

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.91

doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-19-26

## ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МНОГОКООРДИНАТНЫХ ШЛИФОВАЛЬНЫХ СТАНКОВ С ЧПУ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ, КАЧЕСТВА И ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ ДЕТАЛЕЙ И УЗЛОВ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Владимир Федорович Макаров<sup>1✉</sup>, Михаил Владимирович Песин<sup>2</sup>, Александр Олегович Норин<sup>3</sup>

<sup>1,2,3</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

<sup>1</sup> makarovv@pstu.ru

<sup>2</sup> m.pesin@mail.ru

<sup>3</sup> makarovv@pstu.ru

### Аннотация

Работа поставлена с целью повышения производительности, качества и точности изготовления деталей и узлов газотурбинных двигателей для современного растущего пассажирского авиационного транспорта на основе использования технических возможностей современных многоосевых многокоординатных шлифовальных обрабатывающих центров с ЧПУ. В статье приведены результаты успешного применения многокоординатного пятиосевого профилешлифовального обрабатывающего центра с ЧПУ модели MFP-050.65.65 фирмы Magerle (Швейцария), который позволил сократить в пять раз число операций, универсальных станков, специальных приспособлений и режущих инструментов путем увеличения количества обрабатываемых поверхностей с одной установки обрабатываемых сопловых лопаток авиационного газотурбинного двигателя. Одновременно с значительным повышением производительности обработки различных разнонаправленных поверхностей сопловых

лопаток за счет применения новых высокопористых шлифовальных кругов и рациональных режимов глубинного шлифования обеспечено более высокое безприжоговое качество проточенных поверхностей и решена важная задача по повышению точности проходных сечений соплового аппарата турбины при совместном использовании системы ЧПУ станка и специального программного обеспечения для коррекции погрешностей литейных поверхностей деталей в процессе их установки, разворота и глубинного шлифования базовых поверхностей. Разработанная новая технология обработки сопловых лопаток впервые в РФ внедрена на предприятии АО "Авиадвигатель" при изготовлении сопловых лопаток современных вновь выпускаемых газотурбинных двигателей.

**Ключевые слова:** лопатки, турбины, сечение, шлифование, поверхности, шлифовальные круги, погрешности, литье.

Ссылка для цитирования:

Макаров В.Ф. Особенности применения многокоординатных шлифовальных станков с чпу для повышения производительности, качества и точности обработки деталей и узлов авиационных газотурбинных двигателей / В.Ф. Макаров, М.В. Песин, А.О. Норин // Транспортное машиностроение. – 2023. - № 02. – С. 19 – 26. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-19-26.

Original article

Open Access Article

## FEATURES OF USING MULTIAXIS CNC GRINDING MACHINES TO IMPROVE MACHINING PERFORMANCE, QUALITY AND ACCURACY OF PARTS AND ASSEMBLIES OF AVIATION GAS TURBINE ENGINES

Vladimir Fyodorovich Makarov<sup>1✉</sup>, Mikhail Vladimirovich Pesin<sup>2</sup>, Aleksandr Olegovich Norin<sup>3</sup>

© Макаров В.Ф., Песин М.В., Норин А.О., 2023

## Abstract

The paper is aimed at improving the productivity, quality and accuracy of manufacturing gas turbine engine parts and assemblies for the modern growing passenger aviation transport based on the use of technical capabilities of modern multi-axis CNC grinding machining centers. The paper shows the results of successful application of a five-axis CNC grinding machining center MFP-050.65.65 made by Magerle (Switzerland), which allows reducing by five times the number of operations, universal machines, special devices and cutting tools by increasing the number of machined surfaces for one set of nozzle blades of an aviation gas turbine engine. Simultaneously with a significant increase in the productivity of machining various multidirectional surfaces of the nozzle blades due

to the use of new highly porous grinding wheels and rational modes of deep grinding, a higher burn-free quality of the ground surfaces is ensured and an important task is solved to increase the accuracy of the flow sections of the turbine nozzle apparatus with the combined use of CNC system and special software for correcting errors of part casting surfaces during their installation, turning and deep grinding of the base surfaces. The developed new technology of nozzle blades machining was introduced for the first time in the Russian Federation at the *Aviadvigatel* enterprise for manufacturing nozzle blades of modern newly produced gas turbine engines.

