

УДК 621.793.1

## К ВОПРОСУ О ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК БЛИСКОВ КОМПРЕССОРА ГТД

А. В. Олейник, А. М. Смыслов

tm@usatu.ru

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)

*Поступила в редакцию 24.12.2019*

**Аннотация.** В работе, применительно к лопаткам осевых моноколес из титановых сплавов ВТ6 и ВТ8М-1, рассмотрены вопросы формирования качества поверхностного слоя при их механической и упрочняющей обработке, а также последующем нанесении защитного эрозионностойкого вакуумного ионно-плазменного покрытия. При нанесении покрытия возникает неравномерность обработки ввиду сложной формы изделия. Для ее снижения предполагается осуществлять двухосевое вращение блиска в вакуумном объеме, а подбор траектории движения детали производить методами численного моделирования.

**Ключевые слова:** блиск; осевое моноколесо; ионно-плазменные покрытия; ионная имплантация; численное моделирование; электролитно-плазменное полирование; поверхностно-пластическое деформирование; лопатки компрессора ГТД; поверхностное упрочнение; механическая обработка.

### ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение ресурса и эксплуатационной надежности лопаток блисков является одной из наиболее важных проблем при создании перспективных моделей газотурбинных двигателей (ГТД). Она решается, с одной стороны, путем создания нового конструктивного облика лопаток, а с другой – применением для них новых материалов и технологий обработки.

Газотурбинные двигатели нового поколения имеют большие окружные скорости и значительные знакопеременные напряжения, компрессоры выполнены в виде блисков, к лопаткам которых предъявляются повышенные требования, в т. ч. эллиптическая форма входных кромок с шероховатостью  $R_a < 0,25$  мкм, а также устойчивость к многоцикловой усталости [1]. При изготовлении лопаток блиска используются ( $\alpha + \beta$ ) титановые сплавы ВТ6, ВТ8-1, Ti-64 [2], способные работать длительно при температурах до 500 °С. Следует отметить, что

данные сплавы относятся к труднообрабатываемым и обладают неблагоприятной технологической наследственностью [3]. Это означает, что технология получения лопаток будет иметь прямое влияние на ее конечные свойства. В этой связи технологическое обеспечение ресурса и эксплуатационной надежности лопаток блисков представляется комплексной задачей, при решении которой нужно учитывать особенности их материала и влияние на них каждого этапа производства – от заготовки до финишных операций.

В данной работе представлен критический обзор существующих методов обработки и упрочнения лопаток осевых моноколес, включающих поверхностное пластическое деформирование (ППД), а также комплексную модификацию поверхности, включающую ППД, электролитно-плазменное полирование (ЭПП), ионную имплантацию (ИИ) и нанесение защитного вакуумного ионно-плазменного покрытия.

### ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ: ОБЗОР СПОСОБОВ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ЛОПАТОК БЛИСКОВ

Из всего многообразия существующих технологий изготовления лопаток моноколес можно выделить три основных варианта [4]. Первый включает изготовление из профилированных заготовок, полученных штамповкой, что позволяет снизить трудозатраты по обработке лопаточного венца, особенно для блисков небольших размеров. Второй подход позволяет изготавливать диск и лопатки из разноименных материалов и включает различные способы их сварки (лазерной, линейной сварки трением, диффузионной [5]). Главная особенность третьего варианта технологии изготовления осевого моноколеса из монолитной непрофилированной заготовки состоит в том, что на черновой и получистовой операциях необходимо удалить практически весь объем металла из межлопаточного пространства, что значительно снижает эффективность черновой обработки. Однако, несмотря на это, данный способ имеет наибольшее распространение в промышленном производстве [4].

В целой серии работ, выполненных в АО «Мотор Сич», исследовались наиболее подходящие способы металлообработки осевых моноколес компрессора низкого давления [3, 6, 7]. Аналогичные исследования проводились и другими авторами [4, 8]. В работе [9] проанализированы себестоимость и машинное время различных технологических цепочек, основные звенья которых – гидроабразивная резка, электрохимическая (ЭХО) и фрезерная обработки.

