

Методики определения параметров расположения профилей лопаток ГТД по результатам их измерений

М.А. Болотов¹, В.А. Печенин¹, Н.В. Рузанов¹, И.А. Грачев¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

Аннотация. Параметры расположения действительного профиля лопаток газотурбинного двигателя относительно его номинального положения используются для оценки качества изготовления указанных деталей. Сложная форма аэродинамических поверхностей лопаток, а также погрешности их изготовления затрудняют однозначное определение смещения и разворота действительного профиля. Применение различных методик вычисления рассматриваемых параметров может привести к получению несовпадающих значений, вследствие чего возникает вопрос обоснованного выбора используемых методик. В данной работе представлены две методики определения геометрических параметров расположения аэродинамических профилей лопаток, учитывающих особенности их изготовления и требования существующего отраслевого стандарта. Также в работе проведена оценка эффективности применения предложенных методик при определении параметров обработки лопаток газотурбинного двигателя.

1. Введение

Погрешности изготовления лопаток газотурбинного двигателя приводят к тому, что геометрическая форма обработанных заготовок данных деталей отличается от её номинального значения, задаваемого конструктором. Сложная форма аэродинамических поверхностей лопаток ГТД и их отличие от номинального значения затрудняют оценку качества изготовления указанных деталей [1, 2]. Одними из параметров, используемых для оценки качества изготовления лопаток ГТД, являются параметры расположения действительного профиля относительно номинального профиля детали [3].

В настоящее время существуют различные методики определения параметров расположения профилей лопаток ГТД [4, 5]. Например, широко распространенное приложение PC-DMIS компании Hexagon Manufacturing Intelligence, осуществляющее управление процессом измерения и занимающееся обработкой полученных результатов, реализует три метода совмещения поверхностей [6]: метод наименьших квадратов, векторное совмещение, MinMax совмещение. В работе Печенина В.А. [7] рассматривается совмещение поверхностей, имеющих сложную форму. Автор предложил использовать для поиска пар точек информацию о кривизне профиля и направление нормали в исследуемых точках.

Базовый алгоритм ИСР и его вариации нашли широкое применение для технологического контроля геометрических параметров сложных изделий, в том числе для контроля лопаток газотурбинного двигателя. Алгоритм ИСР предъявляет высокие требования к вычислительным машинам, поэтому ряд исследователей занимаются его оптимизацией. Так для повышения скорости вычислений Bentley J.L. в работах [8, 9] предложил при совмещении результатов

измерения с их номинальными значениями группировать точки с учетом расположения в k -мерные деревья.

Необходимо отметить, что существующие методики определения параметров расположения профилей лопаток ГТД рассчитаны на работу с широким кругом деталей, поэтому они не учитывают характерные особенности поверхностей лопаток ГТД. Указанное обстоятельство усложняет процесс изготовления указанных деталей.

Использование различных методик вычисления целевых параметров может привести к получению несовпадающих значений параметров [10]. В связи с этим актуальной задачей становится разработка новых методик определения параметров расположения профилей лопаток ГТД и их обоснованное применение.

2. Методики определения параметров расположения профилей лопаток ГТД

Смещение и разворот действительного профиля определяются после его совмещения с номинальным профилем. Отраслевой стандарт задает правила совмещения профилей для оценки качества изготовления лопатки газотурбинного двигателя. В соответствии с заданными правилами совмещение должно производиться по входной кромке и средней линии профилей. С другой стороны подобная процедура совмещения не учитывает технологические особенности изготовления лопаток, т.к. погрешности изготовления на входной кромке будут приводить к корректировке всего пера и увеличению трудоемкости изготовления детали. В связи с этим для определения параметров обработки лопаток необходимо использовать другую процедуру совмещения. В работе представлены две методики определения параметров расположения профилей лопаток ГТД, отличающиеся используемой процедурой совмещения действительного и номинального профилей. Одна методика предназначена для определения параметров формообразующих операций, другая направлена на оценку качества изготовления лопаток газотурбинного двигателя.

