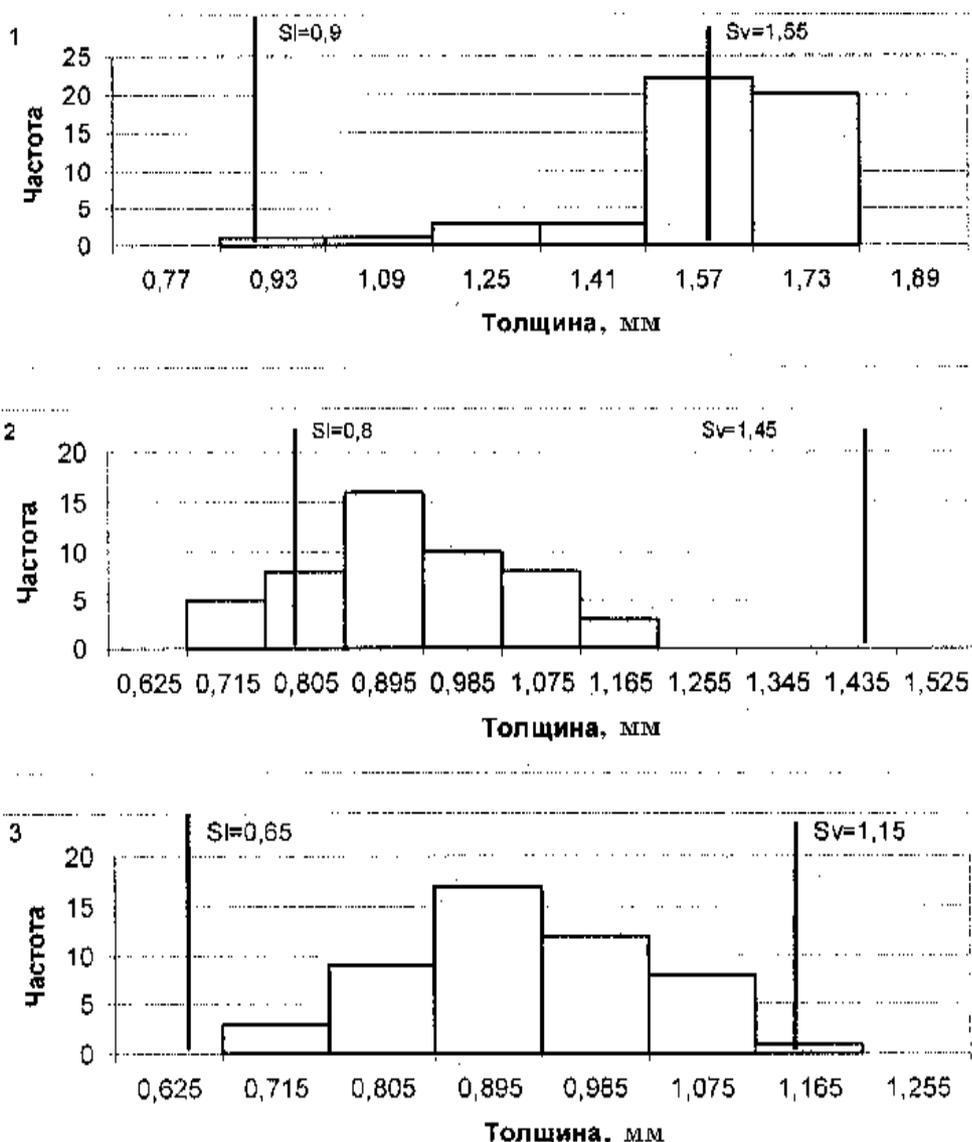


Рис. 4. Гистограммы толщин стенок лопатки для спинки в сечении  $A_3 - A_3$

Взаимосвязь реальной характеристики  $C_{pK}$  процесса и его потенциальной характеристики  $C_p$  выражается следующим соотношением:

$$C_{pK} = C_p(1 - K). \quad (6)$$

Из выражения (6) видно, что  $C_{pK} = C_p$  только в том случае, когда среднее значение процесса совпадает с серединой диапазона заданного ТУ. В противном случае  $C_{pK} < C_p$ , т. е. оптимальная ситуация состоит в том, чтобы среднее значение требований ТУ совпадало со средним значением реального процесса ( $m = \bar{X}$  и  $K = 0$ ).

В зависимости от значений  $C_p$  производственный процесс оценивается как:

- точный, при  $1,33 < C_p < 1,67$ ;
- удовлетворительный, при  $1,0 < C_p < 1,33$  (при  $C_p = 1,0$  вероятность появления брака составляет 0,27%; при  $C_p = 1,33$  вероятность появления брака меньше 0,01%);
- неудовлетворительный, при  $0,67 < C_p < 1,0$  (при  $C_p = 0,67$  вероятность появления брака составляет 4,44%).

