

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №10 (160). С.12-18.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №10 (160). P.12-18.

Научная статья
УДК 621
doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-18

К вопросу определения технологических параметров обработки сложных пространственных поверхностей лопаток ГТД при полировании

Александр Николаевич Михайлов¹, д.т.н.

Александр Владимирович Анастасьев², аспирант

^{1,2} Донецкий национальный технический университет, Донецк, ДНР, Россия

¹ mntk21@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

² anastasyev.av@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0000-0000-0000>

Аннотация. Полирование является завершающим этапом отделочной обработки лопаток турбин газотурбинного двигателя. Лопатки характеризуются сложной пространственной формой пера, к которому выдвигаются жесткие требования к шероховатости поверхностного слоя. Отклонение геометрических форм, размеров и параметров качества поверхности профиля пера лопатки от расчетных ухудшает рабочие характеристики двигателя, приводит к потере мощности, уменьшению КПД и снижению экономичности двигателя и его надежности, особенно под действием переменных нагрузок, вызванных изменениями в режиме работы, такими как взлет, посадка и т.д. Вследствие этого становится важным определить точные технологические параметры, такие как усилие прижима, используемое при полировании, чтобы добиться минимальных отклонений в процессе обработки. Представлены результаты экспериментального исследования изменения пятна контакта при полировании образца упрощенной модели лопатки ГТД в зависимости от величины усилия прижима и материала полировальника. Детально описана методика проведения эксперимента, используемое оборудование и оснастка, а также технологические режимы обработки. Приведены теоретические сведения о схеме обработки и теоретической величине пятна контакта для рассматриваемых усилий при обработке кругами из различных материалов. Приведены результаты экспериментального исследования, установлена взаимосвязь между изменением усилия прижима и шириной пятна контакта, и построена номограмма взаимосвязи теоретического и экспериментального значения полуширины пятна контакта при полировании, подтверждающие возможность применения контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга. Даны рекомендации по применению полученных данных при проектировании технологического процесса отделочной обработки сложных пространственных поверхностей лопаток ГТД за счет применения теоретических и экспериментальных методов расчета пятна контакта. Предложенные подходы могут быть использованы в производстве для повышения качества и долговечности деталей лопаточного аппарата газотурбинных двигателей.

Ключевые слова: полирование, лопатка турбины, профиль, пятно контакта, усилие прижима

Для цитирования: Михайлов А.Н., Анастасьев А.В. К вопросу определения технологических параметров обработки сложных пространственных поверхностей лопаток ГТД при полировании// Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 10 (160). С. 12–18. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-18

Revisiting technological parameters determination of complex sculptured surfacing for GTE blades under smooth finish

Alexander N. Mikhailov¹, D. Eng.

Alexander V. Anastasiev², PhD student

^{1,2} Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, Russia

¹ mntk21@mail.ru

² anastasyev.av@yandex.ru

Abstract. Smooth finish is the final stage of finish-machining of a gas turbine engine blades. The blades are characterized by a complex spatial outline of a feather, which has strict requirements for surface roughness. Deviation of geometric shapes, sizes and quality parameters of the blade feather airfoil from the calculated ones worsens the engine's performance characteristics, leads to the loss of power, reduces efficiency and engine reliability, especially under the influence of variable loads caused by changes in operating mode, such as takeoff, landing and etc. As a result, it assumes importance of determining exact technological parameters, such as the clamping force when finishing, in order to achieve minimal deviations in the finish-machining. The results of an experimental study of the change in the contact spot under smooth finish of a simplified model of a GTE blade, depending on the magnitude of the clamping force and the material of the polishing instrument, are presented. The routine of the experiment, the equipment and instrumentation used within the study, as well as the technological modes are described in detail. Theoretical information is provided on the machining pattern and the theoretical value of the contact spot for the forces under consideration using circular discs made of various materials. The results of an experimental study are presented, the relationship between the change in the clamping force and the width of the contact spot is found, and a nomogram of the relationship between the theoretical and experimental values of the half-width of the contact spot under smooth finish is constructed, confirming the possibility of using the Hertz contact problem in determining the contact spot of the polishing wheel. The reference is provided for the application of the obtained data in the design of the technological process of finishing complex sculptured surfaces of the blades of the GTE due to the application of theoretical and experimental methods for calculating the contact spot. The proposed approaches can be used in production to improve the quality and durability of the parts of gas turbine engine blades.

