

УДК 621.92  
DOI: 10.12737/17321

**В.Ф. Макаров**, д.т.н.,  
**Р.А. Туранский**, магистрант,  
**А.В. Григорьева**, магистрант  
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет)  
E-mail: makarovv@pstu.ru

## **Технологическое обеспечение точности изготовления сопловых лопаток турбин при глубинном многоосевом шлифовании на станке с ЧПУ\***

*Приведены результаты разработки и применения специального программного обеспечения для учета отклонения литейных поверхностей профиля пера лопаток и расчета площади проходного сечения путем введения файла коррекции в стойку ЧПУ многоосевого шлифовального станка.*

**Ключевые слова:** проходное сечение; лопатка турбины; глубинное шлифование; профильные поверхности; шлифовальный круг.

**V.F. Makarov**, d.en.s.,  
**R.A. Turanskiy**, undergraduate,  
**A.V. Grigor'eva**, undergraduate  
(Perm National Research Polytechnic University, Perm)

## **Technological support of production accuracy of nozzle blades of turbines at deep multi-axial grinding on NC machine\***

*At assembly of a nozzle diaphragm the accuracy of flow area depends on manufacturing accuracy of foundry surfaces of blades profile and accuracy of reference mounting surfaces of each individual nozzle blade. The existing grinding technology of reference surfaces of blades did not consider an error of blades casting, which required longtime adjustment of blades for maintenance of flow area. To solve this problem, the software for data preparation for blades grinding, which includes special software for the automated calculation of displacement values and rotation angles of nozzle and operating blades, is developed.*

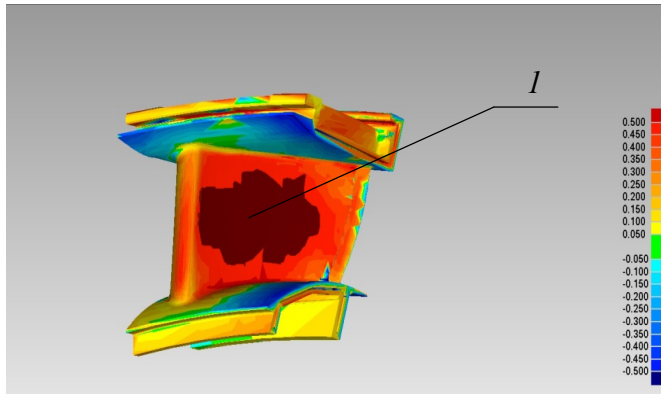
**Keywords:** flow area; turbine blade; deep grinding; profile surfaces; grinding wheel.

**Особенности обработки сопловых лопаток.** Известно, что при изготовлении сопловых и рабочих лопаток турбин используется литье методом направленной кристаллизации. В связи с недостаточной точностью данного метода

в настоящее время на производстве существует проблема компенсации погрешности литья при дальнейшей механической обработке изделий [1]. Для того чтобы произвести механическую обработку, в первую очередь необходимо правильно установить заготовку, т. е. придать ей правильное положение относительно выбранной системы. Для сопловых или рабочих лопаток такое положение определяется по шести базовым литейным точкам. Однако на практике, при таком варианте базирования сопловых

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (договор № 02.G25.310016 от 12.02.13) в рамках реализации Постановления Правительства РФ № 218 «О мерах государственной поддержки развития российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

или рабочих лопаток, а именно на их проточных частях возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с погрешностью литья отливок (рис. 1) [3, 4].



**Рис.1. Погрешность литья (*I*) на проточной части сопловой лопатки**

Одной из важных точностных характеристик сопловых лопаток является обеспечение точности проходного сечения.

Площадь проходного сечения является одним из ключевых параметров, характеризующих КПД газогенератора и газотурбинного двигателя. Он представляет собой площадь сечения межлопаточного канала соплового аппарата, направляющего поток раскаленного газа на лопатки ротора турбины для создания крутящего момента на валу ГТД [5, 6]. Разработчиками двигателя закладывается величина площади проходного сечения соплового аппарата, при которой достигаются оптимальные КПД и тяга двигателя.

При сборке соплового аппарата точность проходного сечения зависит от качества изготовления литейных поверхностей профиля лопаток и базовых установочных поверхностей каждой сопловой лопатки [8]. Профиль лопатки после литья не обрабатывается (только полируется), поэтому на него невозможно ввести коррекцию с помощью механической обработки напрямую. Однако возможно косвенное воздействие путем шлифования установочных поверхностей отливки. Введя коррекцию при шлифовании данных поверхностей, можно развернуть профиль пера лопатки до номинального положения [9, 10].

