

УДК 621.433, 53.088

## Базирование лопатки компрессора ГТД при контроле геометрических параметров профиля пера

Новикова Анна Алексеевна

ananovikova34479@gmail.com

Тумакова Екатерина Владимировна

tumakova\_ekaterina@bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

**Аннотация.** Контроль геометрических параметров пера лопатки газотурбинного двигателя является ответственной задачей, так как данные детали определяют КПД основных узлов двигателя (вентилятора, компрессора и турбины). В процессе измерения лопаток появляется множество вопросов, которые требуют детальной проработки: выбор средства измерения, числа точек при контроле, количества сечений и метода базирования. Так как на точность результатов измерений существенно будет влиять закрепление детали в процессе контроля, данная работа посвящена рассмотрению возможных схем базирования с учетом их достоинств и недостатков, оценке, вносимой ими погрешности, а также разработке собственной оснастки.

**Ключевые слова:** лопатка, базирование, газотурбинный двигатель, погрешность базирования, геометрические параметры профиля пера

## Basing of the compressor blade of a gas turbine engine when controlling the geometric parameters of the pen profile

Novikova Anna Alekseevna

ananovikova34479@gmail.com

Tumakova Ekaterina Vladimirovna

tumakova\_ekaterina@bmstu.ru

BMSTU, Moscow, Russia

**Abstract.** Controlling the geometric parameters of the blade tip of a gas turbine engine is a crucial task, since these details determine the efficiency of the main engine components (fan, compressor and turbine). In the process of measuring blades, there are many issues that require detailed study: the choice of measuring instrument, the number of control points, the number of cross-sections and the basing method. Since the accuracy of the measurement results will be significantly affected by the fastening of the part during the inspection process, this work is devoted to the consideration of possible basing schemes, taking into account their advantages and disadvantages, assessing the error they introduce, as well as developing their own tooling.

**Keywords:** blade, basing, gas turbine engine, basing error, geometric parameters of the pen profile

**Введение.** Актуальной задачей при производстве ГТД является высокая точность контроля изготавливаемых лопаток. Важность вопроса высокоточного контроля лопаток определяется степенью их ответственности и большим количеством в одном двигателе [1]. Данный процесс считается сложным ввиду

нетривиальной формы хвостовиков лопаток и сложнопрофильной геометрии пера. Поэтому необходима глубокая проработка вопросов связанных с контролем параметров данных деталей с целью выявления наилучших решений.

**Материалы и методы.** Перед началом работы была изучена нормативная документация, содержащая требования к геометрическим параметрам лопаток. В результате был найден документ, ОСТ 1 02571–86 «Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера» [2]. В соответствии с данными ОСТа был разработан чертеж [3], представленный на рис. 1,

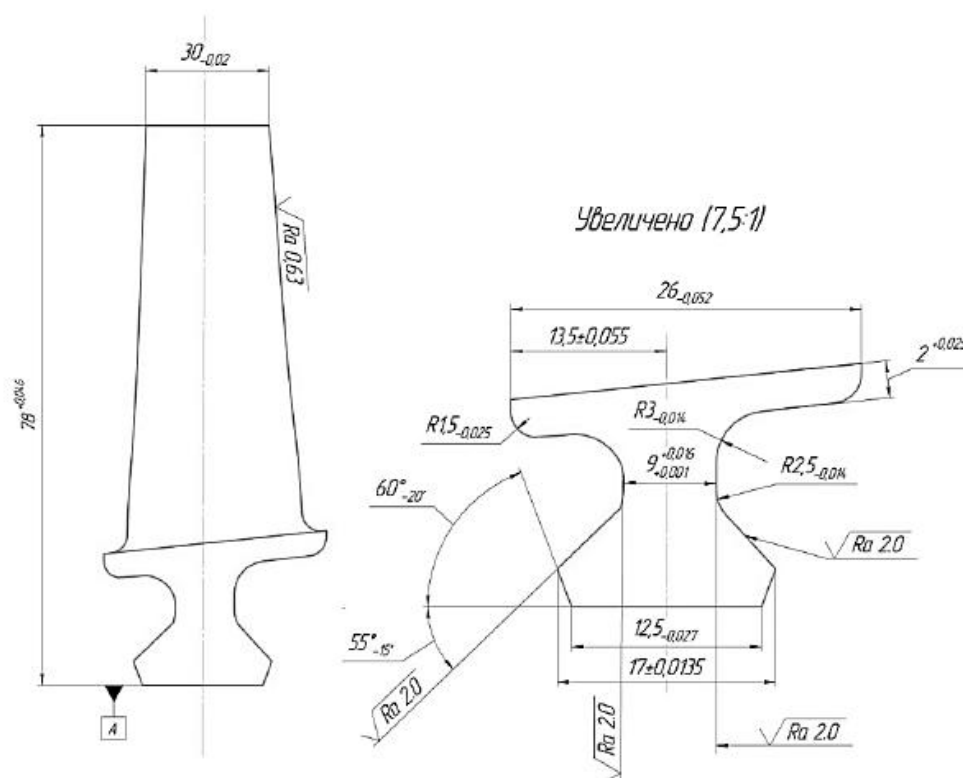


Рис. 1. Чертеж лопатки

Наиболее высокие требования предъявлены к толщине пера — допуск составляет 40 мкм. Согласно этим значениям по формуле (1) была рассчитана допускаемая погрешность измерений  $\Delta_{\text{и}}^{\text{доп}}$ :

$$\Delta_{\text{и}}^{\text{доп}} = A_{\text{мет}} \cdot T = 0,25 \cdot 40 = 10 \text{ мкм}, \quad (1)$$

где  $T$  — допуск на размер, мкм;  $A_{\text{мет}}$  — коэффициент, зависящий от качества.

