

Повышение производительности, качества и точности деталей авиационных двигателей на основе рационального применения многокоординатных шлифовальных станков с ЧПУ

В. Ф. Макаров, М. В. Песин, А. О. Норин

Представлена разработанная технология обработки сопловых лопаток на 5-осевом профишлифовальном обрабатывающем центре с ЧПУ, которая повысила производительность и качество обработки за счет увеличения количества обрабатываемых поверхностей сопловых лопаток авиационного ГТД с одной установки, а также применения новых высокопористых шлифовальных кругов и рациональных режимов глубинного шлифования. Рассмотрено совместное использование системы ЧПУ станка и специального программного обеспечения для коррекции погрешностей литейных поверхностей деталей в процессе их установки, разворота и глубинного шлифования базовых поверхностей.

Ключевые слова:

сопловые лопатки турбины, проходное сечение, глубинное шлифование, обрабатываемые поверхности, шлифовальные круги, количество проходов погрешности литья лопаток

УДК 621.91 | ВАК 2.5.5

DOI: 10.22184/2499-9407.2023.30.1.42.46

Введение

В последнее время в связи с санкциями в России резко возросла потребность в изготовлении большого парка отечественных магистральных пассажирских самолетов, которые должны заменить импортные. Правительством РФ поставлена задача изготовить к 2030 году не менее 339

современных отечественных гражданских самолетов, таких как Ту-214, Sukhoi Superjet 100 New и МС-21-310. Это требует от авиационных моторостроительных предприятий ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей (ГТД), таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др., не уступающих по

характеристикам мировым аналогам газотурбинной техники [1].

Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности при стабильно высоких параметрах качества и конкурентоспособности ГТД.

Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состоящий из дисков, рабочих и сопловых лопаток, входящих в сопловые аппараты, из труднообрабатываемых жаропрочных сплавов на никелевой основе [2]. Из всех деталей газовой турбины наиболее сложными по геометрии и конструкции являются лопатки сопловых аппаратов (рис. 1), предназначенных для правильного направления газового потока на рабочие лопатки турбины для создания необходимого крутящего момента и вращения ротора газотурбинного двигателя.

Обработка разнонаправленных поверхностей таких сложных деталей проводится обычно методом шлифования на различных универсальных плоскошлифовальных станках типа ЗГ72 Ф или модернизированных токарно-лобовых станках типа МК163 М с применением различных шлифовальных кругов из электрокорунда белого на керамической или бакелитовой связке, зачастую без применения СОЖ. При этом, помимо низкой производительности обработки, зачастую не обеспечивается требуемая точность и шероховатость, появляются трещины и шлифовочные прижоги обработанных поверхностей.

Кроме того, установка сопловых лопаток на универсальных станках для шлифования различных поверхностей проводится в специальных сложных дорогостоящих приспособлениях по шести базовым литейным точкам. При таком варианте базирования сопловых лопаток и последующем шлифовании возможно появление искаженной геометрии по сравнению с эталоном, что связано с часто возникающей погрешностью геометрии отливок лопаток при их остывании после литья. При сборке прошлифованных лопаток в сопловой аппарат не выполняется требование по обеспечению необходимой площади проходных

сечений между лопатками для рассчитанного прохождения газового потока. Это приводит к изменению рабочих режимов ГТД и снижению КПД за счет увеличения расхода топлива и снижения мощности.

Разработка новой высокопроизводительной технологии обработки сопловых лопаток турбин

Для решения проблем повышения производительности, точности и качества обработки разнонаправленных поверхностей сопловых лопаток проведен анализ существующих технологических процессов профилировальной обработки рабочих и сопловых лопаток турбин современных газотурбинных двигателей на моторостроительных предприятиях страны и за рубежом [3, 4]. В результате разработан новый наиболее эффективный технологический процесс 5-осевой профилировальной многокоординатной обработки всех поверхностей сопловой лопатки с одной установки на шлифовальном обрабатывающем центре модели MFP-050.65.65 с ЧПУ Siemens Sinumerik 840D фирмы Magerle AG (Швейцария) (рис. 2).

Этот станок имеет горизонтальное расположение шпинделя и поворотный глобусный стол. Разработанная технология предусматривает проводить комплексную обработку шлифованием сложных поверхностей лопаток с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат, с непрерывной правкой и автоматической сменой шлифовальных кругов (рис. 2в). Современная конструкция станка и концепция системы управления обеспечивают высокую производительность и точность обработки.

Многokратное повышение производительности, качества и точности на станке обеспечивается выполнением обработки всех плоских и круговых разнонаправленных поверхностей сопловых лопаток методом высокопроизводительного глубинного шлифования с применением высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки алмазными роликами и обильной высоконапорной подачи СОЖ [5, 6].