Работа обеих методик основана на использовании средней линии профиля, которая может быть получена различными способами. Каждая кривая средней линии разбивается на сегменты небольшой длины для того, чтобы сформированные наборы точек средних линий действительного и номинального профилей содержали большое количество элементов. Большое количество точек позволяет минимизировать влияние локальных отклонений средней линии действительного профиля от её номинального значения.

2.1. Методика для определения параметров обработки

Практика изготовления лопаток ГТД показывает, что производительность и точность их изготовления зависят от равномерности удаляемого с заготовки припуска [11]. Для получения припусков, одинаковых со стороны спинки и корыта, совмещение профилей производится по точкам средней линии путем решения оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^N \left\| R \cdot \begin{pmatrix} x_d^i \\ y_d^i \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_n^i \\ y_n^i \end{pmatrix} + T \right\| \rightarrow \min \\ R = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \\ T = \begin{pmatrix} c \\ d \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (1)$$

где x_d, y_d – координаты средней линии действительного профиля; x_n, y_n – координаты средней линии номинального профиля; α – угол разворота действительного профиля заготовки лопатки; c, d – параметры смещения действительного профиля.

Решением указанной оптимизационной задачи являются интересующие параметры смещения и разворота действительного профиля.

2.2. Методика для оценки качества изготовления лопатки ГТД

В соответствии с отраслевым стандартом совмещение происходит по входной кромке и средней линии профилей [12]. Угол разворота действительного пера лопатки определяется путем решения оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^N \left\| R \cdot \begin{pmatrix} x_{д}^i - a_{д} \\ y_{д}^i - b_{д} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_{н}^i - a_{н} \\ y_{н}^i - b_{н} \end{pmatrix} \right\| \rightarrow \min \\ R = \begin{pmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ -\sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{pmatrix} \end{cases}, \quad (2)$$

где $\begin{pmatrix} a_{д} \\ b_{д} \end{pmatrix}$ и $\begin{pmatrix} a_{н} \\ b_{н} \end{pmatrix}$ – координаты точек пересечения средней линии с профилем входной кромки, номинальный и действительный профиль соответственно.

Вектор смещения действительного профиля находится по формуле:

$$T = \begin{pmatrix} a_{н} \\ b_{н} \end{pmatrix} - R \cdot \begin{pmatrix} a_{д} \\ b_{д} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

Вычисленные параметры смещения и разворота позволяют совместить действительный и номинальные профили лопатки для оценки отклонения формы изготовленной лопатки.

3. Апробация предложенных методик

3.1. Процедура апробации предложенных методик

Процедура совмещения действительного и номинального профилей оказывает прямое влияние на определение параметров доработки лопаток газотурбинного двигателя. Отклонение формы, вычисляемое после совмещения профилей, определяет объем и расположение удаляемого с заготовки материала. Получение равномерного припуска позволяет оптимизировать параметры формообразующих операций, что в свою очередь делает возможным повышение производительности и точности изготовления лопаток компрессора ГТД.

Для оценки целесообразности использования предложенных методик определения параметров расположения профилей лопаток ГТД было исследовано их влияние на распределение припуска. Функция определения величины припуска для точки профиля зависит от отклонения формы в данной точке:

$$a(p) = \begin{cases} \Delta F(p): 0 \leq \Delta F(p) \\ 0: \Delta F(p) < 0 \end{cases}, \quad (4)$$

где $\Delta F(p)$ – отклонение формы в точке профиля p .

В качестве функции неравномерности припуска рассматривалась функция:

$$\Delta a(l) = |a(p_c) - a(p_k)|, \quad (5)$$

где p_c и p_k – точки на спинке и корыте профиля, находящиеся на пересечении соответствующих участков с прямой, перпендикулярной к средней линии в точке p_l ; p_l – точка на средней линии профиля, расстояние по кривой до которой равно l .