Для получения величин коррекции разработано специальное программное обеспечение (СПО). Возможности СПО включают в себя: — автоматизированный расчет значений смещения и углов поворота сопловых и рабочих лопаток. Данные величины используются для компенсации погрешности литья лопаток;

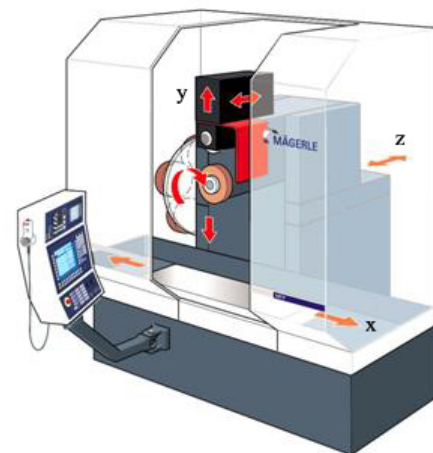
— автоматизированное построение, анализ и редактирование проходного сечения лопаток.

Для решения приведенных задач спроектирован и изготовлен специальный профилишлифовальный пятиосевой станок с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D мод. MFP-050.65.65 фирмы MagerleAG (Швейцария), который имеет горизонтальное расположение шпинделя и поворотный стол (рис. 2).

Станок предназначен для комплексной обработки шлифованием сложных деталей с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат. Современная конструкция станка (рис. 3) и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки в условиях единичного, мелко- и среднесерийного производства [7].



**Рис. 2. Станок мод. MFP-050.65.65 для профильного глубинного шлифования лопаток турбины**



**Рис.3. Схема осей станка мод. MFP-050.65.65**

**Исходные данные для работы СПО.** Исходными данными для ПО являются:

— оцифрованные модели (ОМ) отливок сопловых лопаток в формате STL (фасетные тела). Оцифровка отливок производится с помощью бесконтактной оптической системы типа ATOS;

— геометрическая модель (ГМ) лопатки, созданная в CAD/CAM системе NX;

— данные о числе лопаток в колесе, а также номинальная площадь проходного сечения;

— значение припуска на обрабатываемые поверхности лопатки;

— максимальный угол поворота отливки при подгонке проходного сечения.

**Порядок работы СПО для компенсации погрешностей литья лопатки.** При сравнительном анализе оцифрованной и геометрической моделей придерживаются следующей последовательности действий.

1. Определяется шесть контрольных точек на оцифрованной модели отливки путем совмещения фасетного тела оцифрованной модели отливки с геометрической моделью лопатки (рис. 4, см. обложку).

2. По шести контрольным точкам ОМ совмещается с ГМ лопатки (рис. 5, см. обложку). При этом ОМ и связанная с ней система координат изменяет свое положение. Данное положение сохраняется для последующих расчетов. На рис. 5 видны участки с отклонениями (более темные), требующие дополнительного разворота моделей.

3. Далее проводится совмещение по наилучшему совпадению геометрии проточных частей ОМ и ГМ отливки (рис. 6, см. обложку). После данного совпадения также сохраняется положение ОМ и связанной с ней СК (рис. 7, см. обложку).

4. В результате совмещений в расчете присутствуют две системы координат: СК после совмещения по контрольным точкам и СК после совмещения по проточной части.

5. При загрузке двух и более отливок СПО дает возможность задания дополнительной коррекции на площадь проходного сечения. На основе совмещенных по проточной части моделей производится построение сборки сектора из нескольких лопаток или соплового аппарата в целом (рис. 8, см. обложку).

6. Между парами соседних лопаток строится поверхность для определения площади проходного сечения, проходящая через выходную кромку пера лопатки и перпендикуляр от ребра выходной кромки на перо соседней лопатки (рис. 9, см. обложку).

7. С учетом значения площади вычисляется угол, на который необходимо повернуть ОМ отливки относительно собственной оси так,

чтобы площадь проходного сечения находилась в заданном допуске. Максимальный угол поворота задается пользователем, например, не более  $1^\circ$  (рис. 10).

Если расчетный угол больше максимального, то он ограничивается задаваемым углом.

8. Рассмотренные данные о повороте преобразуются в матрицу трансформации и добавляются к матрице, полученной при компенсации погрешности литья.

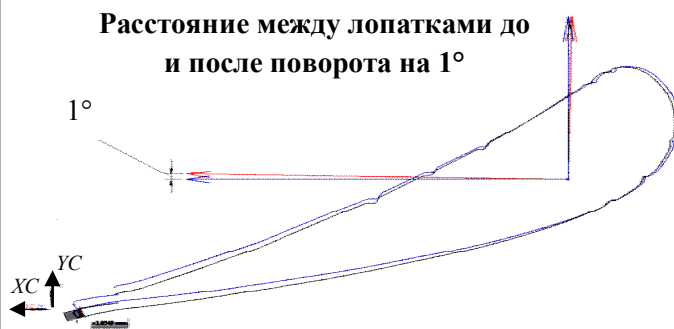
9. В СПО заложена возможность анализа наличия или отсутствия припуска на механическую обработку. Технолог может задать необходимое значение припуска на обрабатываемые поверхности, и СПО учтет эти данные в процессе совмещения.

Если на поверхности не хватило припуска на обработку, СПО покажет данные места и ограничит совмещение таким образом, чтобы не выходить за пределы припуска ОМ.

10. По разнице между положениями ОМ отливки после совмещения по контрольным точкам и проточной части находится матрица трансформации.