**Keywords:** blades, turbines, cross section, grinding, surfaces, grinding wheels, errors, casting.

## Reference for citing:

Makarov VF, Pesin MV, Norin AO. Features of using multi-axis CNC grinding machines to improve machining performance, quality and accuracy of parts and assemblies of aviation gas turbine engines. *Transport Engineering*. 2023; 2:19-26. doi: 10.30987/2782-5957-2023-2-19-26.

## Введение

В настоящее время в нашей стране в связи с санкциями резко возросла потребность в изготовлении большого парка отечественных магистральных пассажирских самолетов на замену импортных. Правительством РФ поставлены задачи изготовить к 2030 году не менее 339 современных отечественных гражданских самолетов, таких как ТУ-214, *Sukhoi Superjet 100 New* и МС-21-310. В свою очередь это потребует от авиационных моторостроительных предприятий ускоренного производства большого количества современных отечественных газотурбинных двигателей, таких как ПС-90А, ПД-8, ПД-14 и др. с характеристиками, не уступающими мировым аналогам газотурбинной техники [1].

Решение этой проблемы на предприятиях моторостроения возможно путем применения новых технологических решений, которые обеспечат существенный рост производительности изготовления при стабильно высоких параметрах качества и конкурентоспособности газотурбинных двигателей. Одним из наиболее трудоемких узлов газотурбинного двигателя является узел газовой турбины, состо-

ящий 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 на 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.



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

*Fig.1. General view of the location of various multidirectional machined surfaces of the turbine nozzle blade – a), designed for precise location in the turbine nozzle in the assembly – b)*

Кроме того, установка сопловых лопаток на универсальных станках для шлифования различных поверхностей проводится в специальных сложных дорогостоящих приспособлениях по 6 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 шлифованных лопаток в сопловой аппарате не выполняется требование по обеспечению необходимой площади проходных сечений между лопатками для рассчитанного прохождения газового потока. Это приводит к изменению рабочих режимов ГТД, к увеличению расхода топлива, снижению мощности, тяги и КПД газотурбинного двигателя.

### **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 профилешлифовальной 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 по пятиосевой профилешлифовальной многокоординатной обработке 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 (рис. 2 а) имеет горизонтальное расположение шпинделя и поворотный глобусный стол (рис. 2 б). Разработанная технология предусматривает проводить комплексную обработку шли-

фованием сложных поверхностей лопаток с круговой интерполяцией одновременно по пяти осям координат, с непрерывной правкой и автоматической сменой шлифовальных кругов (рис. 2 в). 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* фирмы Мегерле (Швейцария) 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.

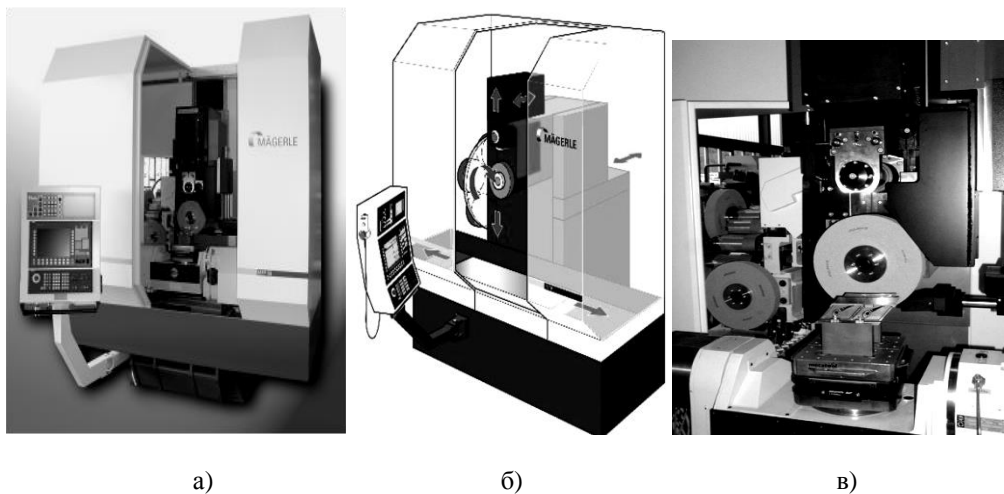


Рис. 2. Общий вид профишлифовального станка *MFP-050.65.65* – а), схемы 5-ти осевой обработки и зоны шлифования, непрерывной правки алмазным роликом и автоматической смены шлифовальных кругов для профильного глубинного шлифования лопаток турбины  
*Fig. 2. General view of the profile grinding machine MFP-050.65.65 – a), diagram of 5-axis machining and grinding zone, continuous diamond roller straightening and automatic change of grinding wheels for profile deep grinding of turbine blades*

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.

