

ИССЛЕДОВАНИЕ ОТДЕЛОЧНОЙ ОБРАБОТКИ ТРАКТОВЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ЛОПАТОК ТУРБОВИНТОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ СВОБОДНЫМ АБРАЗИВОМ С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭФФЕКТА КАВИТАЦИИ

А.С. Асаев¹

asaev_a_s@mail.ru

П.А. Дроздов²

Droz dov-PA@pmz.ru

И.В. Ситников²

sitnikov-iv@pmz.ru

А.В. Иванайский¹

iva_vlad@mail.ru

Н.В. Аверин¹

n.averin@365.rsu.edu.ru

¹ РГУ имени С.А. Есенина, г. Рязань, Российская Федерация

² АО «ОДК-Пермские моторы», г. Пермь, Российская Федерация

Аннотация

В настоящее время одной из актуальных задач машиностроения является повышение производительности и стабилизация параметров качества при реализации процессов отделочной обработки поверхности деталей летательных аппаратов из материалов с особыми физико-механическими свойствами, в том числе имеющих сложную пространственную геометрию. К таким деталям относятся рабочие лопатки турбовинтовых двигателей, при отделочной обработке которых возникают дефекты теплозащитного покрытия, влияющие на эксплуатационные свойства летательного аппарата. Рабочие лопатки турбовинтовых двигателей имеют сложный профиль поверхности, что затрудняет их абразивную обработку инструментом на жесткой или гибкой связке, поэтому рассматривается процесс отделочной обработки свободным абразивом. Выполнено исследование процесса отделочной обработки свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации трактовых поверхностей рабочих лопаток турбовинтовых двигателей после нанесения теплозащитного покрытия. Применение гидродинамических процессов, возникающих в условиях кавитации, способно обеспечить интенсификацию абразивной обработки и отсутствие теплонпряженности, а также минимизировать уровень ударных нагрузок. Полученные результаты отделочной обработки свободным абразивом указывают на воз-

Ключевые слова

Отделочная обработка, кавитация, рабочие лопатки, турбовинтовой двигатель, свободный абразив

Работа выполнена при финансовой поддержке Фонда содействия инновациям и Правительства Пермского края

Введение. В целях обеспечения требований конструкторской документации по шероховатости поверхности после нанесения теплозащитного покрытия (ТЗП) финишную обработку тракторных поверхностей рабочих лопаток (РЛ) турбовинтовых двигателей (ТВД) в условиях АО «ОДК-Пермские моторы» осуществляют посредством виброабразивной галтовки [1]. При обработке сложных криволинейных поверхностей этот процесс является трудоемким и не гарантирует стабильного достижения качества поверхности в труднодоступных участках профиля [2]. Кроме того, процесс виброабразивной галтовки сопровождается микроударами, а следовательно, развитием трещин в ТЗП [3].

Возможным путем повышения эффективности финишной обработки тракторных поверхностей РЛ ТВД, в том числе с керамическим ТПЗ, является применение методов, основанных на активации свободного абразива с помощью эффекта кавитации. Кавитация представляет собой средство локальной концентрации энергии за счет гидродинамических процессов, сопровождающих пульсации и схлопывание каверн [4].

До 1940-х годов кавитация рассматривалась только как вредное явление, сопровождаемое шумом, вибрацией, эрозией, падением производительности насосов и несущей способности гребных винтов. В качестве расчетных зависимостей для объяснения эффекта кавитации использовали разработанные ранее методы теории струи идеальной жидкости Кирхгофа, Гельмгольца, Вагнера, Н.Е. Жуковского, С.А. Чаплыгина, М.А. Лаврентьева, Л.И. Седова [5, 6].

Причинами возникновения дефектов при абразивной обработке РЛ ТВД являются:

- совокупность физико-механических свойств ТЗП, в том числе низкий коэффициент теплопроводности, высокая твердость и низкий предел прочности на растяжение ТПЗ;
- малая пластичность деформаций в зоне обработки;
- отсутствие универсального (гибкого) инструмента, позволяющего обрабатывать труднодоступные внутренние поверхности, внутренние поверхности сложной формы, тонкие отверстия и другие сложные пространственные формы РЛ ТВД [7].