Зная  $\Delta_{\text{и}}^{\text{доп}}$ , была вычислена допускаемая погрешность средства измерения  $\Delta_{\text{си}}^{\text{доп}}$  по формуле (2):

$$\Delta_{\text{си}}^{\text{доп}} = 0,7 \cdot \Delta_{\text{и}}^{\text{доп}} = 0,7 \cdot 10 = 7 \text{ мкм}. \quad (2)$$

**Результаты.** На основе данных о допускаемой погрешности средства измерения были выбраны контактные средства измерений, так как бесконтактные не обладают достаточной точностью для измерения лопаток малых габаритов [4, 5].

При измерении лопаток контактными средствами измерений (СИ) применимы три схемы базирования: базирование прижимами, в тисках и в оснастке, повторяющей геометрию хвостовика лопатки.

Базирование прижимами применяется при измерении на координатно-измерительных машинах (КИМ). Данная схема универсальна, так как под каждую лопатку можно собрать свою конструкцию из комплектующих набора оснастки. Недостатком является сравнительно высокая цена данного набора и возможность применения только на КИМ, так как для использования оснастки необходим столик, на котором она фиксируется.

При проведении экспериментальных измерений лопатку зафиксировали прижимами, как представлено на рис. 2. Измерения проводились на КИМ, точки выбирались в соответствии с требованиями, изложенными в ОСТ 1 02571–86. По полученным точкам построен измеренный профиль.



Рис. 2. Лопатка, закрепленная прижимами

Базирование в тисках — простой и быстрый способ базирования лопаток. Он универсален для измерений различными СИ: тиски можно установить на любую поверхность и обеспечить доступ СИ к измеряемой детали. Недостатком данного метода являются перекосы от закрепления, как показано на рис. 3.

Погрешность перекоса будет определяться допуском на параллельность самих тисков [6]. Различные тиски имеют допуски от 0,002 мм до 0,005 мм. С помощью геометрических построений проведем расчет погрешности по формуле (3):

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{T}{L} \quad (3)$$

где  $T$  — допуск на параллельность поверхности тисков;  $L$  — высота рабочей поверхности тисков.

Вычислим угол перекоса:

$$\alpha = \operatorname{arctg}(\operatorname{tg} \alpha), \quad (4)$$

Следовательно, максимальная перекоса детали при базировании в тисках будет определяться по формуле (5):

$$\Delta = L_{\text{дет}} \cdot \operatorname{tg}(\alpha), \quad (5)$$

Данный расчет справедлив для тисков с разным уровнем точности и деталей разной длины. Однако, помимо погрешности тисков существует и погрешность хвостовика лопатки, поведение которой теоретически посчитать не представляется возможным.

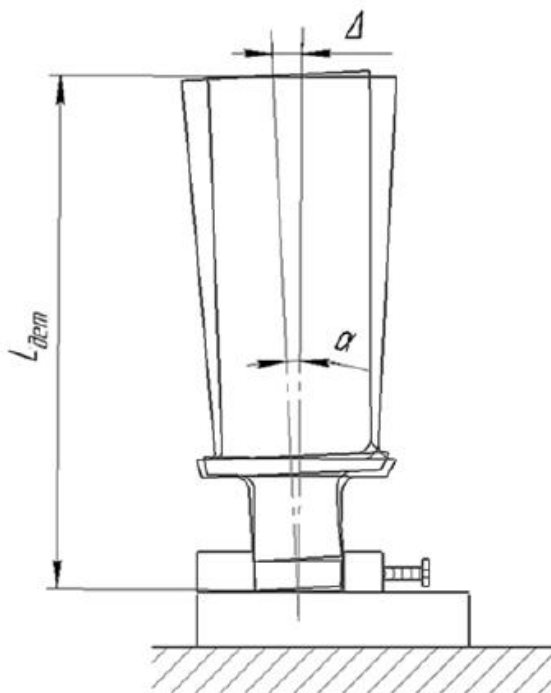


Рис. 3. Схема перекоса детали в тисках

Базирование в оснастке, повторяющей геометрию хвостовика самый трудоемкий метод: лопаткам разных габаритов нужна соответствующая оснастка, а ее изготовление неотлаженный процесс. Но достоинством данной оснастки является возможность назначать дополнительные параметры, которые расширяют функционал.