Общая схема глубинного шлифования плоских поверхностей сопловых лопаток на станке MFP-050.65.65

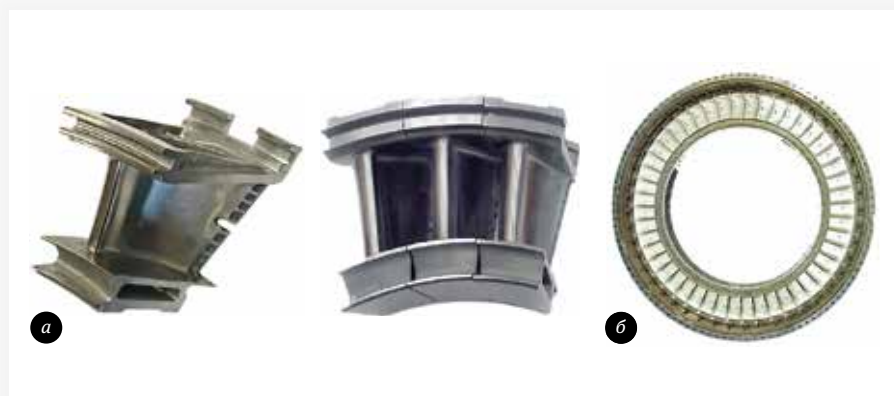


Рис. 1. Общий вид расположения различных разнонаправленных обрабатываемых поверхностей сопловой лопатки турбины (а), предназначенных для точного расположения в сопловом аппарате турбины при сборке (б)

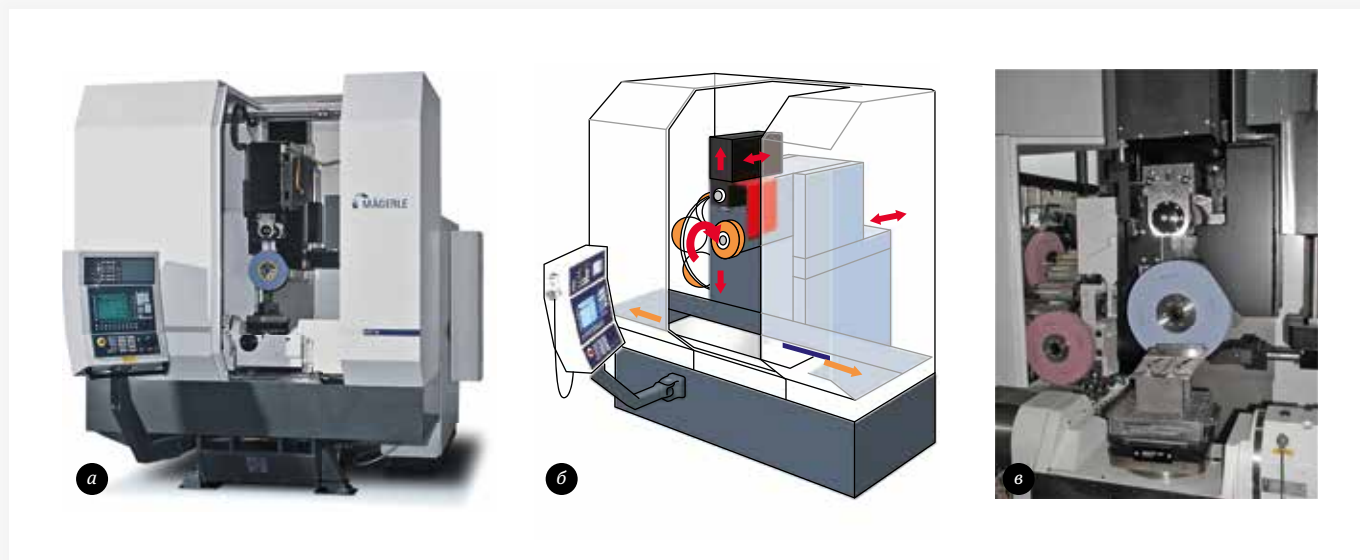


Рис. 2. Профилешлифовальный станок MFP-050.65.65: *а* – общий вид; *б* – схема 5-осевой обработки и зоны шлифования; *в* – схема непрерывной правки алмазным роликом и автоматической смены шлифовальных кругов для профильного глубинного шлифования лопаток турбины

с применением высокопористых шлифовальных кругов, непрерывной правки алмазными роликами и обильной высоконапорной подачи СОЖ для охлаждения зоны шлифования, зоны правки и вымывания стружки представлена на рис. 3. Кроме того, СОЖ используется для автоматической балансировки шлифовальных кругов на станке. Система ЧПУ станка увеличивает число оборотов круга по мере уменьшения его диаметра при непрерывной правке с целью поддержания постоянной скорости резания.

