

УДК 621.923.7

- Ефанов В. С.** ведущий инженер УГМет АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: vsyefanov@gmail.com
- Овчинников А. В.** д-р техн. наук, проф. каф. ОТСП Запорожского национального технического университета, Запорожье, Украина, e-mail: iaov@rambler.ru
- Петрик И. А.** канд. техн. наук, главный сварщик АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com
- Мыленко А. А.** начальник бюро ЭФМО АО «Мотор Сич», Запорожье, Украина, e-mail: motor@motorsich.com

СНИЖЕНИЕ ШЕРОХОВАТОСТИ МНОГОСЛОЙНЫХ ЖАРОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ НА ПРОТОЧНЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ ЛОПАТОК ГТД

Цель работы. Снижение шероховатости ионно-плазменных покрытий методом виброполировки с сохранением равномерности толщины покрытия на проточных поверхностях лопатки.

Методы исследования. Проведены металлографические исследования влияния виброполировки на состояние покрытия в различных зонах пера лопатки. С помощью растровой электронной микроскопии проведена оценка влияния продолжительности обработки на степень шероховатости поверхности покрытия, а также проведена оценка эффективности применения различных защитных экранов и оснастки для сохранения геометрии профиля лопатки.

Полученные результаты. Разработана и применена специализированная защитная оснастка, обеспечивающая надежную защиту елочного хвостовика лопатки в процессе обработки виброполировкой. Проведена оценка влияния различных абразивных тел на степень обработки. Улучшена шероховатость ионно-плазменных покрытий с Δ6 до Δ8 класса методом виброполировки с сохранением равномерности толщины покрытия на проточных поверхностях лопатки. Потеря толщины покрытия на всех обрабатываемых участках составила менее 10...20%.

Научная новизна. В процессе исследования определено влияние формы и величины абразивных тел на степень обработки поверхности рабочих лопаток ТК. Определено влияние оснастки на области обработки проточных поверхностей лопатки.

Практическая ценность. Существенно снижена шероховатость поверхности ионно-плазменных покрытий с Δ6 до Δ8, что может способствовать улучшению параметров работы двигателя. Применение разработанной защитной оснастки и подбор абразивных тел обеспечили равномерное обрабатывание входной, выходной кромок пера лопатки без повреждения на них покрытия. Обеспечена надежная защита елочного профиля замка от воздействия абразивных тел при виброполировке. Подобраны оптимальные режимы установки и углы набегания абразивного потока, обеспечивающие максимальную эффективность обработки.

Ключевые слова: турбина; лопатка рабочая; ионно-плазменные покрытия; шероховатость; механическая обработка; виброполировка; капельная фаза.

ВВЕДЕНИЕ

Уменьшение удельного расхода топлива и одновременно растущая надежность газотурбинных двигателей (ГТД) являются ключевыми и приоритетными направлениями развития современного авиационного двигателестроения.

Традиционно используемые на сегодняшний день методики проектирования не учитывают влияние шероховатости на параметры двигателя в целом, так как расчет ведется для «идеально» гладких проточных частей. Вместе с тем шероховатость турбинных лопаток оказывает существенное влияние на аэродинамическую эффективность и тепловую нагрузку лопаток. Потенциально потери кинетической энергии за счет ше-

роховатости могут увеличиться в 4 раза, а коэффициент теплоотдачи к профилю до 2,5 раз [1].

Поэтому, на данный момент, при проектировании и изготовлении лопаток турбин перспективных газотурбинных двигателей значительная роль отведена минимизации шероховатости поверхности лопаток.

Применение жаростойких покрытий на лопатках турбины, на основе никелевого сплава, помогает защитить поверхность от высокотемпературной коррозии и разупрочнения, в результате воздействия высоких температур на лопатки, и увеличивает их ресурс работы [2]. На переходных режимах работы двигателя жаростойкое покрытие выравнивает температуру поверхности лопаток и понижает термические напряжения в них.

Для нанесения жаростойких никелевых и алюминиевых покрытий на лопатки турбин широко применяется метод вакуумной плазменной технологии высоких энергий (ВПТВЭ).

Нанесение жаростойких покрытий данным методом позволяет получить низкую шероховатость ($Ra = 1,5...3$, Ra – обозначает значение исследуемого профиля с возможным отклонением (среднеарифметическим) и измеряется в мкм) поверхности и высокую стойкость к циклическим нагрузкам.