При гидроабразивной резке в водоструйных установках насосом создается давление до 6000 бар, которое преобразуется через сопло в энергию струи. Полученную струю можно рассматривать как точечный инструмент с силой резания не более 100 Н, что говорит об отсутствии наведенных поверхностных остаточных напряжений. Однако эксплуатационные затраты и эффект «заноса» гидроабразивной струи делают метод экономически нецелесообразным при возможности использования других методов обработки, к примеру, ЭХО [8].

Электрохимическая обработка является перспективным способом чистовой обработки ввиду отсутствия сил резания и относительно хорошего качества поверхности, а также возможности автоматизации процесса [4]. Известно, что зарубежные производители ГТД (General Electric Company, MTU Aero Engines GmbH, Volvo Aero Corporation и др.) успешно внедрили черновое формообразование межлопаточных каналов как непрофилированными, так и профилированными электродами [11]. В нашей стране внедрение данных способов обработки ограничивается отсутствием отечественных станков для обработки блисков, а также сложностью подбора технологических режимов обработки, зависящих от большого многообразия факторов [8]. Поэтому в мире основным способом формообразования осевых моноколес остается фрезерование по причине возможности использования стандартных инструментов и обширной базы накопленных данных [2].

Традиционным и наиболее применяемым методом обработки проточных поверхностей осевых моноколес, который получил распространение как в нашей стране, так и за рубежом, является высокоскоростное фрезерование [6]. После него в поверхностном слое пера лопатки образуются остаточные напряжения (ОН) сжатия, величина которых на расстоянии 2 мкм от поверхности составляет 212–260 МПа. Глубина распространения остаточных напряжений сжатия составляет 30–50 мкм. Микроструктура лопатки по всему сечению пера равноосная, состоящая из  $\alpha$  и  $(\alpha + \beta)$  фаз. Структура поверхностного слоя пера в результате высокоскоростного фрезерования видимых изменений не претерпевает. Это говорит о том, что при концевом фрезеровании большинства материалов блисков на чистовых режимах в поверхностном слое лопаток не возникают температурные остаточные напряжения и структурно фазовые превращения. Однако фрезерование не обеспечивает необходимые значения шероховатости ( $R_a < 0,25$  мкм). Установлено, что она составляет  $R_a$  0,41–0,74 мкм, что обуславливает в дальнейшем использование финишных операций шлифования [7, 10].

Технологическая наследственность предыдущей лезвийной обработки также не оказывает влияния на результаты формирования поверхностного слоя при шлифовании, так как толщина припуска составляет менее 0,5 мм, что полностью приводит к изменению картины распределения остаточных напряжений. Установлено, что в поверхностном слое наблюдаются напряжения растяжения величиной до 40 МПа, переходящие в сжимающие – до 300 МПа на большей глубине [7]. Учитывая, что растягивающие остаточные напряжения в поверхностном слое недопустимы с точки зрения сопротивления усталости [12], возникает необходимость в финишной обработке поверхности детали для формирования требуемого качества и, как следствие, эксплуатационных свойств.

#### УПРОЧНЕНИЕ ЛОПАТОК БЛИСКОВ ПОСРЕДСТВОМ ППД

Для обработки одиночных лопаток используются различные способы модификации поверхности, однако для блисков при их серийном производстве реализуется лишь обработка поверхности микрошариками (ОМШ) с последующим виброшлифованием (ВШ) [1]. Это связано не только с труднодоступностью для обработки такими методами, как лазерное упрочнение, накатка роликом и др., но и из экономических соображений [13].