Для глубинного шлифования вместо импортных шлифовальных кругов фирмы Tugolit (Австрия) выбраны отечественные высокопористые керамические круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» 1300 × 30 × 76,2 25A F60 G14V, не уступающие импортному аналогу по стойкости и производительности, но в пять раз дешевле.

Предварительно были определены рациональные режимы глубинного шлифования, обеспечивающие требуемую шероховатость $Ra = 0,32-0,63$ мкм, благоприятные сжимающие напряжения и отсутствие шлифовочных прижогов и трещин:

- скорость круга $V = 20$ м/с;
- подача $S = 150-200$ мм/мин;
- непрерывная правка 0,4–0,8 мкм/об.;
- СОЖ 6–8% Blaser 4000CF под давлением 6 бар.

Обработка базовых поверхностей с припуском 1–2 мм выполняется за пять проходов с уменьшением глубины резания от 1 до 0,02 мм с режимами шлифования, представленными в табл. 1.

Контроль точности геометрии сопловых лопаток осуществляется бесконтактной оптической измерительной системой ATOS III, которая позволяет получать оцифрованные модели сопловых лопаток в формате *stl с точностью $\pm 0,02$ мм.

В результате анализа технических характеристик и возможностей этого станка и системы ЧПУ принято решение,

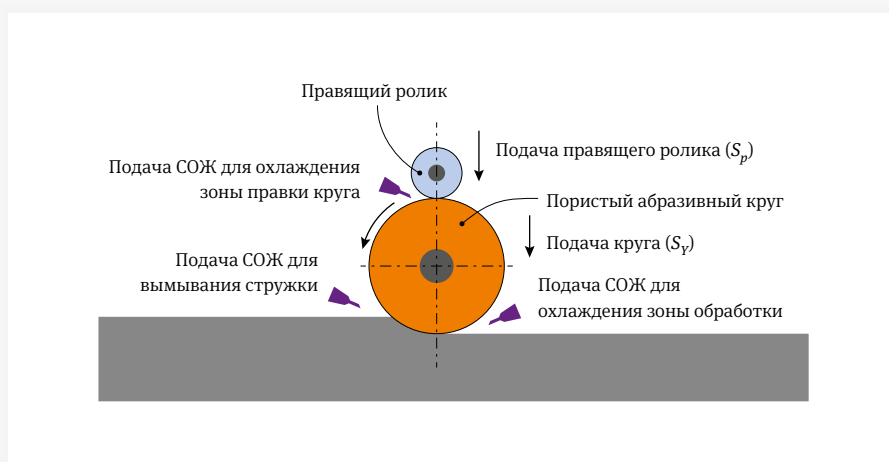


Рис. 3. Схема глубинного шлифования плоских поверхностей сопловых лопаток на станке MFP-050.65.65 фирмы Magerle AG

Таблица 1. Режимы глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток

№ прохода	Глубина t , мм	Подача S , мм / мин.	Скорость V , м / с	Непрерывная правка ролика, мкм / об.	Соотношение скоростей, круг / ролик
1	1	150	20	0,8	0,8
2	0,5	150	20	0,8	0,8
3	0,4	150	20	0,6	0,8
4	0,08	200	20	0,4	0,8
5	0,02	200	20	0	0

что неизбежное искажение геометрии отливок лопаток, полученных в процессе литья по выплавляемым моделям, можно уменьшить за счет коррекции геометрии установочных базовых поверхностей сопловых лопаток турбин ГТД при их обработке методом глубинного шлифования. Для того чтобы провести корректирующую механическую обработку, необходимо правильно установить и развернуть вместе с приспособлением сопловую лопатку на

предварительно рассчитанный угол, то есть придать сопловой лопатке правильное положение относительно выбранной системы координат [7, 8].

Для получения величин этой коррекции разработано специальное программное обеспечение (СПО). Данное СПО позволяет с помощью оцифровки учесть величину отклонения фактических литейных поверхностей профиля пера лопаток от конструкторской модели и рассчитать угол разворота и смещения лопатки с приспособлением и окончательную получившуюся площадь проходного сечения. Для разворота лопатки с приспособлением на расчетный угол из СПО выбирается файл и вводится в стойку ЧПУ станка MFP-050.65.65. Введя коррекцию, после установки лопатки в станочное приспособление (рис. 4) и разворота ее на угол, рассчитанный специальным программным обеспечением, в процессе последующего глубинного шлифования базовых установочных поверхностей искажение положения профиля лопатки в пространстве уменьшается, и при сборке обработанных лопаток в корпусе соплового аппарата турбины обеспечивается требуемое значение площади проходного сечения турбины ГТД [9]. На рис. 4 представлена схема расположения поворотного приспособления для шлифования лопатки. Приспособление расположено на паллете, которая устанавливается на стол станка по посадочным местам.