Это связано с тем, что основными продуктами эрозии катода вакуумной дуги с катодным пятном при осаждении ионно-плазменных покрытий являются ионы и частицы микронных и субмикронных размеров, а так же капли и твёрдые осколки катодного материала. Данный унос катодного материала в виде макрочастиц и их совокупность в общем плазменном потоке называется «капельной фазой» эрозии катода и не превышает 10 % от перенесенного материала. Размер макрочастиц не превышает 10...80 мкм при использовании литых катодов [3].

Капельная фаза, осаждающаяся на поверхности пера лопатки, имеет среднюю шероховатость покрытия до $\Delta 6... \Delta 5$ ($Ra 1,5...3$), снижая в свою очередь производительность газотурбинных двигателей.

Наиболее эффективным является удаление «капельной фазы» с поверхности покрытия механическим способом. Для решения данной проблемы широко применяются различные методы виброполировки.

1 АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ И ПУБЛИКАЦИЙ

В серийном производстве наиболее широкое распространение для снижения шероховатости поверхности получили методы химического и механического полирования поверхности.

Химический метод полирования жаростойких покрытий, на проточных частях турбинных лопаток, имеющих многочисленные криволинейные поверхности и охлаждающие каналы с перфорационными отверстиями, трудно применим. Так как большинство лопаток требует защиты не покрываемых окончательно обработанных частей лопатки, а именно елочного хвостовика и ножи, что требует изготовления герметичной оснастки.

Метод виброполировки обеспечивает обработку только наружных частей лопаток без повреждения охлаждающих каналов и имеет возможность защиты окончательно обработанных зон с помощью применения защитной оснастки. К недостаткам метода можно отнести необходимость индивидуального подбора абразивных тел, композита и времени обработки, зависящих от гео-

метрии и материала обрабатываемого изделия.

2 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Улучшение шероховатости ионно-плазменных покрытий не ниже $\Delta 8$ ($Ra 0,4$) методом виброполировки с сохранением равномерности толщины покрытия по перу лопатки.

3 ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Для отработки технологии по повышению класса шероховатости пера лопатки были выбраны образцы рабочих лопаток ТК (ТК – турбина компрессора) из сплава ЖС32-ВИ, с покрытием ГЦП+СДП-2 (ГЦП – газоциркуляционное покрытие системы Ст-А1, СДП-2 – жаростойкий сплав системы Ni-Cr-Al-Y). Выполнен замер фактической шероховатости Ra до обработки абразивными телами, результаты замера представлены в таблице 1.

Таблица 1. Исходная шероховатость (Ra) лопаток с покрытием СДП-2

Образец №	1	2	3
Спинка пера лопатки	1,33...3,0	1,2...2,87	1,26...2,73
Корыто пера лопатки	1,42...2,98	1,68...2,78	1,85...2,65
Радиус входной кромки	1,1...2,3	1,3...2,5	1,4...2,3
Радиус выходной кромки	0,93...2,41	1,4...2,37	1,25...2,15
Полка хвостовика	1,36...3,5	1,47...3,2	1,43...2,86

Для определения состояния слоя покрытия на проточных поверхностях лопатки, проведен предварительный замер толщины покрытия на пере, корыте, радиусах переходов от пера к полкам, входной и выходной кромках пера лопатки до обработки (табл. 2). Замер толщины защитного покрытия ГЦП+СДП-2 и слоя СДП-2 на поверхности лопатки проводился на шлифах, изготовленных в трех сечениях (рис. 1).

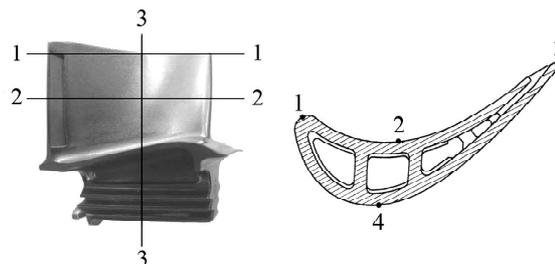


Рисунок 1. Места замеров толщины покрытия

Таблица 2. Исходная толщина слоя покрытия, МКМ

Образец №	1	2	3
Спинка/ корыто пера	68...80	64...74	68...78
Полка хвостовика	45...50	43...47	43...48

Лопатки обрабатывались на установках фирмы ROSLER с вращением рабочих тел вокруг центральной вертикальной неподвижной оси барабана (рис. 2).