Указанные коэффициенты дают полную информацию о процессе в случае симметричного распределения и симметричного двухстороннего допуска, т. е. нормального распре-

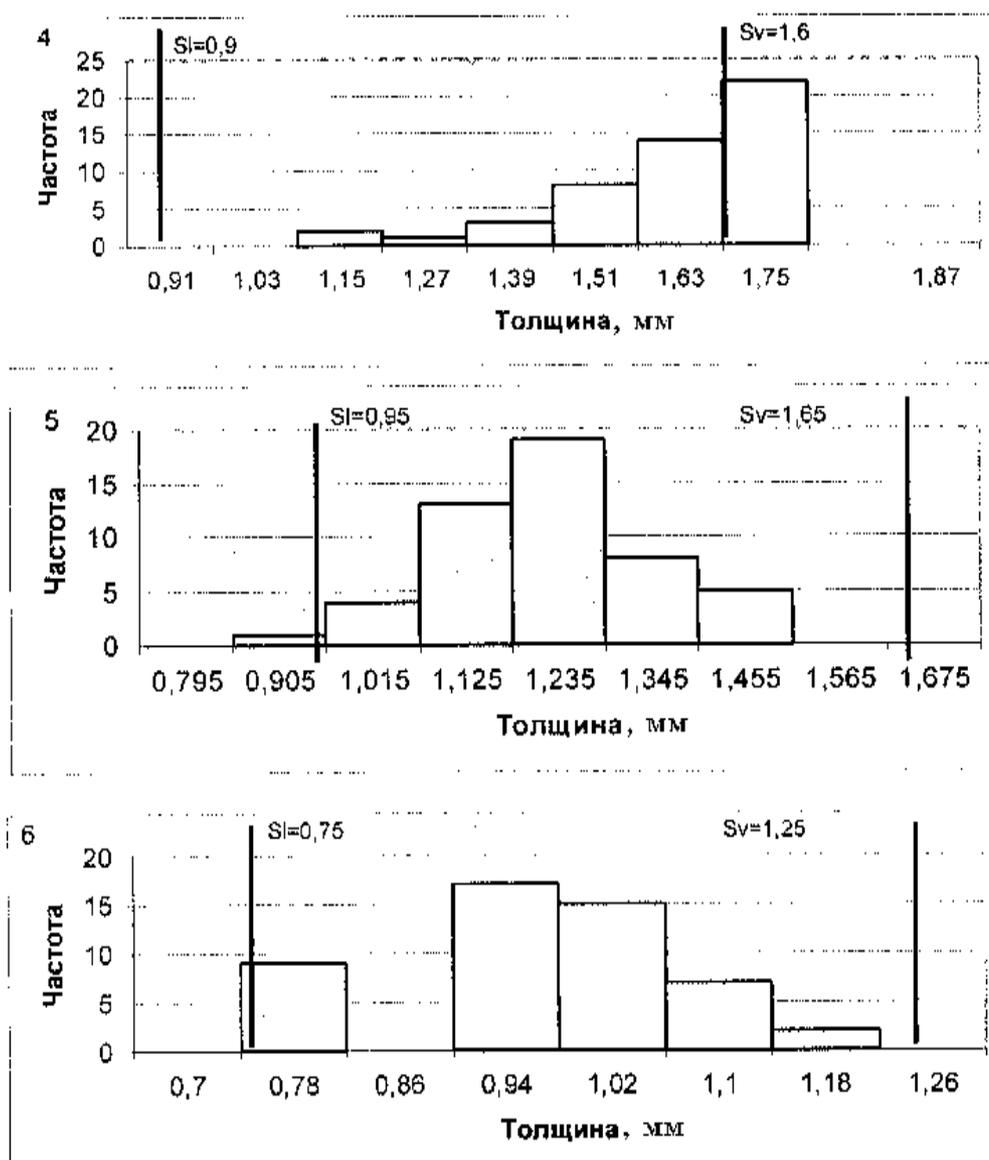


Рис. 5. Гистограммы толщин стенок лопатки для спинки в сечении  $A_5 - A_5$

деления. В случае ненормального распределения коэффициенты  $C_p$  и  $C_{pk}$  не столь информативны, могут давать ложную информацию или быть вообще неприменимы. Кроме того, поле рассеяния процесса, не имеющего нормального распределения, не описывается с помощью правила “6 сигм”, и поэтому необходимо вычисление и введение дополнительного коэффициента.

Для проверки гипотезы о нормальном законе распределения используем способ В. И. Романовского [4]. С этой целью определяется величина  $A$

$$A = \frac{|\chi^2 - r|}{\sqrt{2 \cdot r}}, \quad (7)$$

где  $\chi$  - критерий К. Пирсона, определяемый по формуле

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^m (f_{iЭ} - f_{iТ})^2}{f_{iТ}},$$

$m$  – число интервалов;  $f_{iЭ}$  – эмпирическая частота;  $f_{iТ}$  – теоретическая частота;  $r = m - p - 1$  – число степеней свободы;  $p$  – число параметров теоретического распределения (для нормального закона  $p = 2$ ).

Если  $A < 3$ , то гипотеза о нормальном законе распределения принимается, а если  $A \geq 3$ , то гипотеза бракуется.