Keywords: smooth finish, turbine blade, blade airfoil, contact spot, clamping force

For citation: Mikhailov A.N, Anastasiev A.V. Revisiting technological parameters determination of complex sculptured surfacing for GTE blades under smooth finish / Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. № 10 (160). P. 12–18. doi: 10.30987/2223-4608-2024-12-18

Введение

В настоящее время процессы отделочной обработки лопаток газотурбинного двигателя (ГТД) как у нас в стране, так и за рубежом, носят преимущественно ручной характер, что в большей степени обусловлено сложной пространственной формой пера лопатки [1]. Активно применяются различные виды полирования, в том числе полирование на полировальных бабках, с применением в качестве инструмента специальных войлочных кругов с накатанными на профиль абразивными зёрнами, или микропорошков [2]. Эти процессы разделяют на такие переходы как предварительное и окончательное полирование, а также глянцеование [3].

Обеспечение постоянства обработки при этом, очень часто зависит от уровня квалификации рабочего, т. к. такие параметры, как усилие прижима и длительность обработки в каждой характерной точке профиля, могут изменяться в широком диапазоне, что обусловлено сложным пространственным профилем лопаток [4]. Результатом такого процесса обработки является непостоянство технологических воздействий, вследствие чего на готовом изделии могут наблюдаться локальные зоны, характеризующиеся более

низким качеством обработанной поверхности, либо же процесс обработки существенно увеличивается из-за применения нерациональных режимов резания. С учетом и без того очень сложных условий эксплуатации, которым подвергаются лопатки турбины в процессе работы, наличие дополнительных вышеупомянутых участков может приводить к ускоренному выходу из строя лопаток в частности, и ГТД в целом.

Целью данной работы является экспериментальная проверка теории о нахождении пятна контакта при полировании путем решения контактной задачи Герца, предложенной коллективом авторов в своей работе [5], для расчета сил при назначении технологических параметров обработки.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач, таких как: разработка методики выполнения экспериментальных исследований, проведение исследований и обработка полученных экспериментальных данных, их анализ и сравнение с теоретическими, полученными по представленным зависимостям, а также установление их взаимосвязи. Все эти задачи решаются в данной работе.

Методика выполнения экспериментальных исследований

Проведенные экспериментальные исследования направлены на экспериментальную проверку и подтверждение теории о нахождении пятна контакта при полировании путем решения кон тактной задачи Герца, описанной в работе [5]. Следует отметить, что попытка подтверждения применения данной теории уже проводилась [6], и при проведении экспериментальных исследований были учтены все замечания и рекомендации, а именно: увеличение жесткости всей экспериментальной установки, уменьшение биения полировального круга перед проведением замеров, повышение мощности привода.

Экспериментальная проверка проводилась для схемы обработки полировальным кругом прямого профиля наружной поверхности пера лопатки, при условии, что радиус полировальника больше, чем радиус обрабатываемой лопатки $R_{\text{п}} > R_{\text{л}}$, представленной на рис. 1.

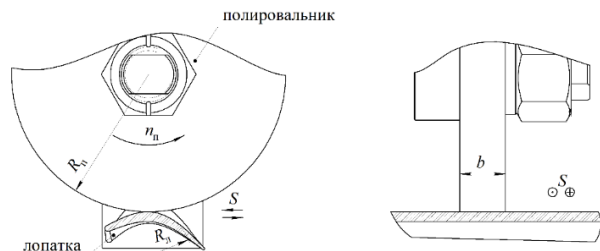


Рис. 1. Схема полирования спинки пера лопатки турбины ГТД

Fig. 1. Finishing-out scheme of the back of the feather

Процесс экспериментального исследования заключается в последовательной обработке образцов со ступенчатым изменением величины прижима детали к полировальному кругу, и последующем замере размеров полученного пятна контакта. Размеры пятна контакта, полученного в результате эксперимента, сравниваем с расчетными параметрами, полученными по зависимостям, представленным в работах [5 – 7].

При проведении эксперимента каждый из подготовленных образцов был разделен на пять зон, для определения размеров пятна контакта при различных усилиях прижима. Для

облегчения проведения замеров пятна контакта на контрольных образцах, перед проведением экспериментальных исследований образцы покрывались тонким слоем перманентного красителя.