Цель настоящей работы — определение и исследование взаимосвязей параметров качества поверхности РЛ ТВД с режимами их отделочной обработки свободным абразивом с применением эффекта вихревой кавитации.

Материалы и методы решения задач, принятые допущения. Сущность предлагаемого процесса отделочной обработки заключается в использовании гидродинамических условий кавитирующей гетерогенной среды для обеспечения равномерного абразивного износа помещенных в нее РЛ ТВД. Работа устройства в кавитационном режиме гарантирует отсутствие образования тороидально-винтовых потоков в жидкой гетерогенной среде (воронок) и центробежной сепарации абразивных частиц во всем объеме технологического устройства [8].



Рис. 1. Роторы устройства

В качестве вихреобразователя для обеспечения кавитации использовалось устройство, снабженное четырьмя проточными роторами (рис. 1). Конструкция ротора позволяет с большой эффективностью преобразовать механическую энергию в энергию движения несущей среды. Вихревая кавитация может возникать не только на поверхности или вблизи тела, но и на границе зоны отрыва потока [9].

Конструкция роторов, приведенных на рис. 1, является объектом ин-

теллектуальной собственности авторов настоящей статьи.

Принцип работы устройства (рис. 2) заключается в обеспечении равномерной абразивной отделочной (финишной) обработки деталей за счет их абразивного изнашивания. Продуцирование эффекта вихревой кавитации в устройстве позволяет создать равномерные нестационарные течения жидкой гетерогенной среды, обеспечивающие взаимное движение и столкновение абразивных частиц с вращающейся деталью [10].

В процессе обработки РЛ ТВД устанавливают на съемный стол. В качестве рабочей технологической среды используется гетерогенная среда следующего состава:

– жидкая несущая среда (вода с добавлением ПАВ, пеногасителя, лимонной кислоты и флотореагентов), занимает 40 % объема свободного пространства корпуса устройства;

– смесь абразивных порошков (карбида кремния (зеленого), синтетического алмаза (АСМ), керамического триангла) занимает 60 % объема свободного пространства корпуса устройства [11, 12].



Рис. 2. Модель устройства

После установки, закрепления лопаток и заполнения рабочей технологической средой устройство герметично закрывается. Состав смеси абразивных частиц, время обработки, скорости вращения роторов определяются на основе теоретической зависимости из [13].

Благодаря возможности удалить рабочую технологическую среду из устройства без съема лопаток можно реализовать многопереходные процессы, для которых необходима последовательная смена размера абразивных частиц с предварительной промывкой рабочего объема корпуса устройства.

Модель реализуемого процесса отделочной обработки РЛ ТВД имеет ряд технологических преимуществ, например, отсутствуют вибрации и жесткий контакт инструмента с обрабатываемой деталью, уменьшается влияние температурных факторов. Если учитывать скорости перемещения абразивного зерна и одновременных процессов обработки всей поверхности детали, то разрабатываемый метод можно считать перспективным и высокопроизводительным при реализации процесса отделочной обработки [14].

Зная давление насыщенного пара дистиллированной воды при нормальных условиях, с помощью программного комплекса PTC Mathcad можно определить и скорректировать частоту вращения роторов, чтобы обеспечить возникновение вихревой кавитации, составляющей не менее 13 тыс. об/мин [15]. Моделирование геометрических параметров зон возникновения кавитации в рабочей технологической среде (рис. 3) позволяет визуализировать гидродинамические процессы и обеспечить наличие таких зон в области расположения обрабатываемых деталей.

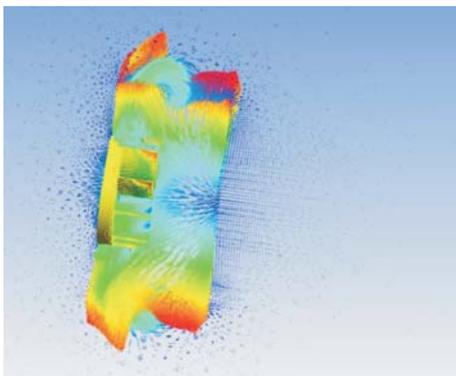


Рис. 3. Моделирование кавитационных зон в программном комплексе ANSYS

немых в промышленности для ручного (мокрого) полирования и тонкой доводки [17].