Графическое пояснение к данной функции показано на рисунке 1.

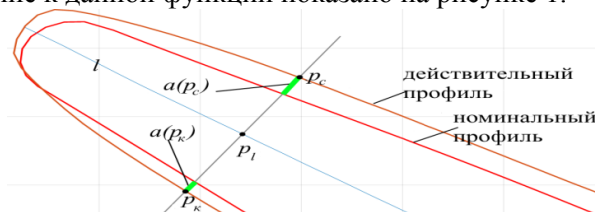


Рисунок 1. Графическое пояснение к функции неравномерности припуска.

Для оценки неравномерности припуска по всему профилю использовалась обобщенная неравномерность припуска:

$$D = \int_0^l \Delta a(t) dt. \quad (6)$$

В ходе исследования была рассчитана обобщенная неравномерность припуска для профилей, совмещенных в соответствии со следующими процедурами:

1) Совмещение по входной кромке и средней линии. Используется в разработанной методике для оценки качества изготовления лопатки компрессора ГТД (П1).

2) Совмещение по средней линии. Используется в разработанной методике для определения параметров корректировки размерной обработки профилей пера заготовок лопаток ГТД (П2).

3) Совмещение по алгоритму ICP. ICP (Iterative Closest Point – итеративный алгоритм ближайших точек) – стандартный алгоритм совмещения точек, применяемый в большей части метрологического программного обеспечения (ПЗ).

Для оценки целесообразности использования разработанной методики определения параметров корректировки размерной обработки профилей пера заготовок лопаток ГТД обобщенная неравномерность припуска, полученная при помощи процедур П1 и П2, сравнивалась с величиной, полученной при использовании процедуры ПЗ. В качестве исходных данных для совмещения использовались профили, описанные ниже.

3.2. Сгенерированные профили

Математическое моделирование позволяет сформировать набор деталей с известными размерными параметрами [13]. Номинальная форма профиля и накладываемое отклонение формы позволяют формировать действительную модель заготовки лопатки газотурбинного двигателя. Номинальная модель лопатки задается конструкторской документацией. Отклонение формы профиля пера заготовки лопатки может быть представлено в виде суммы трех составляющих [7]:

$$\delta_{\phi} = \delta_{\Gamma} + \delta_{\text{M}} + \delta_{\text{C}}, \quad (7)$$

Гармоническое отклонение формы может быть аппроксимировано с использованием композиции функций синуса и косинуса по следующей формуле:

$$\delta_{\Gamma} = A_{\Gamma} \cdot \sin(w_x \cdot x + w_y \cdot y + \varphi_{\sin}) + B_{\Gamma} \cdot \cos(w_x \cdot x + w_y \cdot y + \varphi_{\cos}), \quad (8)$$

где A_{Γ} и B_{Γ} – амплитуды составляющих; w_x задано как $\omega_x \cdot 2\pi/L_x$, w_y задано как $\omega_y \cdot 2\pi/L_y$, здесь ω_x, ω_y – частоты гармонических компонент вдоль осей x и y соответственно; L_x и L_y – опорные длины вдоль осей x и y соответственно; φ_{\sin} и φ_{\cos} – фазы угла синуса и косинуса.

Компонента отклонения формы δ_{M} возникает в результате контакта детали и обрабатывающего инструмента. Распределение этой погрешности можно вычислить, опираясь на значения средней кривизны профиля:

$$\delta_{\text{M}} = A_{\text{M}} \cdot (i_s - 0,5), \quad (9)$$

где A_{M} – максимальная погрешность обработки; i_s – индекс, рассчитываемый по формуле (10).

$$i_s = (H - H_{\min}) / (H_{\max} - H_{\min}), \quad (10)$$

где H, H_{\min}, H_{\max} – значение средней кривизны в точке поверхности и минимальное и максимальное значения средней кривизны по всей поверхности соответственно.