В процессе упрочнения пневмодробеструйным способом важно добиться оптимальных углов обработки, так как в противном случае значительно увеличивается шероховатость поверхности до 0,4 мкм и падает равномерность наклепа на спинке и крыльях лопатки. С этой целью фирмой Rolls-Royce разработано специальное сопло, которое позволяет обрабатывать лопатки блиска на пятикоординатном станке с ЧПУ под углами, близкими к оптимальным [1].

В результате обработки в поверхностном слое возникают остаточные напряжения сжатия. При этом величина напряжений сильно зависит как от способа модификации, так и от применяемого оборудования.

На рис. 1 представлены зависимости напряжений в поверхностном слое от глубины. Первые три кривые получены в работе [3] для сплава ВТ 8-1, где 1 – ОМШ, 2 – ОМШ + ультразвуковое упрочнение (УЗУ) (в концентраторе типа «Тор»), 3 – ОМШ + УЗУ (в концентраторе типа «Стакан»). Вторые три кривые получены в работе [1] на сплаве Inconel 718, где 4 – ОМШ, 5 – виброупрочнение (ВУ), 6 – ОМШ + ВШ. В обеих работах отмечено повышение шероховатости после ОМШ на 0,05–0,15 мкм по сравнению с необработанной поверхностью. Добавление ВШ после ОМШ снижает значение шероховатости с  $Ra = 0,43$  мкм до  $Ra = 0,21$  мкм. Все это ведет к увеличению циклической долговечности, значения которой представлены в табл. 1.

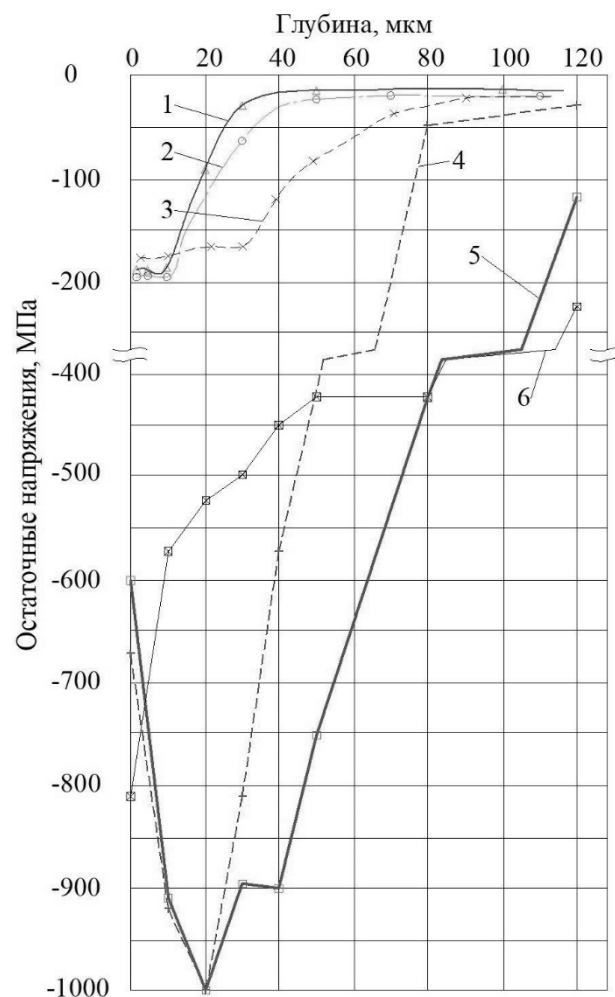


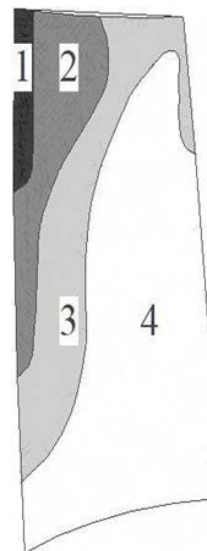
Рис. 1. Остаточные поверхностные напряжения в зависимости от глубины при разных способах упрочнения. (Позиции указаны в тексте)