Результаты расчетов  $C_p$ ,  $K$  и  $C_{pK}$  для всех сечений приведены в табл. 6.

Проведем краткий анализ результатов значений толщины стенок лопаток в различных сечениях  $A_3 - A_3$  (рис. 4) и  $A_5 - A_5$  (рис. 5).

Для сечения 1:  $A = 29,728$  – распределение не подчиняется нормальному закону.  $C_p = 0,832$ ,  $C_{pK} = -0,084$ , это означает, что контроль процесса неудовлетворительный, а среднее значение вышло за границы поля допуска, т. е. оборудование настроено на другое среднее значение.

Для сечения 2:  $A = 0,151$  – распределение подчиняется нормальному закону.  $C_p = 1,541$ ,  $C_{pK} = 0,595$  – состояние процесса хорошее, но по  $C_{pK}$  видно, что настройка оборудования немного сместилась, но еще не вышла за пределы нормы.

Для сечения 3:  $A = 0,437$  – распределение подчиняется нормальному закону.  $C_p = 2,005$ ,  $C_{pK} = 1,815$  – состояние процес-

са идеальное, и настройка оборудования верна.

Для сечения 4:  $A = 16,540$  – распределение не подчиняется нормальному закону;  $C_p = 1,244$ ,  $C_{pK} = -0,081$ . Это указывает на необходимость усилить контроль процесса, провести анализ факторов, влияющих на разброс, и провести мероприятия по улучшению состояния процесса, так как среднее значение вышло за границы интервала, т. е. сбилась настройка оборудования.

Для сечения 5:  $A = 0,036$  – распределение значений подчиняется нормальному закону.  $C_p = 1,732$ ,  $C_{pK} = 1,345$ .

Для сечения 6:  $A = 8,692$  – распределение не подчиняется нормальному закону.  $C_p = 1,735$ ,  $C_{pK} = 1,508$ .

Для сечений 5 и 6 состояние процесса в обоих случаях идеальное, настройка оборудования верна, и отсутствует вероятность появления брака.

Таблица 6. Значения  $C_p$ ,  $K$  и  $C_{pK}$  для всех сечений

№ сечения	$C_p$	$K$	$C_{pK}$
1	0,832	1,101	-0,084
2	1,541	0,614	0,595
3	2,005	0,095	1,815
4	1,244	1,065	-0,081
5	1,732	0,223	1,345
6	1,735	0,131	1,508
7	1,030	1,091	-0,093
8	2,323	0,212	1,830
9	1,659	0,585	0,688
10	1,444	0,641	0,518
11	1,767	0,750	0,442
12	0,917	1,032	-0,029
13	1,551	0,328	1,042
14	0,978	0,929	0,070
15	1,151	0,885	0,133
16	1,298	0,822	0,231
17	0,420	2,148	-0,482
18	1,381	0,831	0,233
19	0,546	1,397	-0,217
20	0,529	1,493	-0,261
21	0,352	1,423	-0,149

### Выводы

1. Использование статистических методов в производстве лопаток ГТД позволит установить количественные показатели качества, обосновать нормы на параметры изделий и процессов и иметь объективные данные для принятия решения о доработке или снятии изделия с производства.

2. Построенные гистограммы и подсчитанные коэффициенты  $C_p$ ,  $C_{pK}$  позволяют квалифицировать текущее состояние производства с позиции качества выпускаемой продукции, эффективно управлять качеством лопаток ГТД на стадии производства.

### Список литературы

1. Основы конвертирования авиационных ГТД в газотурбинные установки назем-

ного применения: Учебное пособие./ Н. Д. Кузнецов и др. Самара: СГАУ, 1995. 27с.

2. Барвинок В. А., Чекмарев А. Н., Голанов В. П. Методика применения статистических методов при анализе причин дефектов лопаток ГТД в процессе их производства./ Тез. докл. международной НТК "Сертификация и управление качеством продукции. Брянск: БГТУ, 2002. С. 180-182.

3. Чекмарев А. Н., Барвинок В. А., Шалавин В. В. Статистические методы управления качеством. М.: Машиностроение, 1999. 320 с.

4. Информационно-статистические методы в технологии машиностроения / В. Г. Григорович и др. – М.: ГУП Издательство "Нефть и газ" РГУ нефти и газа им. И. М. Губкина, 2000. – 184 с.

## MANAGEMENT OF QUALITY OF PRODUCTION OF TURBINE SHOULDER BLADES GTD WITH DIRECT CRYSTALLIZATION

© 2002 V. A. Barvinok<sup>1</sup>, V. P. Golanov<sup>2</sup>, A. N. Chekmarev<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Samara State Aerospace University

<sup>2</sup>«Motorostroitel» Joint Stock Company, Samara

A strategy is offered of mastering the statistical methods of quality control of production of shoulder blades GTD with the direct crystallization, allowing to install quantitative quality factors, define technological rates, warn the development of discrepancies in the production and enter anticipatory influences for the adjustment of technological process (TP).