Следует учитывать, что наличие процесса кавитации ускоряет протекающие в рабочей технологической среде химические процессы [18]. Концентрацию химически активных элементов раствора жидкой составляющей рабочей технологической среды следует уменьшить по отношению к классически рекомендуемым пропорциям [19].

Рабочая технологическая среда подбирается на основе существующих сочетаний, применяемых в промышленности для ручного полирования с учетом выбора жидких сред, имеющих меньшую вязкость и большее давление насыщенных паров, так как она при прочих равных условиях имеет большую динамику вихревых течений [20, 21].

Результаты. Проведенные эксперименты по определению оптимальной концентрации, исходя из условий обеспечения производительности и минимального расхода абразива, показывают, что при обработке поверхностей РЛ ТВД наиболее целесообразным представляется использование карбида кремния SiC (зеленого) в смеси с АСМ-порошком и оксидом церия (полиритом оптическим). Этот прием позволяет сократить использование дорогостоящего алмазного абразива, получить поверхности с более низкими параметрами шероховатости при незначительном увеличении времени обработки.

Абразивные зерна SiC 53С F60 после 120 мин работы показаны на рис. 4. На основе визуального анализа геометрии зерен при различных периодах их работы сделано заключение о периоде эффективной режущей способности абразива, которое коррелируется с изменением параметров

Необходимо отметить низкую теплонапряженность процесса обработки, а также тот факт, что жидкость, несущая абразивные частицы, способна полностью повторять сложные внутренние поверхности обрабатываемой детали благодаря физическим процессам смачивания и поверхностного натяжения [16].

В качестве абразивных частиц для реализации процесса финишной обработки внутренних поверхностей предложено использовать марки и фракции классических материалов, применяемых

качества обработки при их многократном использовании. Стойкость (работоспособность) абразивных зерен и активаторов кавитации (роторов) кавитационной машины составляет 60...300 ч в зависимости от состава абразива и материала ротора.

Режущая способность абразивных зерен SiC 53C F60 значительно снижается после 80 ч работы, что связано с измельчением фракции и приобретением сферической формы абразивными зернами.

Для апробации устройства и технологического процесса выполнена финишная обработка трактовых поверхностей РЛ первой ступени ТВД после нанесения ТЗП. Внешний вид установки и лопаток после обработки приведены на рис. 5. Шероховатость трактовых поверхностей до обработки $Ra = 5,8...6,1$ мкм, после обработки $Ra = 2,7...1,1$ мкм. По сравнению с кавитационной обработкой шероховатость Ra трактовых поверхностей при вибрационной галтовке варьируется в пределах 2,9...3,2 мкм.

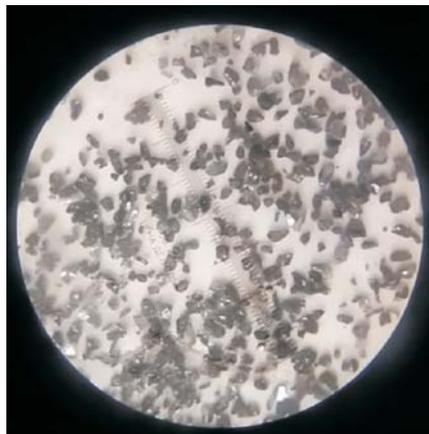


Рис. 4. Абразивные зерна SiC 53C F60 после 120 мин работы ($\times 24$)



a



б

Рис. 5. Установка для кавитационной обработки (*a*) и РЛ ТВД после кавитационной обработки (*б*)

В результате анализа поверхности лопаток после обработки (рис. 5, *б*) выявлено следующее. Поверхность керамического покрытия гладкая, трещин, отслаиваний, сколов покрытия не наблюдается. Угловые участки полки со стороны спинки (рис. *б*) заполированы до металлического блеска (*a*), с появлением множественных хаотично расположенных рисок (*б*).