Оборудование и оснастка

В качестве основы для экспериментальной установки использовался токарно-винторезный станок. Выбор был обусловлен рядом факторов, в том числе учтенных в работе [6], а именно:

- высокая жесткость системы станок, приспособление, инструмент, деталь;
- возможность закрепления инструмента в центрах, тем самым устранив потенциальную возможность отгиба полировальника;
- механическая подача обрабатываемой заготовки на полировальный круг;
- высокая мощность привода главного движения, гарантирующая постоянство параметров обработки при увеличении силы прижима детали.

Станок был переоснащен для проведения эксперимента следующим образом. В патроне закреплено специальное зажимное приспособление, на которой размещен полировальный круг. Из конструктивных соображений свободный конец оправки поджат вращающимся центром, что позволяет повысить жесткость системы в целом. Обрабатываемая заготовка закреплена в специальной оправке, и установлена в штатный резцедержатель станка (рис. 2).



Рис. 2. Закрепленная в приспособлении заготовка

Fig. 2. The workpiece fixed in the device

На противоположной стороне в резцедержатель установлен кронштейн для тяги цифрового динамометра модели AMF-500,

закрепленного на суппорте станка. Рассматриваемый цифровой динамометр позволяет проводить измерение усилий прижима в двух направлениях (как для случаев сжимающего, так и тянущего воздействия на тягу динамометра), о чем свидетельствует соответствующая пиктограмма на дисплее, в диапазоне до 500 Н, при этом устройство позволяет отображать как текущую величину усилия, так и пиковую в конкретном замере.

Общий вид экспериментальной установки представлен на рис. 3, а режимы обработки в табл. 1.



Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки

Fig. 3. General view of the experimental installation

1. Технологические режимы полирования упрощенных моделей лопатки турбины 1. Technological modes of finishing-out simplified turbine blade models

Наименование параметров	Значение параметров
Частота вращения полировальника, об/мин	400
Усилие прижима, Н	5...260
Длительность операции полирования, с	30
Количество замеров каждого усилия	3

Подготовка к проведению экспериментального исследования проводилась с учетом следующих подготовительных операций: установка и проверка параллельности установки специального зажимного приспособления (см. рис. 2) относительно оси вращения полировального круга; тарирование цифрового динамометра; комплексная проверка обоих подготовительных этапов путем последовательной обработки двух контактных площадок на краях заготовок с одинаковым усилием прижима, и их сравнение.

После подготовительных операций обрабатываемые образцы очищались от пыли и следов проверок и повторно покрывались тонким слоем перманентного красителя, после чего проводились контрольные замеры с фиксацией усилия в соответствующем протоколе. Диапазон измерения усилия прижима был заведомо расширен до 260 Н, что позволит охватить любые виды и схемы обработки полировальными кругами.

Полученные результаты

Результатом данного исследования является экспериментальная проверка изменения

пятна контакта при обработке профиля, эквивалентного профилю лопатки турбины [8], в зависимости от прилагаемых усилий, и сравнение полученных результатов с теоретическими данными, рассчитанными по зависимостям [5]. В результате проведения эксперимента был получен ряд значений, выдержка из которых представлена в табл. 2, а общий вид обработанных образцов представлен на рис. 4.

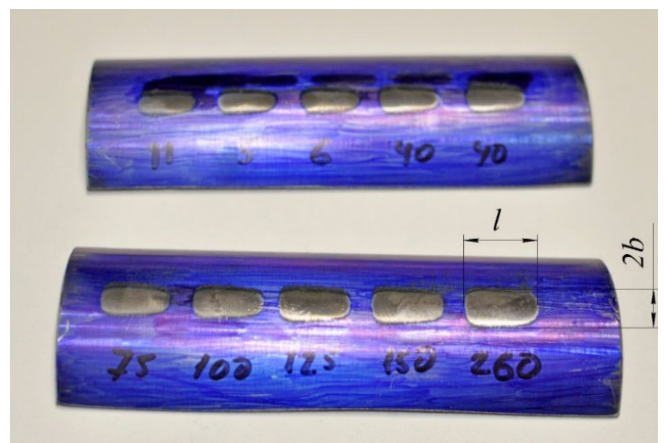


Рис. 4. Общий вид обработанных образцов

Fig. 4. General view of the finish-machined samples

2. Основные характеристики пятна контакта при изменении силы прижима при полировании образцов из стали 45 ГОСТ 1050-2013