Экспериментальные исследования применения новой технологии обработки сопловых лопаток на станке фирмы Magerle AG показали, что после обработки площадь

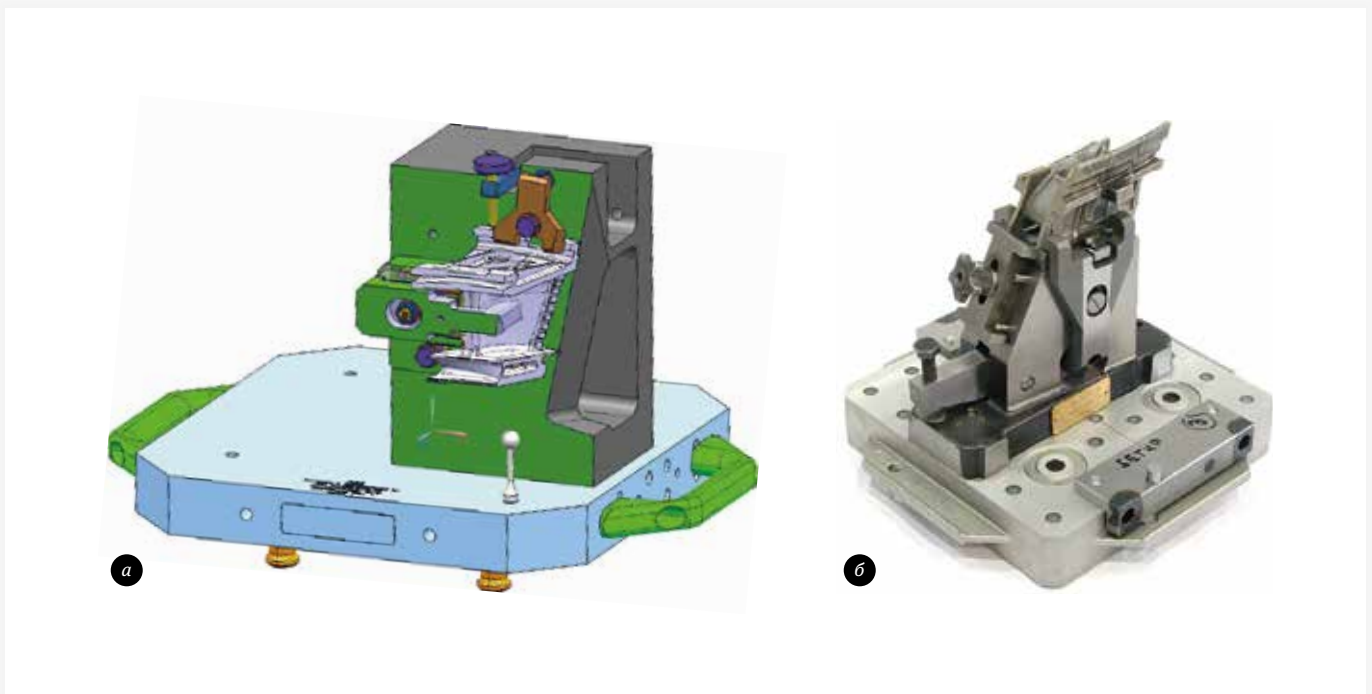


Рис. 4. Станочное поворотное приспособление для установки, разворота и обработки базовых установочных поверхностей сопловых лопаток методом глубинного шлифования на станке Magerle MFP-050.65.653-D: *а* – модель; *б* – общий вид

проходного сечения соплового аппарата значительно приблизилось к номинальному значению [10, 11].

Результаты работы

Полученные результаты внедрены и применяются при изготовлении семи различных наименований сопловых лопаток ТВД из жаропрочного литейного сплава на основе никеля на 5-координатном профилешлифовальном станке с ЧПУ MFP-050.65.65 в АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь).