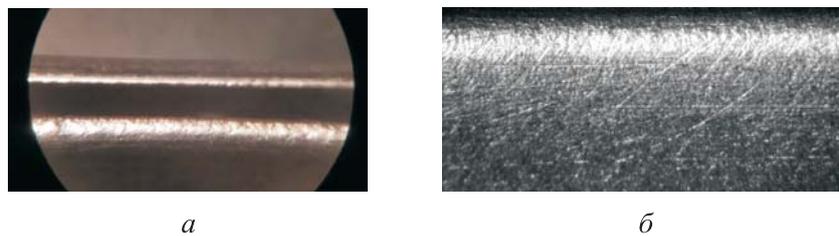


Рис. 6. Фрагмент заполированной поверхности (*а*) со стороны спинки на выходной кромке с хаотично расположенными рисками (*б*) ($\times 40$)

Охлаждающие отверстия на пере лопатки не запылены, по краям отверстий наблюдается ореол с менее гладкой поверхностью по сравнению с остальной поверхностью, ТЗП в отверстиях имеет большую шероховатость, чем на внешней поверхности.

По местам полировки поверхности до металлического блеска на выходной кромке наблюдается утонение слоя керамического покрытия и металлического подслоя до нуля, а также сглаживание поверхности покрытия.

Определена равномерность абразивной обработки с помощью наложения сканированных моделей лопаток до и после обработки. Визуализация результатов лазерного сканирования приведена на рис. 7. Среднее арифметическое значение съема материала ТЗП с поверхности РЛ ТВД составляет 0,03 мм за 30 мин отделочной обработки.

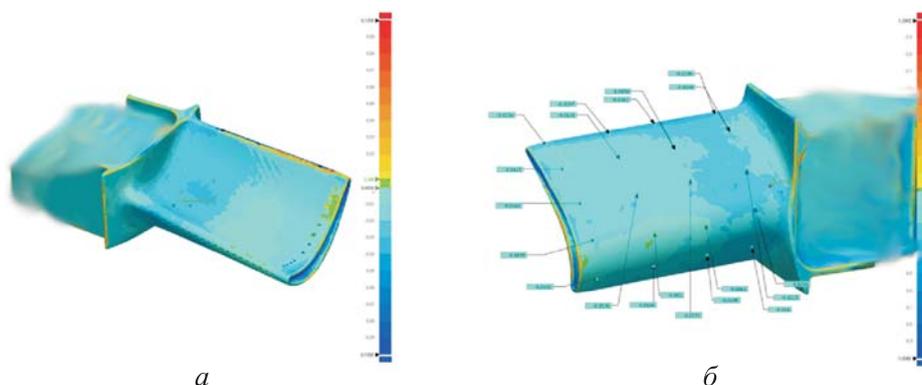


Рис. 7. Наложение сканированных моделей до (*а*) и после (*б*) обработки

Обсуждение полученных результатов. Отделочная обработка РЛ ТВД свободным абразивом с применением эффекта кавитации способна обеспечить требования конструкторской документации по качеству обрабатываемой поверхности, включая требования по шероховатости, размерной точности, допуску формы и расположению поверхностей.

Модель реализуемого процесса отделочной обработки РЛ ТВД имеет ряд технологических преимуществ: отсутствие вибраций, отсутствие жесткого контакта инструмента и обрабатываемой детали, снижение влияния температурных факторов и др. Учитывая производительность, стабильность и равномерность обработки всей поверхности лопатки, достигаемые при использовании предлагаемого метода, (по сравнению с применяемыми в настоящее время в АО «ОДК-Пермские моторы»), можно считать разрабатываемый метод перспективным и высокопроизводительным при реализации процесса отделочной обработки ТЗП РЛ ТВД.

Заключение. Применение технологии отделочной обработки РЛ ТВД свободным абразивом с использованием эффекта вихревой кавитации способно решить широкий спектр технологических проблем, связанных с качеством отделочной обработки труднодоступного профиля внешних поверхностей и тонких отверстий РЛ ТВД, выполненных из материалов с особыми физико-механическими свойствами. По отношению к применяемым в настоящее время методам предлагаемый метод отделочной обработки РЛ ТВД имеет следующие преимущества.