Таблица 1

**Результаты испытаний образцов  
на циклическую долговечность**

<i>Технология отделочно- упрочняющей технологии моноколеса (номер кривой на рис. 1)</i>	<i>Среднее количество циклов до разруше- ния, <math>N \cdot 10^6</math> ц.</i>	<i>Усталостная прочность, м·Гц</i>
ОМШ (1)	5,6	–
ОМШ + УЗУ («Тор») (2)	13,36	–
ОМШ + УЗУ («Стакан») (3)	12,09	–
ВУ (5)	–	3,33
ОМШ + ВШ (6)	–	3,97
Без упрочнения	–	2,47

Конечной целью вышеописанной технологии обработки поверхности лопаток блиска являлось повышение сопротивления их многоциклового усталости. Однако усталостное разрушение – это не единственная проблема при эксплуатации моноколес. Анализ повреждаемости лопаток [14] показал, что, в зависимости от типа двигателя, в 60–90 % случаев повреждения лопаток компрессора имеют эрозионный характер. Причем в более чем 90 % случаев повреждаются первые ступени лопаток КНД, имеющие преимущественно локализованный характер. В 76–94 % случаев повреждения происходят в области кромок верхней трети лопатки, что проиллюстрировано на рис. 2 [15]. В этой связи необходима разработка технологии, обеспечивающей комплексную защиту как от эрозионного повреждения, так и от усталостного разрушения.



**Рис. 2.** Зоны повреждения лопаток моноколеса:  
1 – зона максимального износа; 2 – зона среднего износа; 3 – зона незначительного износа; 4 – зона минимального износа

**КОМПЛЕКСНОЕ УПРОЧНЕНИЕ  
ЛОПАТОК БЛИСКОВ**

Предложенный нами подход к решению вышеуказанных задач включает комплексную обработку лопаток осевых моноколес. На первом этапе происходит виброупрочнение, затем лопатки подвергаются ЭПП, после которого происходит комплексная вакуумная ионно-плазменная обработка (КВИПО), включающая ионную имплантацию и нанесение защитного эрозионно-стойкого вакуумно-плазменного покрытия.

При виброупрочнении поверхностный слой лопатки подвергается пластической деформации.

В начальной фазе деформации неровностей поверхности пера лопатки деформирующие шарики, соприкасаясь с выступами микрорельефа, обуславливают высокие поверхностные напряжения на них. В результате этого образуется внутренняя сетка линий скольжения, вдоль которой наступают пластические деформации [16].

В последующей фазе обработки, после многократного ударного воздействия шариков на обрабатываемую поверхность, микрообъемы металла под действием внутренних реакций перемещаются в направлении свободных поверхностей впадин неровностей, заполняя эти впадины [16]. Это может привести к картине, когда во впадинах создаются сжимающие ОН, а в вершинах, в связи с перенаклепом их поверхности, – растягивающие, которые способствуют возникновению усталостной трещины на более ранних этапах наработки [12].

Предлагается этот «дефектный» поверхностный слой удалить. Как показано в работе [17], это может быть обеспечено ЭПП. Сущность этого метода заключается в том, что обрабатываемое металлическое изделие погружают в водный раствор нейтрального электролита при температуре 90–93 °С и прикладывают к нему положительное по отношению к электролиту электрическое напряжение (около 280–300 В), при этом между поверхностью обрабатываемого изделия и электролитом образуется восходящий парогазовый слой. Пузырьки, схлопываясь на выступающих микровыступах, удаляют их, приводя к улучшению шероховатости поверхности до  $Ra$  0,06–0,1 мкм [17]. В результате такой обработки поверхность детали подготавливается к следующему этапу – ИИ.