2. The main characteristics of the contact spot when changing the clamping force when polishing steel samples 45 GOST 1050-2013

№ п/п	Сила прижима, Н	Характеристики пятна контакта		
		1,0 мм	Ширина 2 <i>b</i> , мм	Площадь, мм ²
1	5	17,0	6,5	110,5
2	10	17,0	7,2	122,4
3	15	17,1	7,3	124,8
4	20	17,5	7,7	134,8
5	40	17,9	7,8	139,6
6	50	18,0	8,0	144,0
7	75	18,2	9,0	163,8
8	100	18,6	9,4	174,8
9	125	19,0	9,6	182,4
10	150	19,1	10,0	191,0
11	260	19,8	10,5	207,9

Для приведенной схемы полирования, полуширина пятна контакта находится по формуле:

$$b = 1,128 \times \sqrt{\frac{P}{l} \frac{R_l R_{\text{п}}}{R_l + R_{\text{п}}} \left(\frac{1 - \mu_l^2}{E_l} + \frac{1 - \mu_{\text{п}}^2}{E_{\text{п}}} \right)}, \quad (1)$$

где *P* – усилие прижима, Н; *l* – ширина полировального круга, мм; *R_л* – радиус заготовки

(лопатки), мм; *R_п* – радиус полировального круга, мм; *μ_л*, *μ_п* – коэффициент Пуассона материала заготовки (лопатки) и круга соответственно; *E_п*, *E_л* – модуль упругости материала полировальника и лопатки соответственно.

Теоретические данные, для аналогичных условий обработки приведены в табл. 3.

3. Теоретическое значение пятна контакта для различных материалов полировальника

3. The theoretical value of the contact spot for various polishing instrument materials

№ п/п	Сила прижима, Н	Характеристики пятна контакта							
		Резина техническая		Каучук		Вулканитовая связка		Полиамид	
		<i>b</i> , мм	ширина 2 <i>b</i> , мм	<i>b</i> , мм	ширина 2 <i>b</i> , мм	<i>b</i> , мм	ширина 2 <i>b</i> , мм	<i>b</i> , мм	ширина 2 <i>b</i> , мм
1	5	1,03	2,06	0,83	1,66	0,08	0,16	0,07	0,14
2	10	1,46	2,92	1,18	2,36	0,12	0,24	0,10	0,20
3	15	1,79	3,58	1,44	2,88	0,14	0,28	0,12	0,24
4	20	2,07	4,14	1,67	3,34	0,16	0,32	0,14	0,28
5	40	2,92	5,84	2,36	4,72	0,23	0,46	0,20	0,40
6	50	3,27	6,54	2,63	5,26	0,26	0,52	0,22	0,44
7	75	4,00	8,00	3,22	6,44	0,32	0,64	0,27	0,54
8	100	4,62	9,24	3,72	7,44	0,37	0,74	0,31	0,62
9	125	5,17	10,34	4,16	8,32	0,41	0,82	0,35	0,70
10	150	5,66	11,32	4,56	9,12	0,45	0,9	0,38	0,76
11	260	7,45	14,90	6,00	12,0	0,59	1,18	0,50	1,00

На основании полученных характеристик ширины пятна контакта, в зависимости от величины усилия прижима, полученных в результате проведения экспериментальных

исследований и приведенных в табл. 2., был построен график, приведенный на рис. 5.

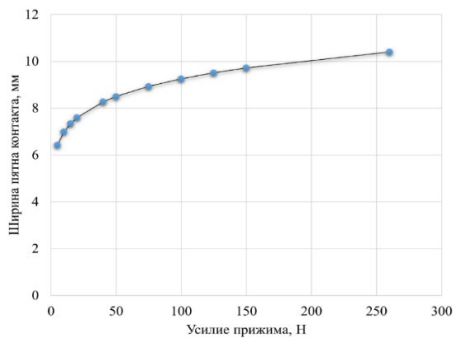


Рис. 5. График зависимости ширины пятна контакта от усилия прижима

Fig. 5. Graph of the dependence of the width of the contact spot on the clamping force

