

УДК 621.01:629.7.01

А.В. ТОМАШЕВСКИЙ<sup>1</sup>, В.И. ФОМИЧЕВА<sup>2</sup><sup>1</sup>Запорожский национальный технический университет, Украина<sup>2</sup>ГП «Ивченко-Прогресс», Запорожье, Украина

## СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ТУРБИННЫХ ЛОПАТОК

*Рассмотрены особенности технологии изготовления турбинных лопаток высокого давления газотурбинных двигателей. Сделан анализ дефектов турбинных лопаток, забракованных по результатам контроля их качества за последние три года методами люминесцентного (по поверхностным дефектам) и рентгеновского контроля. Выделены наиболее распространенные дефекты. Выдвинуто предположение о существенном влиянии на дефектность лопаток вида кристаллизации слитков. Предложены непараметрический критерий Манна-Уитни для проверки выдвинутого предположения как статистической гипотезы. Доказано существенное влияние вида кристаллизации (направленная или равноосная), на основные виды дефектов.*

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, рабочая лопатка, авиадвигатель, направленная кристаллизация, равноосная кристаллизация, критерий Манна-Уитни.

### Введение

В настоящее время газотурбинные двигатели (ГТД) получили огромное распространение в авиационных силовых установках и широко внедряются в другие отрасли техники.

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 газотурбинных двигателей литьем с направленной кристаллизацией лопаток.

Однако в производстве таких лопаток до настоящего времени имеются определенные трудности, которые приводят часто к значительным несоответствиям (до 50%), основными видами которых являются: засор, шлак, спай, королек, смещение стержня, трещины, несоответствие макроструктуры, струи, геометрия тонкой стенки, незалив и др. Основные виды дефектов, возникающих при производстве лопаток, носят качественный характер и часто трудно поддаются определению. Процесс производства очень сложен, и поэтому невозможно определить точную причину возникновения брака. В подобной ситуации необходимо внедрять статистические методы, которые дают возможность, обоснованно держа под постоянным контролем самые ответственные этапы технологического процесса (ТП). От совершенства и стабильности ТП во многом зависит качество изготовления лопаток.

Поэтому повышение качества изготовления ра-

бочих лопаток ГТД является актуальной проблемой.

В данной работе ставится задача – сделать статистический анализ качества изготовления турбинных лопаток на основе сводок брака за три года по литейному участку.

### 1. Материалы исследования и анализ полученных результатов

#### Особенности технологического изготовления и оценка качества турбинных лопаток

Турбинные лопатки для ГТД изготавливают из жаропрочных никелевых сплавов [1,2].

Литейная технология – это процесс получения литых заготовок путем заливки расплавленного металла в специальную форму, полость которой имеет конфигурацию заготовки (детали). При охлаждении залитый металл затвердевает и в твердом состоянии сохраняет конфигурацию той полости, в которую он был залит. Конечную продукцию называют отливкой. В процессе кристаллизации расплавленного металла и последующего охлаждения формируются механические и эксплуатационные свойства отливок.

Отливки изготавливаются двумя методами: высокоскоростной направленной кристаллизацией на установках типа УВНК-8П; равноосной (неконтролируемой, из поверхности вглубь) кристаллизацией на установках типа УППФ-3М.

Основные технологические операции:

а) изготовление полуформ по модельным плитам;

- б) изготовление стержней;
- в) сборка формы с постановкой стержней и подготовка ее к заливке;
- г) заливка форм расплавленным металлом;
- д) затвердевание и охлаждение отливок;
- е) выбивка отливок из форм и стержней из отливок;
- ж) отделение литниковой системы от отливок, их очистка и зачистка;
- и) термообработка отливок;
- к) контроль качества отливок.

Технический контроль возложен на отдел технического контроля предприятия.

Основные задачи технического контроля: выявление причин отклонения качества отливок от заданного и нарушений технологического процесса (контроль свойств формовочных и стержневых смесей, уплотнения в форме, качества стержней и правильности их установки, химического состава и технологических свойств сплава, температуры заливки и т. д.), разработка мероприятий по повышению качества продукции; установление соответствия режимов и последовательности выполнения технологических операций, предусмотренных технической документацией; установление соответствия качества материалов, требуемых для производства отливок; литейной оснастки (модели, модельные плиты и др.). Контроль отливок, прежде всего, осуществляют визуально для выявления брака или отливок, подлежащих исправлению.

Внутренние дефекты отливок выявляют в специализированных лабораториях рентгенконтролем и люминесцентной дефектоскопией.

Общее число определяемых дефектов равно 20.

Основные виды дефектов:

- 1 – сор;
- 2 – выход стержня;
- 3 – модельная трещина;
- 4 – горячая трещина;
- 5 – механическое повреждение;
- 6 – рыхлота;
- 7 – плена;
- 8 – королек;
- 9 – усадочная раковина;
- 10 – недолив;
- 11 – пригар;
- 12 – механическое повреждение модели;
- 13 – изменение размеров;
- 14 – разностенность;
- 15 – спай;
- 16 – коробление;
- 17 – залив;
- 18 – несоответствие структуры;
- 19 – холодная трещина;
- 20 – зарез.