**Обсуждения полученных результатов.** Были разработаны 3D модели оснастки и заглушки, представленные на рис. 4, и чертеж оснастки, представленный на рис. 5. Оснастка была усовершенствована путем добавления стенки с выемкой и заглушки, которые позволят исключить качание лопатки в оснастке по оси Z. Заданы допуски на линейные размеры, отклонения формы и расположения.

**Заключение.** Погрешность схемы закрепления детали в прижимной оснастке показало максимальное отклонение равное 0,21 мм. Погрешность от перекоса детали в тисках составляет 12 мкм. Также была разработана оснастка с расширенным функционалом.

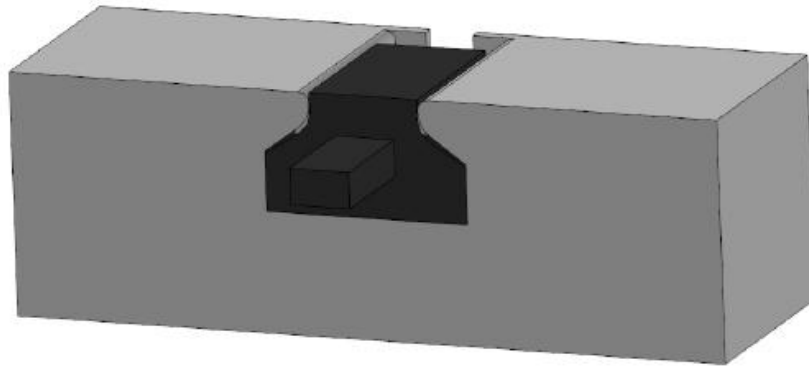


Рис. 4. Сборка оснастки с заглушкой

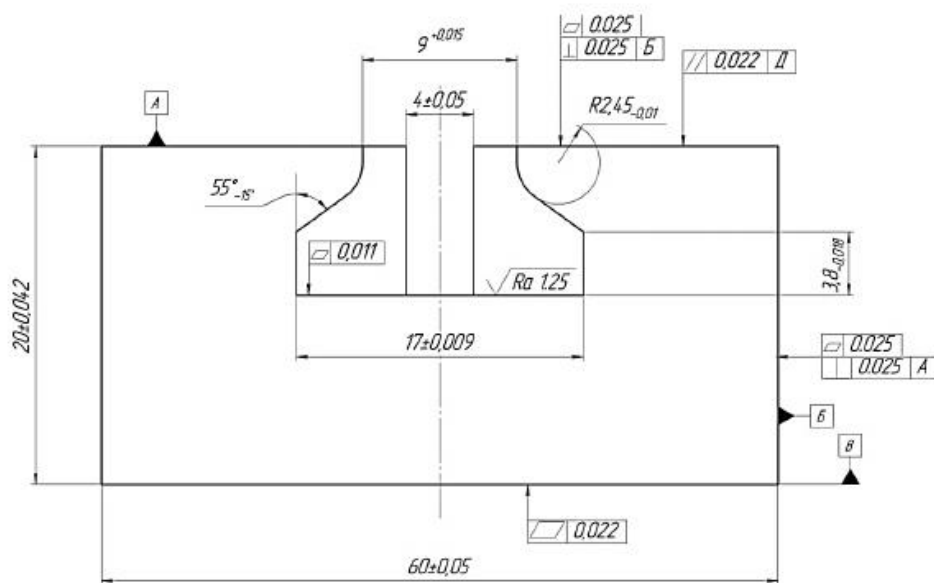


Рис. 5. Чертеж оснастки

По прогнозам, базирование в оснастке будет обладать высокой точностью, так как полностью повторяет геометрию хвостовика, и его преимуществом также будет являться упрощенная работа с заданием системы координат при проведении измерений, достигаемой за счет повышения точности наружных поверхностей оснастки.

*Отдельные результаты работы поддержаны в рамках выполнения государственного задания номер FSFN-2025-0009.*

#### Список источников

- [1] Болотов М.А., Печенин В.А., Рузанов Н.В., Грачев И.А. Методики определения параметров расположения профилей лопаток ГТД по результатам их измерений. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П. Королева (национального исследовательского университета)*, 2016, т. 15, № 4, с. 39–52.
- [2] ОСТ 1 02571–86. Лопатки компрессоров и турбин. Предельные отклонения размеров, формы и расположения пера. 1987.

- 
- [3] ОСТ 1 02630–87. Построение, содержание и оформление рабочих чертежей лопаток ротора осевых компрессоров. 1987.
  - [4] Крушняк Н.Т., Иванина И.В. Оценка геометрической точности прецизионных деталей сложной формы. *Приборы*, 2019, № 4 (226), с. 46–51.
  - [5] Агеева В.Н., Крушняк Н.Т., Скрипка В.Л. *Точностной анализ методик выполнения измерений*. Москва, Издательский центр РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, 2021, 93 с.
  - [6] Зубкова О.С. *Методика расчета погрешности установки детали в приспособлении: методические указания по выполнению практической работы*. Курск, Юго-Зап. гос. ун-т, 2018, 20 с.