Рисунок 2. Внешний вид установки ROSLER для виброполировки

Данная установка обеспечивает равномерное движение абразивных тел по спирали вокруг неподвижной центральной части установки.

На первом этапе исследования лопатки-образцы поместили в оснастку (рис. 3), обеспечивающую защиту елочного профиля от воздействия абразивных тел.



Рисунок 3. Лопатка с оснасткой для защиты елочного профиля от обработки

Лопатки поместили в камеру. Однако, из-за достаточно большой массы лопаток с оснасткой процесс обработки не прошёл, т. к. лопатки оставались неподвижными на дне камеры, а силы потока абразивных частиц не хватало для их перемещения по ее объему.

Исходя из полученного результата, принято решение о закреплении лопаток с оснасткой в центральной части абразивного потока, путем закрепления к оси камеры, это решение позволило абразивному потоку во время работы свободно набегать на обрабатываемые поверхности лопатки и производить их обработку.

Получив положительный результат от закрепления оснастки, осуществлен подбор абразивных тел различной геометрической формы и размеров с целью определения возможной максимально эффективной и равномерной обработки поверхности покрытия (рис. 4).

Наибольшую эффективность при обработке показали абразивные тела усеченной цилиндрической формы, они позволили получать обработку поверхностей, расположенных под различным углом к потоку, в то время как сферические и другие обрабатывали в основном поверхности, расположенные перпендикулярно потоку.

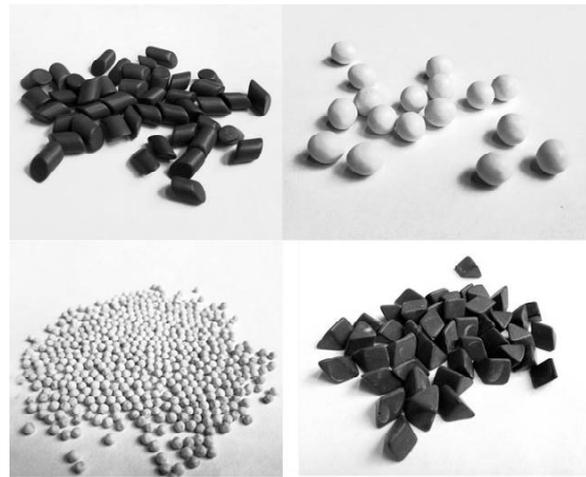


Рисунок 4. Внешний вид используемых абразивных тел для обработки лопаток-образцов

Основываясь на полученных данных по закреплению лопаток в объеме камеры и подбору абразивных тел, произведена обработка первых образцов-лопаток №1 и №2.

Результатом такой обработки стал износ защитного слоя покрытия и повреждение геометрии профиля пера лопатки на входной, выходной кромках и торце пера лопатки. Потеря геометрии произошла из-за более интенсивного воздействия абразивных тел на данные части лопатки (рис. 5).

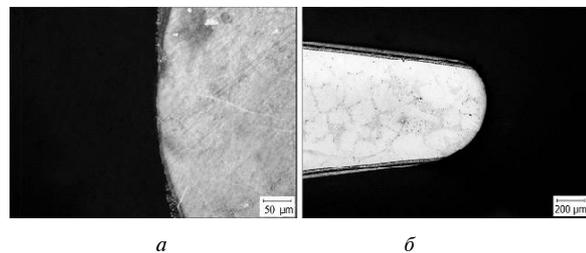


Рисунок 5. Микрошлиф покрытия на лопатке ТК после обработки виброполировкой: *a* – входная кромка, *б* – выходная кромка

Однако, на остальных частях профиля лопатки покрытие сохранилось, а его шероховатость снизилась до Ra 0,6...1,6.

Полученный результат позволил спроектировать новую оснастку, обеспечивающую защиту не только елочного профиля, но и входной и выходной кромки, а также кромки торца пера лопатки (рис. 6).

Учитывая разбег по шероховатости, принято решение в процессе обработки переворачивать лопатки-образцы на 180°, что позволило более равномерно обрабатывать спинку и корыто лопатки.