Ионная имплантация (ионное внедрение, ионное легирование) – введение примесных атомов в твердое тело бомбардировкой его поверхности ускоренными ионами, при которой происходит проникновение ионов вглубь материала. По сравнению с ППД ИИ имеет «щадящий» характер упрочнения, уровень остаточных напряжений заметно ниже (около 300 МПа при глубине залегания до 40 мкм) [18]. Установлено, что эти напряжения, в отличие от напряжений в поверхности лопатки, полученных при ППД, в меньшей степени релаксируют при температуре эксплуатации (что наблюдается при ППД) [19]. При этом ИИ сохраняет исходное значение шероховатости. Для защиты тонкого имплантированного слоя от эрозионных повреждений используются защит-

ные вакуумные ионно-плазменные эрозионностойкие покрытия.

Результаты исследований [12, 18–20] демонстрируют повышение сопротивления эрозии в 3–4 раза, а также рост предела выносливости лопаток на 20–80 МПа на базе  $N=2 \cdot 10^7$  циклов в сравнении с базовой технологией обработки. Данные результаты были получены на титановых сплавах типа ВТ6 и ВТ8-М1 на единичных лопатках статора КНД. Исходя из этого, можно сделать вывод о перспективности использования комбинированной технологии для лопаток блисков.

При использовании данного подхода для осевых моноколес возникают сложности, связанные с формой изделия. Траектория движения частиц наносимого покрытия представляет собой прямые, а значит, перекрытые области будут создавать «тени», в которых плотность плазмы заметно ниже, в связи с чем обработка может осуществляться неравномерно. Классический путь решения данной проблемы – создание такой траектории движения тела относительно испарителей плазмы, при которой обеспечивается максимальная равномерность обработки. Учитывая это, нами запатентован способ [21], при котором реализуется постоянное двухосевое вращение блиска с постоянной скоростью в одной плоскости и с переменной – в другой. Данный принцип впоследствии лег в основу разработанных установок для ионной имплантации и нанесения защитного покрытия на поверхность пера лопаток блисков.

Подбор вышеописанного закона движения детали в вакуумной камере экспериментальным путем потребовал бы значительных временных и материальных затрат. В этой связи использование методов компьютерного моделирования и численных расчетов на основе существующих теорий позволяет значительно сократить время получения оптимальной траектории перемещения моноколеса. С этой целью нами была разработана численная модель для расчета толщины вакуумного ионно-плазменного покрытия, в которой распыленные с катода частицы материала движутся по прямолинейным траекториям, не взаимодействуя

с частицами окружающей среды, и конденсируются непосредственно в точках соударения с поверхностью подложки (лопатки). Данный подход был опробован на плоских образцах [22] и одиночных лопатках [23], показав удовлетворительные результаты. Установлено, что разработанные модели могут быть эффективными при отработке технологических процессов как ионной имплантации, так и нанесения защитного покрытия, помогая получить оптимальную траекторию перемещения детали и визуализируя полученные результаты.

#### АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ПОКРЫТИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ЛОПАТОК БЛИСКА

Проведенные расчеты при моделировании осаждаемого покрытия выявили проблемные зоны для обработки, показанные на рис. 3, где черным отмечены зоны с максимальной ожидаемой толщиной покрытия, серым – область с меньшей толщиной, белым – места с ожидаемой наименьшей толщиной, которые можно назвать «проблемными» при обработке. Необходимо отметить, что особенно выделяется отмеченная зона в нижней части корыта лопатки, где ширина межлопаточного пространства составляет несколько десятков миллиметров. Для обработки этой области траектория перемещения блиска в зоне осаждаемого покрытия должна иметь замедление угловой скорости вращения, в положении, когда данная зона находится в зоне плазмы. Таким образом, до половины технологического времени осаждения покрытия данные области будут находиться в зоне обработки. Полностью избавиться от неравномерности толщины покрытия в этих зонах лопатки не представляется возможным. Вместе с тем, учитывая данные по эрозионной повреждаемости лопаток, выявленные области менее всего подвержены износу.