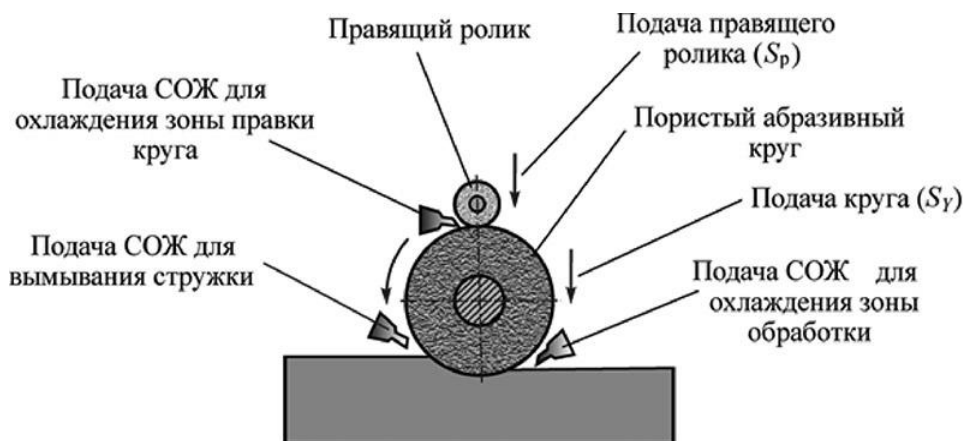


Рис. 3. Схема глубинного шлифования плоских поверхностей сопловых лопаток на станке *MFP-050.65.65* фирмы Мегерле (Швейцария)  
*Fig. 3. Diagram of deep grinding of flat nozzle blade surfaces on the machine MFP-050.65.65 made by Mägerle (Switzerland)*

Для глубинного шлифования выбраны вместо импортных шлифовальных кругов фирмы «*Tyrolit*» (Австрия) отечественные высокопористые керамические круги фирмы ООО «Волгашлиф Плюс» 1 300×30×76,2

25A F60 G14V, не уступающие по стойкости и производительности, но дешевле в 5 раз. Предварительно были определены рациональные режимы глубинного шлифования, обеспечивающих требуемую шероховатость  $Ra = 0,32-0,63$  мкм, благоприят-

ные 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 5 проходов с уменьшением глубины резания от 1 до  $0,02$  мм с режимами шлифования, представленными в таблице.

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, 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, т.е. придать сопловой лопатке правильное положение относительно выбранной системы координат [7, 8].

Таблица

Режимы глубинного шлифования базовых поверхностей сопловых лопаток

*Table*

*Modes of deep grinding of the base nozzle blade surfaces*

№ 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

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* фирмы *Magerle AG*. Введя коррекцию, после установки лопатки в станочное приспособление (рис. 4) и

разворота ее на рассчитанный угол 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 газотурбинного двигателя [9]. Ниже представлена схема расположения поворотного приспособления для шлифования лопатки (рис. 3). Приспособление расположено на паллете, которая устанавливается на стол станка по посадочным местам.