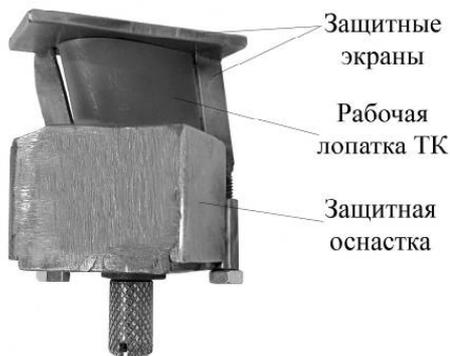


Рисунок 6. Лопатка с оснасткой для защиты замка, торца, входной и выходной кромки

Для обработки лопаток-образцов 3 и 4 использовались абразивные тела RMBD – 0,4/0,5 и компаунд ZF – 113–25/50, общее время обработки составило 5 часов.

Лопатки №4, №5 и №6 были установлены под ~45° к горизонтали корытом вверх – обработка 1,5 часа. Затем ~45° к горизонтали установлена корытом вниз – обработка 1,5 часа. После визуального осмотра принято решение установить лопатки ~45° к горизонтали корытом вверх – обработка 1,5 часа, так как из-за своей формы и расположения относительно потока корыто лопатки имело менее интенсивную обработку. Геометрия профиля пера лопатки сохранена. Результаты замера шероховатости после обработки представлены в таблице 3.

Таблица 3. Шероховатость (Ra) образцов-лопаток № 4, № 5, № 6 после обработки

Образец №	4	5	6
Спинка пера лопатки	0,54	0,50	0,50
Корыто пера лопатки	0,73	0,76	0,69
Радиус входной кромки	1,40	1,45	1,46
Радиус выходной кромки	1,65	1,99	1,88
Полка хвостовика	0,42	0,44...0,72	0,46

В результате проведенной обработки образцов № 4, № 5 и № 6 выявлено наличие теневых зон обработки. Принято решение дообработки лопаток без защитных экранов входной и выходной кромки.

Лопатка № 4, № 5 и № 6 дополнительно обрабатывались 15 минут под углом ~45° к гори-

зонтالي корытом вверх и 15 минут под углом ~45° к горизонтали корытом вниз. Результаты замера шероховатости представлены в таблице 4.

Таблица 4. Шероховатость (Ra) образцов-лопаток № 4, № 5, № 6 после дополнительной обработки

Образец №	4	5	6
Спинка пера лопатки	0,45...0,55	0,4...0,54	0,39...0,48
Корыто пера лопатки	0,55...0,67	0,45...0,60	0,46...0,54
Радиус входной кромки	0,64...0,67	0,65...0,72	0,64...0,72
Радиус выходной кромки	0,55...0,69	0,58...0,65	0,60...0,69
Полка хвостовика	0,39...0,41	0,37...0,44	0,42...0,49

Внешний вид лопатки ТК до и после обработки представлен на рис. 7.

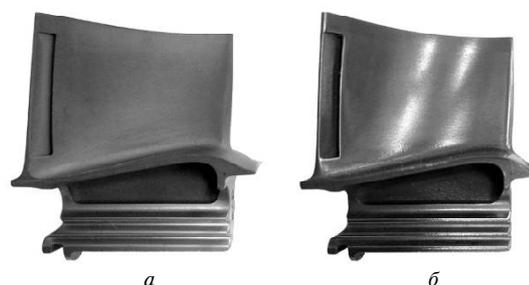


Рисунок 7. Внешний вид рабочей лопатки ТК: а – до обработки, б – после обработки

Представленные результаты замеров шероховатости показывают, что в результате проведенной обработки достигнуто снижение шероховатости покрытия ГЦП+СДП-2 более чем в три раза. Обеспечено равномерное обрабатывание входной и выходной кромок пера лопатки. На рис. 8а представлены фотографии поверхности покрытий, сделанные под электронным микроскопом, на них видно наличие отдельных капель покрытия до обработки, размером 60...70мкм. После обработки виброполированием капли на поверхности покрытия полностью отсутствуют (рис. 8б).

Микроструктурный анализ шлифов покрытий образцов, обработанных виброполированием (рис. 9), установил, что сцепление слоя с поверхностью лопатки достаточно прочное, хорошего качества, без дефектов.