Случайные погрешности имеют различные источники, суммарное действие которых мало по своему влиянию, рассеяние случайных погрешностей обычно подчиняется нормальному закону Гаусса.

Для исследования неопределенности измерения размерных параметров было получено три сечения номинальной CAD-модели лопатки компрессора и определено аналитическое представление полученных профилей NURBS-сплайнами.

Параметры отклонения формы действительного профиля от его номинального значения были определены на основании статистических данных.

Максимальное значение амплитуд A_{Γ} и B_{Γ} составило 0,02 мм. Фазы и частоты гармонической составляющей изменялись по равновероятностному закону. Значение фазы лежало в интервале $0^\circ \dots 360^\circ$, частоты принимали значения 1, 2, 3 и 4. Компоненты смещения профиля изменялись по нормальному закону в диапазоне: смещение вдоль оси $OX \pm 0,02$ мм; смещение вдоль оси $OY \pm 0,2$ мм; смещение вдоль оси $OZ \pm 0,15$ мм. Углы разворота поверхностей изменялись по нормальному закону в пределах: вокруг оси $OX \pm 9'$; вокруг оси $OY \pm 3'$; вокруг оси $OZ \pm 6'$. Значение случайной составляющей отклонения δ_{C} рассчитывалось случайным образом с максимальным значением 0,002 мм.

Было выполнено моделирование 100 профилей пера заготовки лопатки для каждого рассматриваемого сечения. Созданные профили использовались для оценки эффективности использования предложенных в работе методик.

3.3. Измеренные профили

Наряду с созданными профилями использовались профили, полученные по результатам измерения набора заготовок рабочих лопаток компрессора ГТД. Каждая заготовка была измерена на координатно-измерительной машине DEA Global Advantage 09.12.08 с использованием поворотной головки TESA и сканирующего датчика SP25M компании Renishaw (рисунок 2). Параметры проведения измерений представлены в таблице 1.

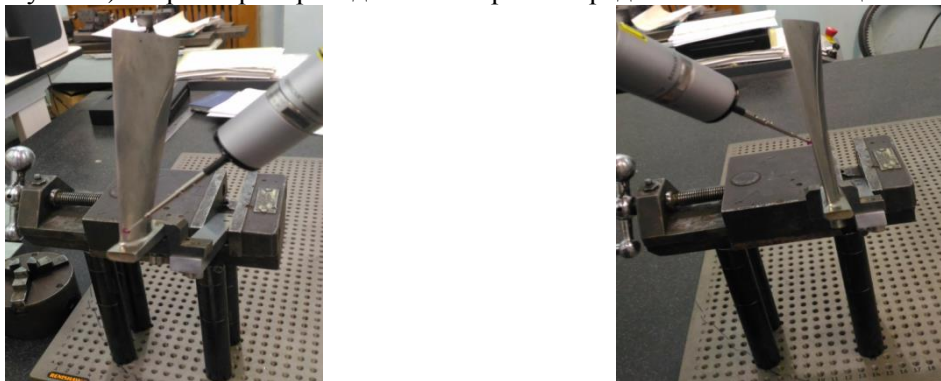


Рисунок 2. Измерение пера заготовки лопатки.

Таблица 1. Параметры проведения экспериментальных исследований.

Параметр	Значение
Длина измерительного щупа	60 мм
Диаметр измерительного наконечника	2 мм
Температура окружающей среды	20 C ⁰
Относительная влажность	82 %
Погрешность КИМ	1,7+L/333 мкм
Погрешность измерительного наконечника	1,7 мкм

Перед началом измерения каждой заготовки по поверхностям хвостовика трапецевидной формы была определена система координат лопатки. Каждая заготовка была измерена в 4 сечениях. Результаты измерения экспортировались в текстовые файлы для их последующей обработки в системе MATLAB.

3.4. Результаты апробации

Результаты сравнения неравномерности припуска, вычисленного после совмещения по входной кромке и средней линии (П1) показаны на рисунке 3.