11. Далее, из матрицы извлекаются значения смещений (3 угловые координаты и 3 линейные координаты), которые загружаются в стойку станка в виде специального файла и учитываются при обработке лопаток на первом установе.

12. Полученные для каждой отливки значения сохраняются и при обработке отливки на шлифовальном станке используются для смещения системы координат паллеты.



**Рис. 10. Схема разворота ОМ**

СПО автоматизирует процесс получения значений компенсации смещения и углов поворота, который включает в себя пакетную обработку комплекта лопаток. Выходными данными после работы данного СПО являются:

— фасетные тела отливок в файле детали NX, полученные после совмещения отливок по проточной части с номинальной ГМ лопатки.

— текстовый файл со значениями смещений и

углов поворотов для применения на станке.

Далее проводится расчет фактической площади проходного сечения и необходимой дополнительной коррекции установки лопатки перед операцией шлифования базовых поверхностей лопаток.

Расчет площади проходного сечения проводится также с помощью разработанного СПО.

**Испытание СПО на станке.** В процессе внедрения проверялись алгоритмы СПО, включающие следующие пункты:

— проверка работоспособности алгоритмов совмещения геометрических моделей по трем вариантам: по базовым точкам, по выбранным поверхностям и по телу в целом;

— проверка проходного сечения, получаемого при совмещении по проточной части лопатки.

В результате испытаний и внедрения СПО на станке установлено, что качество и точность проходного сечения значительно повысились. Как следствие, увеличился КПД газотурбинного двигателя.

### Выводы

1. Применение технологии глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток турбин на пятиосевом обрабатывающем центре фирмы Magerle мод. MFP-050.65.65 позволяет производить обработку с минимальным количеством установок, лучшим качеством и с большей производительностью.

2. Благодаря использованию специального программного обеспечения стало возможным определение значений смещений и углов поворота, обеспечивающих компенсацию погрешностей литья и учет проходного сечения в лопатках.

3. Результатом совместного использования нового оборудования и разработанного СПО стало снижение разброса значений площади проходного сечения в сопловом аппарате. Как следствие, повысился КПД двигателя и снизилась вероятность появления нежелательных вибраций.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Козлов Д.А.** ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [электронный ресурс]. URL: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>. Дата обращения: 15.09.2015.

2. **Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л.** Газотурбинные двигатели. Пермь: 2006. 1195 с.

3. **Конструкция** основных узлов двигателя ПС-90А: учеб.пособие; 2-е изд. испр. и доп. / М.А. Нихамкин,

М.М. Зальцман. Пермь: Перм. гос. техн. ун-т, 2002. 108 с.

4. **Макаров В.Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: учеб.пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2013. 320 с.

5. **Макаров В.Ф.** Выбор высокоэффективных абразивных инструментов и режимов резания для различных видов шлифовальных заготовок: учеб.пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2011. 276 с.

6. **Поletaев В.А., Волков Д.И.** Глубинное шлифование лопаток турбин: библиотека технолога. М.: Машиностроение, 2009. 272 с.

7. **Рекламные материалы** фирмы «Mägerle».

8. **ГП «Ивченко-Прогресс».** Обработка лопаток на профилешлифовальном станке фирмы Mägerle // Промышленность в фокусе. 2013. № 1.

9. **Научноёмкая технология** глубинного шлифования профильных поверхностей лопаток турбин / В.Ф. Макаров, А.Х. Сакаев // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2012. № 3(9). С. 15-22.

10. **Макаров В.Ф., Никитин С.П.** Влияние условий формообразования на качество поверхностного слоя лопатки при глубинном профильном шлифовании // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2015. № 8(50). С. 38-44

### REFERENCES

1. Kozlov D.A. PD-14 is produced by all Russian aircraft engine [Electronic resource]. URL: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>.

2. Inozemtsev A.A., Sandratskiy V.L. Gas turbine engines. Perm, 2006. 1195 p.

3. The design of the basic units of the PS-90A. M.A. Nihamkin, M.M. Zaltsman. Perm: Perm State Technical University, 2002. 108 p.

4. Makarov V.F. Modern methods of highly abrasion resistant steels and alloys. St. Petersburg: Publishing house «Lan», 2013. 320 p.

5. Makarov V.F. Selection of highly abrasive tools and cutting conditions for different types of grinding workpieces. StarOskol: TNT, 2011. 276 p.

6. Poletaev V.A., Volkov D.I. Deep grinding of turbine blades. Moscow: Mashinostroenie, 2009. 272 p.

7. Mägerle promotional materials.

8. GP «Ivchenko-Progress»: Processing blades on the profile grinding machine Magerle. Industry in focus. 2013. No. 1.

9. Science intensive technology of deep grinding profiled surfaces of turbine blades. V.F. Makarov, A.Kh. Sahaev. *Science intensive in mechanical engineering*. 2012. No. 3(9). Pp. 15—22.

10. Makarov V.F. Influence of geometry generation conditions on surface layer quality of blade at deep profile grinding. V.F. Makarov, S.P. Nikitin. *Science intensive technologies in mechanical engineering*. 2015. No. 8(50). Pp. 38—44.

*Рецензент д.т.н. В.А. Поletaев*