Предлагаемый подход позволяет снизить неравномерность обработки как при ИИ, так и при нанесении защитного вакуумно-плазменного покрытия.

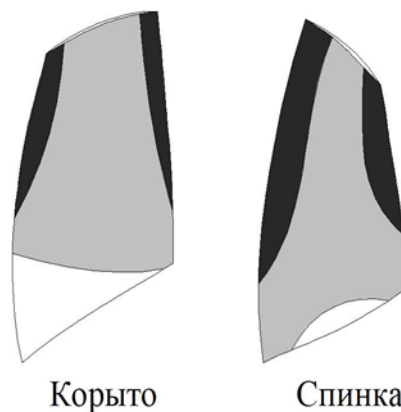


Рис. 3. Зоны максимальной и минимальной толщины покрытия на поверхности лопатки

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенный анализ продемонстрировал необходимость применения финишных операций обработки поверхности лопаток блисков. Единственным способом, внедренным при серийном производстве моноколес, является ППД, в частности ОМШ с последующим ВШ. Данный метод значительно увеличивает предел выносливости изделия, однако не обеспечивает защиты от эрозионного повреждения. Предложенная комплексная технология, включающая ППД, ЭПП и КВИПО, обеспечивает повышение сопротивления эрозии и предела выносливости, что доказано на исследованиях одиночных лопаток. Чтобы избежать неравномерности, связанной со сложной формой изделия, предлагается осуществлять двухосевое вращение изделия в вакуумной камере, а подбор траектории движения осевого моноколеса в вакуумной камере производить посредством численного моделирования.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Goetz F., Wang W., Thomas H. Application of Vibropeening on Aero – Engine Component // *Procedia CIRP*. 2014. № 13. Pp. 423-428. [ F. Goetz, W. Wang, H. Thomas, “Application of Vibropeening on Aero – Engine Component”, in *Procedia CIRP*, no. 13, pp. 423-428, 2014. ]
2. Klocke F. Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, EDM and ECM for titanium- and nickel-based blisks // *Procedia CIRP*. 2012. Vol. 2. Pp. 98-101. [ F. Klocke, “Technological and economical comparison of roughing strategies via milling, EDM and ECM for titanium- and nickel-based blisks”, in *Procedia CIRP*, vol. 2, pp. 98-101, 2012. ]