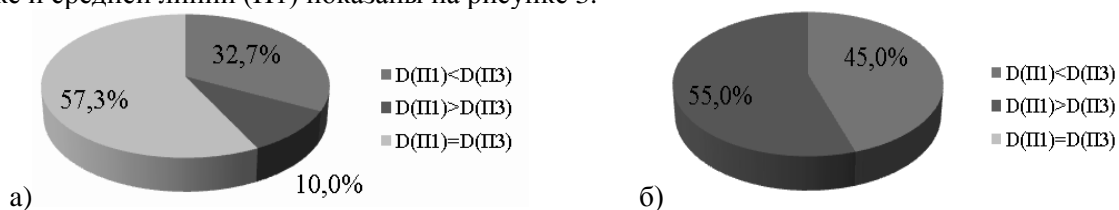


Рисунок 3. Сравнение неравномерности припуска при совмещении П1: а) сгенерированные профили; б) измеренные профили.

Результаты сравнения неравномерности припуска, вычисленного после совмещения по средней линии (П2) показаны на рисунке 4.

Статистический анализ результатов моделирования позволяет сделать обоснованный вывод о характере изучаемых процессов [14, 15]. Полученные результаты показывают, что смещение и разворот действительного профиля зависят от процедуры его совмещения с номинальным

профилем. Данные параметры напрямую влияют на вычисленное отклонение формы действительного профиля, которое является ключевым параметром, определяющим последующую обработку заготовки лопатки газотурбинного двигателя.

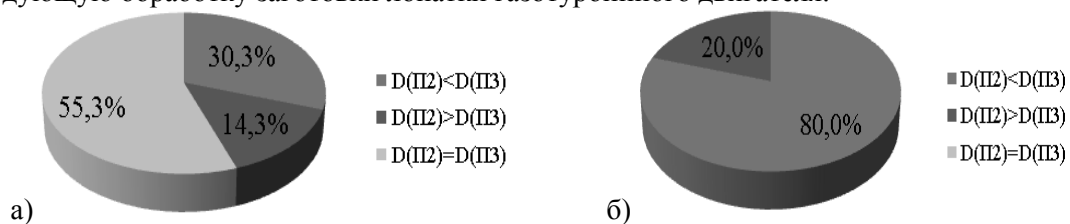


Рисунок 4. Сравнение неравномерности припуска при совмещении П2: а) сгенерированные профили; б) измеренные профили.

4. Выводы

Сложная форма аэродинамических поверхностей лопаток газотурбинного двигателя и погрешности их изготовления затрудняют однозначное определение параметров расположения действительного профиля лопатки относительно его номинального положения. В работе представлены две методики для нахождения указанных параметров: первая предназначена для определения параметров обработки детали, вторая служит для оценки качества изготовления лопаток ГТД.

Результаты проведенных исследований показали, что неравномерность припуска, определяемого после совмещения действительного и номинального профилей заготовки лопатки компрессора ГТД, существенно зависит от погрешности её обработки. После совмещения профилей в соответствии с отраслевыми стандартами припуск может быть как более, так и менее равномерным по сравнению с совмещением по широко распространенному алгоритму ИСР. Использование процедуры совмещения по средней линии позволяет получить более равномерный припуск в 16-60% случаях, что положительно скажется на производительности и точности обработки заготовок лопаток газотурбинного двигателя.

5. Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках стипендии Президента Российской Федерации (номер СП-262.2019.5).