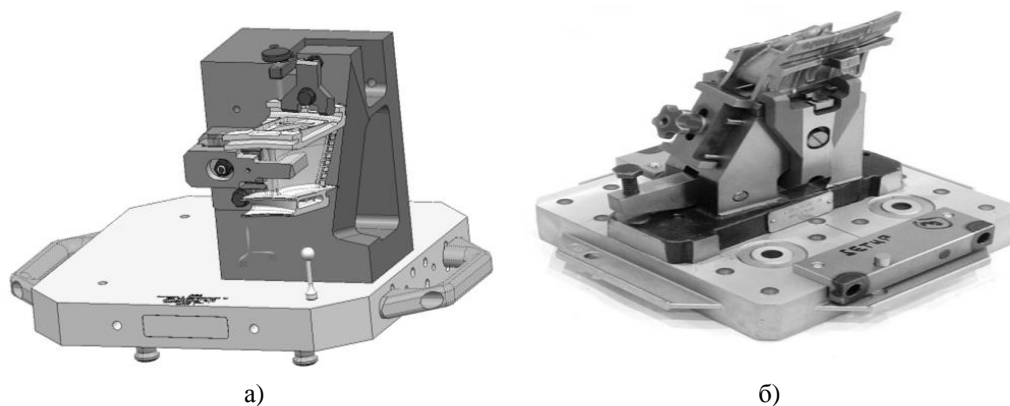


Рис. 4. 3-D модель – а) и общий вид – б) станочного поворотного приспособления для установки, разворота и обработки базовых установочных поверхностей сопловых лопаток методом глубинного шлифования на станке фирмы «Mägerle AG» MFP-050.65.65  
 Fig. 4. 3-D model – a) and general view – b) of a machine turning device for installing, turning and machining the basic surfaces of nozzle blades by deep grinding on Mägerle AG machine MFP-050.65.65

Экспериментальные исследования применения новой технологии обработки сопловых лопаток на станке фирмы «Mägerle AG» показали, что, после обработки площадь проходного сечения соплового аппарата значительно приблизилось к номинальному значению [10, 11].

**Результаты работы** внедрены и применяются при изготовлении 7 различных наименований сопловых лопаток ТВД из жаропрочного литейного сплава на основе никеля на 5-ти координатном профилишлифовальном станке с ЧПУ MFP-050.65.65 фирмы Mägerle в АО «ОДК-Авиадвигатель» (г. Пермь). В результате внедрения новой технологии изготовления сопловых лопаток с применением многокоординатных профилишлифовальных станков и последующей более эффективной сборки сопловых аппаратов производительность изготовления этих деталей и узлов газотурбинных двигателей увеличилась в 3 раза. При этом обеспечено более высокое по сравнению с серийным производством качество поверхностного слоя лопаток: шероховатость поверхности снизилась до  $Ra = 0,3 \dots 0,4$  мкм, получены благоприятные сжимающие остаточные напряжения, обеспечена микротвердость в пределах нормы, создана благоприятная без прижогов и трещин микроструктура поверхностного слоя. Кроме того, исклю-

чены 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-ти осевом многокоординатном профилишлифовальном станке MFP-050.65.65 фирмы Mägerle с ЧПУ сокращены затраты (около 4 млн. руб. в год) на ежегодное изготовление не менее четырех дополнительных ступеней и барабанов, необходимых для шлифования плоских и круговых поверхностей сопловых лопаток по старой серийной технологии на плоскошлифовальных и модернизированных токарнолобовых 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.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Козлов Д.А. ПД-14 создается практически всеми авиадвигателестроителями России [электронный ресурс]/Д.А. Козлов. – Режим доступа: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>. Дата обращения: 15.10.2014.
2. Иноземцев, А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок. Том 2. Компрессоры. Камеры сгорания. Форсажные камеры. Турбины. Выходные устройства/ А.А.Иноземцев, М.А. Нихамкин, В.Л. Сандрацкий - М.: Машиностроение, 2008. - 365с.
3. Макаров В.Ф. Современные методы высокоэффективной абразивной обработки жаропрочных сталей и сплавов: Учебное пособие. - СПб.: Издательство "Лань", 2013. – 320 с. 2.
4. Noichl H. CBN Grinding of Nickel Alloys in the Aerospace Industry. // Intertech 2000. – Vancouver, 2000. July , p. 17-21.
5. Полетаев В.А., Цветков Е.В., Волков Д.И. Автоматизированное производство лопаток ГТД: Библиотека технолога. М.: Инновационное машиностроение, 2016. – 262 с.
6. Макаров В.Ф. Повышение эффективности профильного глубинного шлифования лопаток турбин на многокоординатных станках с ЧПУ. / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научные технологии машиностроения, 2018 - №4(82) – с. 21...28.
7. Макаров, В.Ф. Повышение точности проходного сечения сопловых лопаток турбин : [текст] / В.Ф. Макаров, Р.А. Туранский, А.В. Григорьева // материалы науч.-практ. конф. – Брянск, 2015. - 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 «Научно-технические 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. политех. 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. Повышение качества и производительности при профильном глубинном шлифовании турбинных лопаток. / Макаров В.Ф., Никитин С.П. // Научные технологии машиностроения, 2016 - №5(59) – с. 17...24.