Отсутствуют динамические и ударные нагрузки, поскольку практически не происходит жесткого контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Значительно снижается теплонапряженность процесса абразивной обработки, сохраняются физико-механические свойства материалов и ТЗП РЛ ТВД в связи с полным погружением детали в активированную рабочую технологическую среду.

Эффективное использование широкого ряда режущих порошков различного состава и зернистости позволяет обеспечить многопереходный процесс обработки с последовательным снижением зернистости абразивов. В частности, появляется возможность рационального применения алмазных порошков для обработки керамических и металлокерамических покрытий.

Многократное использование и регенерация абразивного материала делает экономически эффективным применение сверхтвердых абразивов, таких как алмаз и синтетический кубический нитрида бора.

Благодарности

Коллектив авторов выражает благодарность руководству АО «ОДК-Пермские моторы», РГУ имени С.А. Есенина и ООО «Кавитационные машины» за предоставление материалов и технической базы для проведения исследования.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ситников И.В., Максимов Д.А., Батраков В.Н. и др. Разработка жаростойкого термобарьерного покрытия для деталей газотурбинных двигателей и газотурбинных установок. *Вестник ПНИПУ. Аэрокосмическая техника*, 2022, № 68, с. 5–10. DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2022.68.01>
- [2] Асаев А.С. Разработка метода финишной обработки деталей машин свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации. Автореф. дис. ... канд. техн. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016.
- [3] Иванайский А.В., Асаев А.С., Мурог И.А. Финишная обработка линз и изделий из керамики свободным абразивом с применением эффекта кавитации. *МИКМУС*. М., ИМАШ РАН, 2020, с. 225–228. EDN: ZGKIAM
- [4] Кнепп Р., Дейли Дж., Хеммит Ф. Кавитация. М., Мир, 1974.
- [5] Федоткин И.М., Гулый И.С. Кавитация. Ч.1. Теория, расчеты и конструкции кавитационных аппаратов. Киев, Полиграфкнига, 1997.
- [6] Радзюк А.Ю., Истягина Е.Б., Кулагина Л.В. и др. Современное состояние использования кавитационных технологий. *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*, 2022, т. 333, № 9, с. 209–218. DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3623>
- [7] Клауч Д.Н., Овсеенко А.Н., Овумян Г.Г. и др. Технологические методы повышения качества изготовления и ресурса работы турбинных лопаток. *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова*, 2008, № 4, с. 49–53. EDN: JVCWUP
- [8] Иванайский А.В., Асаева Т.А., Асаев А.С. Технологический процесс финишной обработки деталей машин свободным абразивом с применением эффекта присоединенной кавитации. *Технология машиностроения*, 2016, № 5, с. 39–41. EDN: WZXPCN
- [9] Asaev A.S., Frolova S.V., Glazunov M.S., et al. Finishing products from synthetic sapphire with the application of the vortex cavitation effect. *AIP Conf. Proc.*, 2023, vol. 2700, no. 1, art. 020001. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0137345>
- [10] Асаева Т.А., Иванайский А.В., Асаев А.С. К вопросу о динамических процессах в кавитационных машинах. *Комплексные проблемы развития науки, образования и экономики региона*, 2016, № 1, с. 32–39. EDN: YQQQBB
- [11] Тушинский Л.И. Механические свойства наноструктурных материалов. *Технология металлов*, 2009, № 2, с. 26–32.
- [12] Суслов А.Г., Федонин О.Н., Медведев Д.М. Проектирование функционально ориентированных технологических процессов. *Вестник машиностроения*, 2019, № 9, с. 66–71. EDN: TDBHLR
- [13] Averin N.V., Posalina A.E., Atamanov S.A., et al. Investigation of the effectiveness of the method of finishing the inner cylindrical surfaces of machine parts with a free abrasive using the effect of vibration cavitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1889, art. 042062. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042062>

[14] Асаев А.С., Иванайский А.В., Мурог И.А. Устройство для отделочной обработки. Патент РФ 210921. Заявл. 10.12.2021, опубл. 13.05.2022.