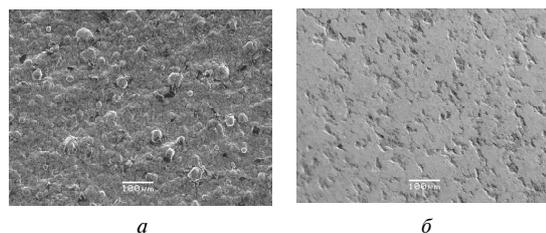


Рисунок 8. Поверхности покрытия: а – до обработки; б – после обработки

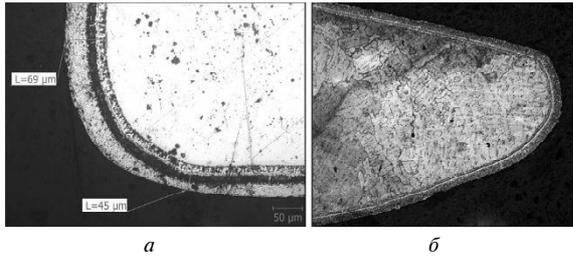


Рисунок 9. Микршлиф покрытия после обработки на установке ROSLER: *а* – входная кромка, *б* – выходная кромка

Металлографическими исследованиями установлено уменьшение толщины слоя покрытия на проточных поверхностях лопатки на 10...20% от исходного значения (см. табл. 5). Обработка всех поверхностей с покрытием, включая входную и выходную кромки, а так же кромки торца пера равномерна.

Таблица 5. Замер толщины покрытия ГЦП+СДП-2 после обработки, мкм

Места замеров	Сечение		
	1-1	2-2	3-3
Спинка/корыто пера лопатки	60...70	64...66	68...80
Радиус входной кромки	74	64	–
Радиус выходной кромки	70	70	–
Полка хвостовика	–	–	40...42

- Єфанов В. С.** провідний інженер УГМет АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: vsyefanov@gmail.com
- Овчинников О. В.** д-р техн. наук, проф. каф. ОТЗВ Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: oaov@rambler.ru
- Петрик І. А.** канд. техн. наук, головний зварювальник АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: tb.ugmet@motorsich.com
- Миленко А. О.** начальник бюро ЕФМО АТ «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, e-mail: motor@motorsich.com

ЗНИЖЕННЯ ШОРСТКОСТІ БАГАТОШАРОВИХ ЖАРОСТІЙКИХ ПОКРИТТІВ НА ПРОТОЧНИХ ПОВЕРХНЯХ ЛОПАТОК ГТД

Мета роботи. Зниження шорсткості іонно-плазмових покриттів методом віброполірування зі збереженням рівномірності товщини покриття на проточних поверхнях лопатки.

Методи дослідження. Проведено металографічні дослідження впливу віброполірування на стан покриття в різних зонах пера лопатки. За допомогою растрової електронної мікроскопії проведено оцінку впливу тривалості обробки на ступінь шорсткості поверхні покриття, також проведена оцінка ефективності застосування різних захисних екранів і оснащення для збереження геометрії профілю лопатки.

Отримані результати. Розроблено та застосовано спеціалізоване захисне оснащення, що забезпечує надійний захист ялинкового хвостовика лопатки в процесі обробки віброполірування. Проведено оцінку впливу різних абразивних тіл на ступінь обробки. Покращена шорсткість іонно-плазмових покриттів з Δ6 до Δ8 класу методом віброполірування зі збереженням рівномірності товщини покриття на проточних поверхнях лопатки. Втрата товщини покриття на всіх оброблюваних ділянках не досягала до 10 ... 20%.

ВЫВОДЫ

Применение метода виброполировки для обработки рабочих лопаток ТК позволило получить положительные результаты по снижению шероховатости на проточных поверхностях лопатки с сохранением равномерности толщины покрытия. При этом шероховатость поверхности улучшилась в 3...4 раза по сравнению с исходной.

За счет применения разработанной защитной оснастки и подбора абразивных тел обеспечено обрабатывание входной, выходной кромок, а так же торцевых поверхностей пера лопатки без повреждения на них покрытия. Обеспечена надежная защита елочного профиля хвостовика от воздействия абразивных тел во время обработки.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- [1]. Иноземцев А. А. Газотурбинные двигатели / Иноземцев А. А., Сандрацкий В. Л. – Пермь : Авиадвигатель, 2006. – 1204 с.
- [2]. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок / Бакулев В. И., Голубев В. А., Крылов Б. А. и др. – М.: Издательство МАИ, 2003. – 688 с.
- [3]. Аксенов И. И. Техника осаждения Вакуумно-дуговых покрытий / Аксенов И. И., Аксенов Д. С., Белоус В. А. – Х.: ННЦ ХФТИ, 2014. – 280 с.