3. Качан А. Я., Богуслаев А. В. Отделочно-упрочняющие технологии обработки лопаток моноколес современных газотурбинных двигателей // Вестник двигателестроения. 2010. № 1. С. 81–90. [ A. Ya. Kachan, A. V. Boguslaev, "Finishing and hardening technologies for processing the blades of monowheels of modern gas turbine engines", (in Russian), in *Visnik dvigunobudovannya*, no. 1, pp. 81-90, 2010. ]
4. Курьлев Д. В. Основы многокоординатного формообразования межлопаточных каналов осевых моноколес при предварительном прорезании кольцевым инструментом: дис. ... канд. техн. наук. Казань, 2016. 134 с. [ D. V. Kurylev, *Fundamentals of multi-coordinate shaping of inter-blade channels of axial monocycles during preliminary cutting with a ring tool*: Cand. Of Techn. Sciences. Kazan, 2016. 134 p. ]
5. Бердин В. К. Технологии получения полых изделий методом сверхпластической формовки и диффузионной сварки // Школа молодых ученых «Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов» (Belgorod, Oct. 9-11 2019). Белгород: БелГУ, 2019. С. 15–16. [ V. K. Berdin, "Technologies for producing hollow products by superplastic molding and diffusion welding", (in Russian), in *School of young scientists "Structure and properties of high-entropy alloys"*, Belgorod, 2019, pp. 15-16. ]
6. Формирование параметров качества несущих поверхностей моноколес ГТД высокоскоростным фрезерованием / А. В. Богуслаев и др. // Авиационно-космическая техника и технология. 2005. № 8 (24). С. 7–10. [ A. V. Boguslaev, et. al., "The formation of quality parameters of the bearing surfaces of GTE monowheels by high-speed milling", (in Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 8 (24), pp. 7-10, 2005. ]
7. Качан А. Я., Богуслаев В. А., Мозговой В. Ф. Финишные технологии деталей ГТД // Вестник двигателестроения. 2010. № 1. С. 71–78. [ A. Ya. Kachan, V. A. Boguslaev, V. F. Mozgovo, "Finishing technologies for gas turbine engine parts", (in Russian), in *Visnik dvigunobudovannya*, no. 1, pp. 71-78, 2010. ]
8. К вопросу выбора технологии обработки сложно-профильных изделий (на примере лопаток моноколес газотурбинных двигателей) / В. А. Горелов и др. // Известия МГТУ «МАМИ». 2012. Т. 2, № 2 (24). С. 67–73. [ V. A. Gorelov, et. al., "To the question of the choice of processing technology for complex products (for example, the blades of monowheels of gas turbine engines)", (in Russian), in *Izvestiya MGTU «MAMI»*, vol. 2, no. 2 (24), pp. 67-73, 2012. ]
9. Technological and economical assessment of alternative process chains for blisk manufacture / F. Klocke, et. al. // Procedia CIRP. 2015. Vol. 35. Pp. 67–72. [ F. Klocke, et. al., "Technological and economical assessment of alternative process chains for blisk manufacture", in *Procedia CIRP*, vol. 35, pp. 67-72, 2015. ]
10. Долматов А. И., Курин М. А. Перспективы развития финишных методов обработки в авиадвигателестроении // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 6 (42). С. 59–62. [ A. I. Dolmatov, M. A. Kurin, "Prospects for the development of finishing processing methods in aircraft engines", (in Russian), in *Aviacionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya*, no. 6 (42), pp. 59-62, 2007. ]
11. Павлинич С. П. Перспективы применения импульсной электрохимической обработки в производстве деталей газотурбинных двигателей // Вестник УГАТУ. 2008. Т. 11, № 2. С. 105–115. [ S. P. Pavlinich, "Prospects for the use of pulsed electrochemical processing in the production of gas turbine engine parts", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 11, no. 2, pp. 105-115, 2008. ]
12. Смыслов А. М. Комбинированные технологии на базе ионно-имплантационного модифицирования поверхности, обеспечивающие повышение ресурса и надежности лопаток компрессора и турбин ГТД: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 1993. 325 с. [ A. M. Smyslov, *Combined technologies based on ion-implantation surface modification that improve the service life and reliability of compressor blades and GTE turbines*: PhD. Ufa, 1993. 325 p. ]
13. Hennig W., Feldmann G., Haubold T. Shot peening method for aerofoil treatment of blisk assemblies // Procedia Cirp. 2014. Vol. 13. Pp. 355-358. [ W. Hennig, G. Feldmann, T. Haubold, "Shot peening method for aerofoil treatment of blisk assemblies", in *Procedia Cirp*, vol. 13, pp. 355-358, 2014. ]
14. Чичков Б. А., Заяц М. А. Статистический анализ повреждаемости рабочих лопаток компрессоров двухконтурных турбореактивных двигателей // Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. 2018. Т. 21, № 1. С. 174–184. [ B. A. Chichkov, M. A. Zayac, "Statistical analysis of the damage to rotor blades for compressors of turbofan engines", (in Russian), in *Nauchnyj vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta grazhdanskoj aviacii*, vol. 21, no. 1, pp. 174-184, 2018. ]
15. Фомичев Е. О. Разработка способа восстановления моноколес газотурбинных двигателей: дис. ... канд. техн. наук. М., 2013. 209 с. [ E. O. Fomichev, *Development of a method for restoring mono-wheels of gas turbine engines*: Cand. Of Techn. Sciences. Moscow, 2013. 209 p. ]
16. Новокрещенов С. А. Преобразования в поверхностном слое детали при динамических методах обработки поверхностным пластическим деформированием // Молодой исследователь Дона. 2017. № 1 (4). С. 73–77. [ S. A. Novokreshchenov, "Transformations in the surface layer of a part under dynamic methods of surface plastic deformation processing", (in Russian), in *Molodoj issledovatel' Dona*, no. 1 (4), pp. 73-77, 2017. ]
17. Плотников Н. В., Смыслов А. М., Таминдаров Д. Р. К вопросу о модели электролитно-плазменного полирования поверхности // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 4 (57). С. 90–95. [ N. V. Plotnikov, A. M. Smyslov, D. R. Tamindarov, "On the model of electrolyte-plasma surface polishing", (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 4 (57), pp. 90-95, 2013. ]
18. Новикова М. К. Исследование и разработка технологии ионного модифицирования поверхности лопаток компрессора ГТД из титановых сплавов: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 1991. 248 с. [ M. K. Novikova, *Research and development of technology for ion modification of the surface of GTE compression blades made of titanium alloys*: Cand. Of Techn. Sciences. Ufa, 1991. 248 p. ]
19. Дубин А. И. Повышение сопротивления усталости лопаток компрессора газотурбинных двигателей на основе улучшения поверхностного слоя: дис. ... канд. техн. наук. Уфа, 2014. 193 с. [ A. I. Dubin, *Increasing the fatigue resistance of the compressor blades of gas turbine engines on the basis of improving the surface layer*: Cand. Of Techn. Sciences. Ufa, 2014. 193 p. ]
20. Смыслов А. М., Смыслова М. К., Дубин А. И. О взаимосвязи релаксационной стойкости лопаток компрессора из титановых сплавов с параметрами сопротивления уста-