[15] Иванайский А.В., Асаев А.С., Асаева Т.А. Теоретические основы моделирования вихревой и присоединенной кавитации в технологическом оборудовании. *Технология машиностроения*, 2020, № 7, с. 46–51. EDN: EGSXOY

[16] Асаев А.С., Иванайский А.В., Асаева Т.А. Особенности технологического процесса финишной обработки и отчистки деталей машин сложной формы с применением эффекта присоединенной кавитации. *Современные тенденции в фундаментальных и прикладных исследованиях. Сб. матер. Междунар. науч.-практ. конф.* Рязань, Центр фундаментальных и прикладных исследований, 2015, с. 27–32. EDN: TTVWZN

[17] Krueger T.M. Micro finishing machine improves part geometry. *Amer. Mach.*, 1993, no. 9, pp. 70–71.

[18] Аверина Ю.М., Моисеева Н.А., Нырклов Н.П. и др. Свойства и эффекты кавитации. *Успехи в химии и химической технологии*, 2018, т. 32, № 14, с. 37–39. EDN: UCDBA

[19] Асаев А.С., Иванайский А.В., Аверин Н.В. и др. Исследование процесса отделочной абразивной обработки внутренних поверхностей с применением эффекта вибрационной кавитации. *Вестник РГАТА им. П.А. Соловьева*, 2021, № 4, с. 57–62. EDN: BWSHWP

[20] Иванайский А.В., Асаев А.С., Асаева Т.А. Технология финишной обработки внутренних поверхностей деталей машин свободным абразивом с применением низкочастотной вибрационной кавитации. *Технология машиностроения*, 2022, № 8, с. 11–13. EDN: DAJGTF

[21] Ганиев Р.Ф., Лакиза В.Д., Цапенко А.С. О явлениях вибрационного перемешивания и образования периодических структур в условиях, близких к невесомости. *Механика твердого тела*, 1977, № 2, с. 56–59.

Асаев Александр Семенович — канд. техн. наук, начальник управления научной и инновационной деятельности РГУ имени С.А. Есенина (Российская Федерация, 390000, г. Рязань, ул. Свободы, д. 46).

Дроздов Павел Алексеевич — заместитель главного сварщика отдела главного сварщика АО «ОДК-Пермские моторы» (Российская Федерация, 614010, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 9).

Ситников Илья Владимирович — ведущий инженер-технолог технологического бюро напыления покрытий АО «ОДК-Пермские моторы» (Российская Федерация, 614010, г. Пермь, Комсомольский пр-т, д. 9).

Иванайский Алексей Васильевич — д-р техн. наук, профессор Института физико-математических и компьютерных наук РГУ имени С.А. Есенина (Российская Федерация, 390000, г. Рязань, ул. Свободы, д. 46).

Аверин Николай Витальевич — начальник отдела инновационной деятельности и наукометрии управления научной и инновационной деятельности РГУ имени С.А. Есенина (Российская Федерация, 390000, г. Рязань, ул. Свободы, д. 46).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Асаев А.С., Дроздов П.А., Ситников И.В. и др. Исследование отделочной обработки трактовых поверхностей лопаток турбовинтовых двигателей свободным абразивом с применением эффекта кавитации. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение*, 2024, № 4 (151), с. 68–81. EDN: XZTXNX

FINISHING THE TRACT SURFACES OF THE TURBOPROP ENGINE BLADING WITH A FREE ABRASIVE AND USING THE CAVITATION EFFECT

A.S. Asaev¹

P.A. Drozdov²

I.V. Sitnikov²

A.V. Ivanayskiy¹

N.V. Averin¹

asaev_a_s@mail.ru

Drozdov-PA@pmz.ru

sitnikov-iv@pmz.ru

iva_vlad@mail.ru

n.averin@365.rsu.edu.ru

¹ RSU named for S. Yesenin, Ryazan, Russian Federation

² JSC “UEC-Perm Motors”, Perm, Russian Federation

Abstract

As of today, one of the urgent tasks in mechanical engineering lies in increasing productivity and stabilizing quality parameters in implementation of the finishing processes with surfaces of the aircraft parts made of materials with specific physical and mechanical properties, including those with the complex spatial geometry. Such parts include the turboprop engine blading, which finishing causes defects in the heat-protective coating affecting the aircraft operation characteristics. Turboprop engine blading has a complex surface profile, which complicates its abrasive machining with a tool on a rigid or flexible bond; thus, the process of finishing with a free abrasive is under consideration. The paper presents a study of the finishing process with a free abrasive using the vortex cavitation effect on tract surfaces of the turboprop engine blading after applying the heat-protective coating. The use of hydrodynamic processes occurring under cavitation