Статья поступила в редакцию 22.02.2018

Наукова новизна. У процесі дослідження визначено вплив форми і величини абразивних тіл на ступінь обробки поверхні робочих лопаток ТК. Визначено вплив оснастки на області обробки проточних поверхонь лопатки.

Практична цінність. Істотно знижена шорсткість поверхні іонно-плазмових покриттів з $\Delta 6$ до $\Delta 8$, що може сприяти поліпшенню параметрів роботи двигуна. Застосування розробленої захисної оснастки і підбір абразивних тіл забезпечили рівномірне оброблення вхідної, вихідної кромки пера лопатки без пошкодження на них покриття. Забезпечено надійний захист ялинкового профілю замку від впливу абразивних тіл при віброполіруванні. Підібрано оптимальні режими установки і кути набігання абразивного потоку, що забезпечують максимальну ефективність обробки.

Ключові слова: турбіна; лопатка робоча; іонно-плазмові покриття; шорсткість; механічна обробка; віброполірування; крапельна фаза.

Yefanov V. S. Senior engineer of Chief Metallurgical Engineer Department, «Motor Sich» JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: vsyefanov@gmail.com

Ovchinnikov A. V. Sci. D., Professor of the «Welding Technology and Equipment» Department; Zaporozhye National Technical University, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: iaov@rambler.ru

Petrik I. A. Candidate of science, Chief Welding Engineer, «Motor Sich» JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: tb.ugmet@motersich.com

Mylenko A. A. Head of the Electrophysical Treatment Bureau, «Motor Sich» JSC, Zaporozhye, Ukraine, e-mail: motor@motersich.com

ROUGHNESS REDUCTION OF MULTILAYER HEAT-RESISTANT COATINGS APPLIED TO THE FLOW SECTIONS OF GTE BLADES

Purpose. Reduction of ionic-plasma coating roughness by vibropolishing without sacrificing coating thickness uniformity on the blade flow sections.

Methodology. Metallographic studies of the effect of vibratory polishing on the state of the coating in various zones of the blade airfoil are carried out. With the help of scanning electron microscopy, the influence of processing time on the degree of roughness of the coating surface was evaluated, and also the efficiency of using various protective screens and tooling for preserving the profile geometry of the blade was evaluated.

Findings. A specialized protective equipment was developed and applied to ensure reliable protection of the fir-tree shank of the blade during its vibropolishing. The effect of various abrasive chips on the degree of treatment was evaluated. The roughness of ion-plasma coatings from $\Delta 6$ to $\Delta 8$ class is improved by the method of vibropolishing with preservation of the uniformity of coating thickness on the flow sections of the blade. The loss of coating thickness in all treated areas was less than 10 to 20 %.

Scientific novelty. During the investigation, the influence of the shape and size of abrasive chips on the degree of surface treatment of the compressor turbine rotor blades was determined. The influence of the tooling on the area of treatment of the flow sections of the blade is determined.

Practical effect. The roughness of the surface of ion-plasma coatings is significantly reduced from $\Delta 6$ to $\Delta 8$ class, which can improve the performance of the engine. The use of the developed protective equipment and the selection of abrasive chips ensured uniform treatment of the leading, trailing edges of the blade without damaging the coating on them. A reliable protection of the fir-tree shank from the impact of abrasive chips during vibropolishing is provided. Optimal settings and abrasive flow angles ensuring maximum treatment efficiency are selected.

Key words: turbine; rotor blade; ion-plasma coatings; roughness; machining; vibropolishing; droplet phase.

REFERENCES

- [1]. Inozemtsev A. A., Sandratskiy V. L. (2006). Gazoturbinnyye dvigateli [Gas turbine engines]. Aviadvigatel, 1204.
- [2]. Bakulev V. I., Golubev V. A., Krylov B. A. (2003). Teoriya, rashchet i proektirovanie

aviatsionnyih dvigateley I energeticheskikh ustanovok. Izdatelstvo MAI, 688.

- [3]. Aksenov I. I., Aksenov D. S., Belous V. A. (2014). Tehnika osazhdeniya vakuumnyih pokrytiy. NNTS HFTI, 280.