В результате внедрения новой технологии изготовления сопловых лопаток с применением многокоординатных профилешлифовальных станков и последующей более эффективной сборки сопловых аппаратов производительность изготовления этих деталей и узлов ГТД увеличилась в три раза. При этом обеспечено более высокое по сравнению с серийным производством качество поверхностного слоя лопаток: шероховатость поверхности снизилась до $Ra = 0,3-0,4$ мкм, получены благоприятные сжимающие остаточные напряжения, обеспечена микротвердость в пределах нормы, создана благоприятная без прижогов и трещин микроструктура поверхностного слоя. Кроме того, исключены дополнительные переборки лопаток при селективной сборке сопловых аппаратов, что значительно сократило время простоя сборочных участков для подгонки площади проходного сечения соплового аппарата до требуемого значения. В результате внедрения обработки сопловых лопаток на 5-осевом многокоординатном профилешлифовальном станке с ЧПУ Mägerle MFP-050.65.65 примерно на 4 млн руб. в год сокращены затраты на ежегодное изготовление не менее четырех дополнительных ступеней и барабанов, необходимых для шлифования плоских и круговых поверхностей сопловых лопаток по ранее применявшейся серийной технологии на плоскошлифовальных и модернизированных токарно-лобовых станках.

По новой технологии обработано 26 комплектов сопловых аппаратов и более 1000 сопловых лопаток с внесением в систему ЧПУ станка коррекции найденных при оцифровке отклонений профиля пера сопловых лопаток путем разворотов и смещений лопаток в приспособлении на рассчитанную величину и последующим глубинным шлифованием базовых поверхностей, что позволило гарантировано обеспечивать требуемую площадь проходного сечения соплового аппарата в пределах заданного допуска. Оформлен патент на изобретение № 2648174.

Литература

1. **Козлов Д. А.** ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>. Дата обращения: 15.10.2014.
2. **Иноземцев А. А., Нихамкин М. А., Сандрацкий В. Л.** Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Т. 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства. М.: Машиностроение, 2008. 365 с.
3. **Макаров В. Ф.** Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие. СПб.: Издательство «Лань», 2013. 320 с.
4. **Noichl H.** CBN Grinding of Nickel Alloys in the Aerospace Industry // Intertech 2000. – Vancouver, 2000. July, pp. 17–21.
5. **Поletaев В. А., Цветков Е. В., Волков Д. И.** Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 262 с.
6. **Макаров В. Ф., Никитин С. П.** Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ // Научные технологии машиностроения. 2018. № 4(82). С. 21–28.
7. **Макаров В. Ф., Туранский Р. А., Григорьева А. В.** Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин: [текст] // Материалы науч.-практ. конф. – Брянск, 2015, с. 291–293.
8. **Макаров В. Ф., Норин А. О.** Автоматизированный расчет величин смещений сопловых лопаток турбины с обеспечением заданного проходного сечения соплового аппарата. Материалы VIII МНТК «Научные технологии на современном этапе развития машиностроения», 19–21 мая; Москва, МАДИ, 2016.
9. **Макаров В. Ф., Норин А. О., Туранский Р. А.** Разработка метода корректирующего управления процессом глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток на многоосевом станке с ЧПУ. МНТК «Современные высокоэффективные технологии и оборудование в машиностроении (МТЕТ-2016)» 6–8 октября 2016, СПб гос. политехн. ун-т Петра Великого, 2016, с. 23–27.
10. **Макаров В. Ф., Никитин С. П., Норин А. О.** Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток. Научные технологии в машиностроении. 2016. № 5(59). С. 29–31.
11. **Макаров В. Ф., Никитин С. П.** Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток // Научные технологии машиностроения. 2016. № 5(59). С. 17–24.

Авторы

Макаров Владимир Федорович – доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета

Песин Михаил Владимирович – доктор технических наук, профессор Пермского национального исследовательского политехнического университета

Норин Александр Игоревич – аспирант кафедры ИТМ Пермского национального исследовательского политехнического университета



**5 – 8 АПРЕЛЯ
2023**

МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА

мебели, предметов интерьера, материалов,
комплектующих и оборудования
для деревообрабатывающего
и мебельного производства

Краснодар
ул. Конгрессная, 1
ВКК «Экспоград Юг»

**320
УЧАСТНИКОВ**

**13 634
ПОСЕТИТЕЛЯ**

**UMIDS.
МЕБЕЛЬ.
ПРЕДМЕТЫ ИНТЕРЬЕРА**

**UMIDS.
ОБОРУДОВАНИЕ.
КОМПЛЕКТУЮЩИЕ**

*Статистика приведена по выставке UMIDS 2022

12+



UMIDS.RU

Организатор



Международная
Выставочная
Компания

+7 (861) 200-12-39
+7 (861) 200-12-58
umids@mvk.ru

Бесплатный билет
по промокоду **UMIDS-08**