Keywords

Finishing, cavitation, rotary blading, turboprop engine, free abrasive

is able to ensure intensification of abrasive machining and the heat stress absence in the process, as well as minimize the impact loads level. The obtained results of finishing with the free abrasive indicate a possibility of their introduction in improving technological processes of the aircraft serial parts production

Received 07.08.2023

Accepted 11.10.2023

© Author(s), 2024

The work was performed with financial support of the Assistance Fund and the Government of the Perm Territory

REFERENCES

- [1] Sitnikov I.V., Maksimov D.A., Batrakov V.N., et al. Development of a heat-resistant thermobarrier coating for parts of gas turbine engines and gas turbine plants. *Vestnik PNIPU. Aerokosmicheskaya tekhnika* [PNRPU Aerospace Engineering Bulletin], 2022, no. 68, pp. 5–10 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.15593/2224-9982/2022.68.01>
- [2] Asaev A.S. Razrabotka metoda finishnoy obrabotki detaley mashin svobodnym abrazivom s primeneniem effekta prisoedinennoy kavitatsii. Avtoref. dis. kand. tekhn. nauk [Development of a method for finishing machine parts with a free abrasive using the effect of attached cavitation. Cand. Sc. (Eng.). Abs. diss.] Moscow, BMSTU, 2016 (in Russ.).
- [3] Ivanayskiy A.V., Asaev A.S., Murog I.A. [Finishing lenses and ceramic products with a free abrasive using the cavitation]. *MIKMUS*. Moscow, IMASh RAS, 2020, pp. 225–228 (in Russ.). EDN: ZGKIAM
- [4] Knapp R.T., Daily J.W., Hammitt F.G. Cavitation. New York, McGraw Hill, 1970.
- [5] Fedotkin I.M., Gulyy I.S. Kavitatsiya. Ch.1. Teoriya, raschety i konstruktsii kavitatsionnykh apparatov [Cavitation. P. 1. Theory, calculations and designs of cavitation apparatuses]. Kiev, Poligrafkniga Publ., 1997.
- [6] Radzyuk A.Yu., Istyagina E.B., Kulagina L.V., et al. Current state of using cavitation technologies (brief overview). *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta. Inzhiniring georesursov* [Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering], 2022, vol. 333, no. 9, pp. 209–218 (in Russ.). DOI: <https://doi.org/10.18799/24131830/2022/9/3623>
- [7] Klauch D.N., Ovseenko A.N., Ovumyan G.G., et al. The technological methods of improving the quality and resources of the turbine buckets. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University], 2008, no. 4, pp. 49–53 (in Russ.). EDN: JVCWUP
- [8] Ivanayskiy A.V., Asaeva T.A., Asaev A.S. The technological process of the machine parts finishing by using a free abrasive with application of the attached cavitation effect. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2016, no. 5, pp. 39–41 (in Russ.). EDN: WZXPCH
- [9] Asaev A.S., Frolova S.V., Glazunov M.S., et al. Finishing products from synthetic sapphire with the application of the vortex cavitation effect. *AIP Conf. Proc.*, 2023, vol. 2700, no. 1, art. 020001. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0137345>