Сводка брака за год по литейному участку позволила сделать ранжирование вида дефектов по числу забракованных изделий по каждому дефекту.

Таблица 1  
Ранжирование вида дефектов

Вид дефекта	количество дефектов	%, брака
18 – несоответствие структуры	1223	41,08
1 – сор	890	29,90
2 – выход стержня	269	9,04
4 – горячая трещина	169	5,68
13 – изменение размеров	117	3,93
14 – разностенность	85	2,86
17 – залив	54	1,81
10 – недолив	41	1,38
16 – коробление	21	0,71
6 – рыхлота	19	0,64
9 – усадочная раковина	19	0,64
8 – королек	17	0,57
11 – пригар	14	0,47
12 – механическое повреждение	14	0,47
15 – спай	10	0,34
3 – модельная трещина	4	0,13
5 – механическое повреждение	4	0,13
20 – зарез	3	0,10
7 – плена	2	0,07
19 – холодная трещина	2	0,07

Из приведенных данных можно сделать вывод, что наибольшее количество дефектов приходится на дефекты: сор, выход стержня, горячая трещина, изменение размеров, несоответствие структуры.

1 – Сор – дефект в виде формовочного материала, внедрившегося в поверхностные слои отливки, захваченного потоками жидкого металла.

2 – Выход стержня – дефект в виде залитых металлом отверстия или полости в отливке из-за выхода стержня.

4 – Горячая трещина – дефект в виде разрыва или надрыва тела отливки усадочного происхождения, возникшего в интервале температур затвердевания.

13 – Изменение размеров – дефект в виде несоответствий размеров отливки НД.

18 – Несоответствие структуры – дефект отливки в виде местных скоплений химических элементов или соединений в теле отливки, возникших в результате избирательной кристаллизации при затвердевании.

Для исследований причин возникновения дефектов изготовления турбинных лопаток было выдвинуто предположение о влиянии вида кристаллизации на перечисленные дефекты. Выбранные отливки, изготовленные из сплава ЖС 32–ВИ в вакуумной, плавно–заливочной установке УВНК–8П методом высокоскоростной направленной кристаллизации и отливки, изготовленные из сплава ЖС 6К на установке типа УППФ–3М равноосной (неконтролируемой) кристаллизацией.

### Статистическое исследование

Для проверки сделанного предположения о влиянии вида кристаллизации использованы ежемесячные сводки брака в отливках лопаток по исследуемым видам дефектов (сор, выход стержня, горячая трещина, изменение размеров, несоответствие структуры) с направленной и равноосной кристаллизацией. Проценты брака литья лопаток изготовленные из слитков с направленной кристаллизацией образовали выборку А, с равноосной – выборку В.

Выдвигаются статистические гипотезы

$H_0$  – выборки А и В принадлежат одной генеральной совокупности, тогда влияние вида кристаллизации на исследуемые дефекты отсутствует.

$H_1$  – выборки А и В принадлежат разным генеральным совокупностям, тогда имеет место влияние вида кристаллизации на исследуемые дефекты.

Статистическую гипотезу о влиянии кристаллизации целесообразно проверять с помощью непараметрических критериев, так как использование обычно используемых параметрических критериев, таких как t-критерий Стьюдента, F-критерий Фишера, предполагают нормальное распределение для значений выборок, а проверить предположение нормальном распределении в условиях реального производства практически невозможно.

Проверка гипотез  $H_0$  и  $H_1$  предлагается провести по непараметрическому критерию Манна-Уитни (U-критерию) [3].

Для вычисления статистики U выборки А и В упорядочивают в порядке возрастания.

Полученный номер по порядку для выборочных значений в объединенной выборке называют ранговым числом.

Каждому рангу приписывают, к какой выборке (А или В) он относится.

Вычисляется:

$$U_A = n_A n_B + \frac{n_B(n_B + 1)}{2} - R_A, \quad (1)$$

$$U_B = n_A n_B + \frac{n_A(n_A + 1)}{2} - R_B,$$

где:  $n_A, n_B$  - объем выборок А и В;

$R_A, R_B$  - суммы рангов выборок А и В.

Статистика U определяется как наименьшее из значений  $U_A$  и  $U_B$ . Мерой значимости статистики U в выборках объемом больше 8 может служить величина Z, которая рассчитывается по формуле:

$$Z = \frac{U - n_A n_B / 2}{\sqrt{n_A n_B (n_B + n_A + 1) / 12}}. \quad (2)$$

Полученное значение Z сравнивается с p% - квантилем нормального распределения. Если  $Z \leq Z_p$ , то с доверительной вероятностью p делается заключение о однородности выборок.

Значение  $Z_p$  содержится в таблицах стандартного нормального распределения.

Для анализа выборок с помощью U-критерия использован модуль Nonparametric программного пакета «STATISTICA» [4].

По полученным результатам (рис. 1) можно сделать выводы о существенном (с доверительной вероятностью P не менее 0,95) различии выборок А и В.