На основе экспериментальных данных пятна контакта, в зависимости от величины усилия прижима, находим функцию зависимости ширины пятна контакта от усилия прижима с применением метода наименьших квадратов. Искомая закономерность описывается степенной функцией $y = 5,2838x^{0,122}$. Аналогичным образом по известной методике находим искомые функции зависимости теоретической ширины пятна контакта от усилия прижима. Основываясь на полученных графиках и эмпирических зависимостях, строим номограмму для определения ширины пятна контакта в зависимости от полученных теоретических значений, в зависимости от применяемого материала полировальника. Приведенные результаты экспериментальных исследований доказывают, что применение контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга является достоверным. Однако с учетом сложных функций изменения полуширины пятна контакта в зависимости от усилия прижима для различных материалов, для упрощения его нахождения можно использовать номограмму (рис. 6), построенную по полученным зависимостям.

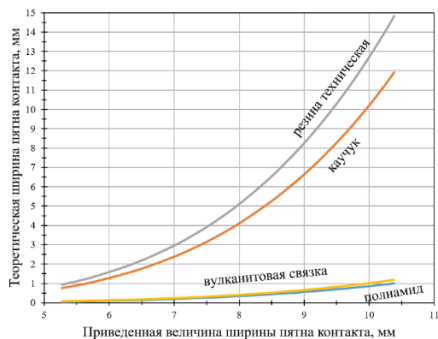


Рис. 6. Номограмма для определения ширины пятна контакта в зависимости от полученных теоретических значений

Fig. 6. Nomogram for determining the width of the contact spot depending on the theoretical values obtained

Обсуждение результатов

Полученные результаты позволяют не только определить геометрические параметры пятна контакта при обработке, а и лечь в основу технологического процесса, обеспечивающего постоянство процесса резания в каждой точке сложного пространственного профиля лопаток ГТД как при ручной обработке [9, 10], так и при автоматизированной [11]. При этом реализация такого технологического процесса может быть основана на обеспечении постоянства режимов обработки на каждой зоне профиля пера лопатки при реализации типового ТП, так и контролируемых переменных воздействий при реализации функционально-ориентированного технологического процесса.

Выводы

Как следствие всего вышесказанного, можно утверждать, что применение контактной задачи Герца применимо к процессам полирования в целом, и в определении геометрических параметров пятна контакта, в частности. Это дает ряд преимуществ, таких как:

1. Оптимизация процесса полировки благодаря более эффективному процессу контроля и регулировки операций полирования, за счет управления режимами обработки;
2. Повышение производительности за счет более точного прогнозирования времени обработки в каждой характерной зоне обрабатываемого изделия;
3. Снижение вероятности повреждений обрабатываемых изделий за счет минимизации чрезмерных нагрузок;
4. Применение при проектировании технологических процессов автоматизированной или роботизированной полировки изделий со сложным пространственным профилем;

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Мубаракшин Р.М., Дическул М.Д., Николаев Н.Н. Роботизированная адаптивная размерная полировка компрессорных и турбинных лопаток // Авиационные двигатели. 2021. № 4 (13). С. 51–62. DOI 10.54349/26586061_2021_4_51. EDN YGFKKK.
2. Макаров В.Ф. Разработка высокоэффективных технологических процессов обработки деталей газотурбинных двигателей для авиации и наземных установок // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П. А. Соловьева. 2017. № 1(40). С. 159–166. EDN YOYBXN.
3. Макаров В.Ф., Жукотский В.А., Бычина Е.Н. Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 52–55. EDN WLXUTT.
4. Михайлов Д.А. Некоторые особенности полировки криволинейных поверхностей лопаток ГТД из титановых сплавов // Прогрессивные технологии и

системы машиностроения. 2014. № 3(49). С. 120–127. EDN TPNXPT.

5. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Обеспечение постоянства контактной нагрузки при полировании сложного профиля пера лопатки турбины ГТД // Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2023. № 2 (81). С. 26–34. EDN ZDUZXB.

6. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Экспериментальное подтверждение адекватности применения контактной задачи Герца при определении пятна контакта полировального круга // Высокие технологии в машиностроении: Материалы XX всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 09–10 ноября 2023 года. Самара: Самарский государственный технический университет, 2023. С. 84–88. EDN RADZUU.

7. Писаренко Г.С., Яковлев А.П., Матвеев В.В. Справочник по сопротивлению материалов / 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Наук. думка, 1988. 736 с. ISBN 5-12-000299-4.