6. Литература

- [1] Rezhnikov, A.F. Mathematical models for estimating the degree of influence of major factors on performance and accuracy of coordinate measuring machines / A.F. Rezhnikov, A.V. Kochetkov, O.V. Zakharov // MATEC Web of Conferences. – 2017. – Vol. 129. – P. 01054.
- [2] Shi, Z.Y. A High-Precision Form-Free Metrological Method of Aeroengine Blades / Z.Y. Shi, X.Z. Li, Y.K. Li, J.C. Lin // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2019. – Vol. 20(12). – P. 2061-2076.
- [3] Gao, L. A Robust Blade Design Method based on Non-Intrusive Polynomial Chaos Considering Profile Error / L. Gao, C. Ma, Y. Cai // Journal of Thermal Science. – 2019. – Vol. 28(5). – P. 875-885.
- [4] El-Hayek, N. A new method for aspherical surface fitting with large-volume datasets / N. El-Hayek, H. Nour, N. Anwer, O. Ghabri, M. Damak // Precision Engineering. – 2014. – Vol. 38(4). – P. 935-947.
- [5] Craig, M.S. Least-Squares Fitting Algorithms of the NIST Algorithm Testing System / M.S. Craig // Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology. – 1998. – Vol. 103(6). – P. 633-641.
- [6] Справочное руководство PC DMIS v. 4.2, 1529 с.
- [7] Печенин, В.А. Повышение точности и производительности измерений при изготовлении лопаток компрессора ГТД на основе разработки методик, обеспечивающих увеличение

- информативности и оптимизацию метрологического процесса: дис. ...канд. техн. наук: 05.07.05 / В.А. Печенин – Самара, 2017. – 191 с.
- [8] Bentley, J.L. Multidimensional binary search trees used for associative searching / J.L. Bentley // *Communications of the ACM*. – 1975. – Vol. 18(9). – P. 509-517.
- [9] Friedman, J.H. An algorithm for finding best matches in logarithmic expected time / J.H. Friedman, J.L. Bentley, R.A. Finkel // *ACM Transactions on Mathematical Software*. – 1977. – Vol. 3(3). – P. 209-226.
- [10] Zakharov, O.V. Minimization of the systematic error in centerless measurement of the roundness of parts / O.V. Zakharov, A.V. Kochetkov // *Measurement Techniques*. – 2016. – Vol. 58. – P. 1317-1321.
- [11] Volkov, D.I. Control of the Deep Grinding of Gas-Turbine Components / D.I. Volkov, N.V. Poluglazkova // *Russian Engineering Research*. – 2019. – Vol. 39(7). – P. 605-608.
- [12] ГОСТ 1 02571-86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера – М.: Издательство стандартов, 1986. – 36 с.
- [13] Kazanskiy, N.L. Injectional multilens molding parameters optimization / N.L. Kazanskiy, I.S. Stepanenko, A.I. Khaimovich, S.V. Kravchenko, E.V. Byzov, M.A. Moiseev // *Computer Optics* – 2016. – Vol. 40(2). – P. 203-214.
- [14] Orlov, E.P. Analytical representation of the statistical properties of random processes with arbitrary spectra / E.P. Orlov, I.M. Sizova // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(4). – P. 560-571.
- [15] Zakharov, O.V. Analysis of Methods for Estimation of Machine Workpiece Roundness / O.V. Zakharov, I.N. Bobrovskij, A.V. Kochetkov // *Procedia Engineering*. – 2016. – Vol. 150. – P. 963-968.

Methods for determining the parameters of the location of the profiles of GTE blades according to the results of their measurements

M.A. Bolotov¹, V.A. Pechenin¹, N.V. Ruzanov¹, I.A. Grachev¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

Abstract. The location parameters of the actual profile of the blades of a gas turbine engine relative to its nominal position are used to assess the quality of manufacturing of these parts. The complex shape of the aerodynamic surfaces of the blades, as well as the errors in their manufacture, make it difficult to unambiguously determine the displacement and rotation of the actual profile. The use of various methods for calculating the considered parameters can lead to mismatching values, which raises the question of a reasonable choice of the methods used. This paper presents two methods for determining the geometric parameters of the location of the aerodynamic profiles of the blades, taking into account the features of their manufacture and the requirements of the existing industry standard. Also, the work evaluated the effectiveness of the proposed methods in determining the processing parameters of the blades of a gas turbine engine.