Вид дефекта	Mann-Whitney U Test (Влияние кристаллизации)				
	Rank Sum A	Rank Sum B	U	Z	p-level
Сор	188	112	34	2,193	0,026241
Выход стержня	199	101	23	2,829	0,0046694
Горячая трещина	123	177	45	-1,558	0,1190338
Изменение размеров	111	189	33	-2,251	0,02434405
Несоответствие структуры	222	78	0	4,156	0,0000322

Рис. 1. Результаты проверки гипотезы о влиянии вида кристаллизации на исследуемые дефекты литья лопаток

Таким образом, с помощью непараметрического критерия Манна-Уитни определенно существенное влияние вида кристаллизации (направленная или равноосная), на основные виды дефектов, а именно на:

«1 - Сор» ( $P \geq 99,5\%$ ),

«4 - Горячая трещина» ( $P \geq 97,6\%$ ),

«13 - Изменение размеров» ( $P \geq 99,99\%$ ),

«18 - Несоответствие структуры» ( $P \geq 97,2\%$ ).

Заключение о влиянии на «2 - Выход стержня» можно сделать только с доверительной вероятностью 88,1%.

## Заключение

Рассмотрены особенности технологического процесса изготовления и оценки качества турбинных лопаток.

Определены возможные дефекты отливок турбинных лопаток, причины и меры по их устранению.

Сделан статистический анализ дефектов турбинных лопаток, забракованных по результатам исследований их качества за последние три года с помощью контроля внешнего вида и методами люминесцентного (по поверхностным дефектам) и рентгеновского контроля.

На основе предположения технологов о существенном влиянии на дефекты вида кристаллизации слитков, сформулированы статистические гипотезы для проверки влияния данного фактора на процент брака.

С помощью непараметрического критерия Манна-Уитни сделан вывод о существенном влиянии вида кристаллизации на 4 вида дефектов:

- «Сор»,
- «Горячая трещина»;
- «Изменение размеров»;
- «Несоответствие структуры».

## Литература

1. ГОСТ 19200-80. Отливки из чугуна и стали. Термины и определения дефектов [Текст]. – Взамен ГОСТ 19200-73; дата введения 1981-07-01. – М.: Издательство стандартов, 1980. – 12 с.
2. Производство точных отливок [Текст]: моногр. / И. Дошкарж, Я. Габриель, М. Гоушть, М. Павелка. – М.: Машиностроение, 1979. – 296 с.
3. Томашевський, А.В. Комп'ютерні технології статистичної обробки даних [Текст]: Навчальний посібник / А.В. Томашевський, В.П. Рісіков. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2006. – 174 с.
4. Боровиков, В. STATISTICA: искусство анализа данных на компьютере. Для профессионалов [Текст] / В. Боровиков. – СПб.: Питер, 2001. – 656 с.

Поступила в редакцию 30.05.2012

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., зав. кафедрой В.В. Погосов, Запорожский национальный технический университет, Запорожье.

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ЯКОСТІ ВИГОТОВЛЕННЯ ТУРБІННИХ ЛОПАТОК

*О.В. Томашевський, В.І. Фомічева*

Розглянуто особливості технології виготовлення турбінних лопаток високого тиску газотурбінних двигунів. Зроблено аналіз дефектів турбінних лопаток, забракованих за результатами контролю їхньої якості за останні три роки методами люмінесцентного (по поверхневим дефектах) і рентгеновського контролю. Виділено найпоширеніші дефекти. Висунуто припущення про істотний вплив на дефектність лопаток виду кристалізації злитків. Запропоновано непараметричний критерій Манна-Уїтні для перевірки висунутого припущення як статистичної гіпотези. Доведено істотний вплив виду кристалізації (спрямована або равноосна) на основні види дефектів.

**Ключові слова:** газотурбінний двигун, робоча лопатка, авіадвигун, спрямована кристалізація, равноосна кристалізація, критерій Манна-Уїтні.

## STATISTICAL ANALYSIS OF QUALITY OF MAKING OF TURBINE SHOULDER-BLADES

*A.V. Tomashevskiy, V.I. Fomicheva*

The features of technology of making of turbine shoulder-blades are considered high-pressure turbo-engines. The analysis of defects of turbine shoulder-blades defective on results control of their quality for the last three years the methods of luminescent(on superficial defects) and x-rayed control is done. The most widespread defects are distinguished. Supposition is pulled out about substantial influence on imperfectness of shoulder-blades of type of crystallization of bars. A non-parametric criterion is offered Mann-Whitney U Test for verification of the pulled out supposition as statistical hypothesis. Substantial influence of type of crystallization (directed or equiaxial) is well-proven, on basic kinds defects.

**Key words:** turbo-engine, working shoulder-blade, aero-engine, directed crystallization, equiaxial crystallization, Mann-Whitney U Test.

**Томашевський Александр Владимирович** – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри мікро і наноелектроніки Запорожського Національного технічного університету, Запорожжє, Україна, e-mail: tmsh@mail.ru.

**Фомічева Вікторія Івановна** – інженер 2-ої категорії по якості ГП «Івченко-Прогрес», Запорожжє, Україна, e-mail: vik\_tori\_a@ukr.net.