8. Михайлов А.Н., Анастасьев А.В., Пичко Н.С. Построение упрощенного профиля пера лопатки турбины ГТД // Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: Сборник трудов XXI МНТК, Екатеринбург, 6–7 апреля 2023 г. Екатеринбург: Уральский государственный горный университет, 2023. С. 305–308. EDN HKHMAU.

9. Анастасьев А.В., Михайлов А.Н. Синтез структуры технологического процесса обеспечения постоянства условий резания при отделочной обработке лопаток ГТД // Наука, инновации и технологии: от идей к внедрению: Материалы ВНИК молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 г. Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. С. 3–5. EDN QJNBRV.

10. Суслов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов // Вестник машиностроения. 2019. № 9. С. 66–71. EDN TDBHLR.

11. Дударев А.С., Баяндин Е.В. Роботизированное шлифование лопаток газотурбинных двигателей // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 4 (360). С. 126–130. DOI 10.33979/2073-7408-2023-360-4-126-130. EDN IVJEKT.

REFERENCES

1. Mubarakshin R.M., Dicul M.D., Nikolaev N.N. Robotic adaptive dimensional polishing of compressor and turbine blades // Aviation engines. 2021, no. 4 (13). pp. 51–62. DOI 10.54349/26586061_2021_4_51. EDN YGFKKK.

2. Makarov V.F. Development of highly efficient technical processes for finishing parts of gas turbine engines

in aviation and ground installations // Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy named after P. A. Solovyov. 2017, no. 1(40), pp. 159–166. EDN YOYBXN.

3. Makarov V.F., Zhukovsky V.A., Bychina E.N. Problems of automation of finishing of complex sculptured surfaces of GTE blades // Proceedings of Tula State University. Technical sciences. 2016, no. 8-2, pp. 52–55. EDN WLXUTT.

4. Mikhailov D.A. Some features of smooth finish curved surfaces of GTE blades made of titanium alloys // Progressive technologies and machine building systems. 2014, no. 3(49), pp. 120–127. EDN TPNXPT.

5. Mikhailov A.N., Anastasiev A.V., Pichko N.S. Ensuring the constant contact load when polishing a complex profile of the GTE turbine blade flade // Progressive technologies and machine building systems. 2023. No. 2 (81). pp. 26–34. EDN ZDUZXB.

6. Mikhailov A.N., Anastasiev A.V., Pichko N.S. Experimental confirmation of the adequacy of the use of the Hertz contact lens in determining the contact spot of a polishing wheel // High technologies in mechanical engineering: Proceedings of the XX All-Russian Scientific and Technical conference with international participation, Samara, November 09-10, 2023. Samara: Samara State Technical University, 2023, pp. 84–88. EDN RADZUU.

7. Pisarenko G.S., Yakovlev A.P., Matveev V.V. Handbook of resistance materials / 2nd ed., reprint. and add. Kiev: Nauk. Dumka, 1988, 736 p. ISBN 5-12-000299-4.

8. Mikhailov A.N., Anastasiev A.V., Pichko N.S. Construction of a simplified profile of a turbine blade // Technological equipment for the mining and oil and gas industry: Proceedings of the XXI ISTC, Yekaterinburg, April 6-7, 2023 Yekaterinburg: Ural State Mining University, 2023, pp. 305–308. EDN HKHMAU.

9. Anastasiev A.V., Mikhailov A.N. Synthesis of the structure of the technological process for ensuring the constancy of cutting conditions under GTE blades finishing // Science, innovations and technologies: from ideas to implementation: Proceedings of SPC of young scientists, Komsomolsk-on-Amur, November 16-17, 2023 Komsomolsk-on-Amur State University, 2023. pp. 3–5. UHT YOTIKM.

10. Suslov A.G., Fedonin O.N., Medvedev D.M. Designing functionally oriented technological processes // Vestnik mashinostroeniya, 2019, no. 9, pp. 66–71. EDN TDBHLR.

11. Dudarev A.S., Bayandin E.V. Robotic grinding of blades of gas turbine engines // Fundamental and applied problems of engineering and technology. 2023, no. 4 (360), pp. 126–130. DOI 10.33979/2073-7408-2023-360-4-126-130.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article. The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 16.06.2024; одобрена после рецензирования 02.07.2024; принята к публикации 09.07.2024.

The article was submitted 16.06.2024; approved after reviewing 02.07.2024; assepted for publication 09.07.2024.