- [10] Asaeva T.A., Ivanayskiy A.V., Asaev A.S. To the question of dynamic processes in cavitation machines. *Kompleksnyye problemy razvitiya nauki, obrazovaniya i ekonomiki regiona*, 2016, no. 1, pp. 32–39 (in Russ.). EDN: YQQQBB
- [11] Tushinskiy L.I. Mechanical properties of nanostructural materials. *Tekhnologiya metallov* [Technology of Metals], 2009, no. 2, pp. 26–32 (in Russ.).
- [12] Suslov A.G., Fedonin O.N., Medvedev D.M. Designing of functionally oriented technological processes. *Vestnik mashinostroeniya*, 2019, no. 9, pp. 66–71 (in Russ.). EDN: TDBHLR
- [13] Averin N.V., Posalina A.E., Atamanov S.A., et al. Investigation of the effectiveness of the method of finishing the inner cylindrical surfaces of machine parts with a free abrasive using the effect of vibration cavitation. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2021, vol. 1889, art. 042062. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1889/4/042062>
- [14] Asaev A.S., Ivanayskiy A.V., Murog I.A. Ustroystvo dlya otdelochnoy obrabotki [Finishing device]. Patent RU 210921. Appl. 10.12.2021, publ. 13.05.2022 (in Russ.).
- [15] Ivanayskiy A.V., Asaev A.S., Asaeva T.A. The theoretical foundations of vortex and associated cavitation modeling in technological equipment. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2020, no. 7, pp. 46–51 (in Russ.). EDN: EGSXOY
- [16] Asaev A.S., Ivanayskiy A.V., Asaeva T.A. [Features of the technological process of finishing and cleaning of machine parts of complex shape using the effect of attached cavitation]. *Sovremennye tendentsii v fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniyakh. Sb. mater. Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.* [Modern Trends in Fundamental and Applied Research. Proc. Int. Sc.-Pract. Conf.]. Ryazan, Tsentr fundamentalnykh i prikladnykh issledovaniy Publ., 2015, pp. 27–32 (in Russ.). EDN: TTVWZN
- [17] Krueger T.M. Micro finishing machine improves part geometry. *Amer. Mach.*, 1993, no. 9, pp. 70–71.
- [18] Averina Yu.M., Moiseeva N.A., Nyrkov N.P., et al. Properties and effects of cavitation. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*, 2018, vol. 32, no. 14, pp. 37–39 (in Russ.). EDN: UCDBA
- [19] Asaev A.S., Ivanayskiy A.V., Averin N.V., et al. Investigation of finish abrasive processing of internal surfaces with the use of vibratory cavitation effect. *Vestnik of P.A. Solovyov RSATA*, 2021, no. 4, pp. 57–62 (in Russ.). EDN: BWSHWP
- [20] Ivanayskiy A.V., Asaev A.S., Asaeva T.A. Technology for finishing the internal surfaces of machine parts with a free abrasive using low-frequency vibration cavitation. *Tekhnologiya mashinostroeniya*, 2022, no. 8, pp. 11–13 (in Russ.). EDN: DAJGTF
- [21] Ganiev R.F., Lakiza V.D., Tsapenko A.S. On the phenomena of vibrational mixing and the formation of periodic structures under conditions close to weightlessness. *Mekhanika tverdogo tela*, 1977, no. 2, pp. 56–59 (in Russ.).

Asaev A.S. — Cand. Sc. (Eng.), Head of the Department of Scientific and Innovative Activities, RSU named for S. Yesenin (Svobody ul. 46, Ryazan, 390000 Russian Federation).

Drozdov P.A. — Deputy Chief Welder, Department of the Chief Welder, JSC “UEC-Perm Motors” (Komsomolskiy prospekt 9, Perm, 614010 Russian Federation).

Sitnikov I.V. — Leading Process Engineer, Technological Bureau of Coating Spraying, JSC “UEC-Perm Motors” (Komsomolskiy prospekt 9, Perm, 614010 Russian Federation).

Ivanayskiy A.V. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Institute of Physical, Mathematical and Computer Science, RSU named for S. Yesenin (Svobody ul. 46, Ryazan, 390000 Russian Federation).

Averin N.V. — Head of the Department of Innovation and Scientometrics, Department of Scientific and Innovation Activities, RSU named for S. Yesenin (Svobody ul. 46, Ryazan, 390000 Russian Federation).

Please cite this article in English as:

Asaev A.S., Drozdov P.A., Sitnikov I.V., et al. Finishing the tract surfaces of the turboprop engine blading with a free abrasive and using the cavitation effect. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University, Series Mechanical Engineering*, 2024, no. 4 (151), pp. 68–81 (in Russ.). EDN: XZTXNX