## REFERENCES

1. Kozlov DA. PD-14 is created by almost all aircraft engine builders of Russia [Internet]. [cited 2014 Oct 15]. Available from: <http://www.aviaport.ru/news/2012/04/16/233024.html>.
2. Inozemtsev AA, Nihamkin MA, Sandratsky VL. Fundamentals of designing aircraft engines and power plants. Compressors. Combustion chambers. Afterburners. Turbines. Output devices. Moscow: Mashinostroenie; 2008.
3. Makarov VF. Modern methods of high-efficiency abrasive treatment of heat-resistant steels and alloys: textbook. St. Petersburg: Publishing house Lan; 2013.
4. Noichl H. CBN grinding of nickel alloys in the aerospace industry. Vancouver: Intertech 2000; 2000.
5. Poletaev VA, Tsvetkov EV, Volkov DI. Automated production of GTE blades: production engineer's library. Moscow: Innovatsionnoe Mashinostroenie; 2016.
6. Makarov VF, Nikitin SP. Efficiency increase of profile deep grinding of turbine blades on NC multi-axis machines. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2018;4(82):21-28.
7. Makarov VF, Turansky RA, Grigorieva AV. Improving the accuracy of the flow section of turbine nozzle blades. Proceedings of the Scientific and Practical Conference; Bryansk; 2015.
8. Makarov VF, Norin AO. Automated calculation of the misalignment values of the turbine nozzle blades providing a given flow section of the nozzle diaphragm. Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference, May 19-21, 2016: Science Intensive Technologies at the Present Stage of Mechanical Engineering Development; Moscow: MADI; 2016.
9. Makarov VF, Norin AO, Turansky RA. Development of a method to control correctly deep grinding of the base surfaces of nozzle blades on a NC multi-axis machine. Proceedings of the International Scientific and Technical Conference, October 6-8, 2016: Modern Science Intensive and Equipment in Mechanical Engineering (MTET-2016); St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University; 2016. p. 23-27.
10. Makarov VF, Nikitin SP, Norin AO. Quality and productivity increase at profile creep deep grinding of turbine blades. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2016;5(59):17-24.

### **Информация об авторах:**

**Макаров Владимир Федорович** - профессор, доктор техн. наук, тел. 89124915014, зам. зав. кафедрой ИТМ ПНИПУ, академик РАЕН.

**Песин Михаил Владимирович** - профессор, доктор техн. наук, тел. 89124855505, декан механико-

технологического факультета ПНИПУ член-кор. РАЕН.

**Норин Александр Игоревич**, аспирант каф. ИТМ ПНИПУ, т.89504538033.

**Makarov Vladimir Fyodorovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Innovative Engineering Technologies at Perm National Research Polytechnic University, Academician of the Russian Academy of Sciences; phone: 89124915014

**Pesin Mikhail Vladimirovich** - Doctor of Technical Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Mechanics

and Technology at Perm National Research Polytechnic University, Member of the Russian Academy of Sciences; phone: 89124855505

**Norin Aleksandr Olegovich** – Postgraduate Student of the Department of Innovative Engineering Technologies at Perm National Research Polytechnic University; phone: 89504538033.

**Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.**  
**Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.**

**Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.**  
**The authors declare no conflicts of interests.**

**Статья опубликована в режиме Open Access.**  
**Article published in Open Access mode.**

Статья поступила в редакцию 13.12.2022; одобрена после рецензирования 17.01.2023; принята к публикации 26.01.2023. Рецензент – Петрешин Д.И., доктор технических наук, профессор, директор УНТИ Брянского государственного технического университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 13.12.2022; approved after review on 17.01.2023; accepted for publication on 26.01.2023. The reviewer is Petreshin D.I., Doctor of Technical Sciences, Professor, Director of the Educational and Scientific Technological Institute of Bryansk State Technical University, member of the Editorial Council of the journal *Transport Engineering*.