лости // Вестник УГАТУ. 2012. Т. 16, № 1 (46). С. 24–29. [ A. M. Smyslov, M. K. Smyslova, A. I. Dubin, “On the relationship of the relaxation resistance of compressor blades made of titanium alloys with fatigue resistance parameters”, (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 16, no. 1 (46), pp. 24-29, 2012. ]

21. **Способ** нанесения защитного многослойного покрытия на лопатки блиска газотурбинного двигателя из титанового сплава от пылеабразивной эрозии / А. М. Смыслов и др. // Патент России № 2677041. Опубл. 15.01.2019. Бюл. 2. [ A. M. Smyslov, et. al., “*Protective multi-layer coating application method on the gas turbine engine blisk blades from the titanium alloy against dust-abrasive erosion*”, Patent Of Russia 2677041, 2019. ]

22. **Олейник А. В.** К вопросу численного моделирования процесса нанесения защитного покрытия на плоский образец // Школа молодых ученых «Структура и свойства высокоэнтропийных сплавов» (Belgorod, Oct. 9-11 2019). Белгород: БелГУ, 2019. С. 15–16. [ A. V. Oleinik, “On the issue of numerical simulation of the process of applying a protective coating to a flat sample”, (in Russian), in *School of young scientists "Structure and properties of high-entropy alloys"*, Belgorod, 2019, pp. 15-16. ]

23. **Олейник А. В., Смыслов А. М.** Моделирование осаждения вакуумно-плазменного эрозионностойкого покрытия на лопатки компрессора ГТД // Климовские чтения - 2019: перспективные направления развития авиадвигателестроения. СПб.: ОДК-Климов, 2019. С. 129–135. [ A. V. Oleinik, A. M. Smyslov, “Simulation of deposition of a vacuum-plasma erosion-resistant coating on the blades of a gas turbine compressor”, (in Russian), in *Klimovskie chteniya - 2019: perspektivnye napravleniya razvitiya aviadvigatelsestroeniya*, Saint-Petersburg, 2019, pp. 129-135. ]

#### ОБ АВТОРАХ

**ОЛЕЙНИК Алексей Валерьевич**, маг. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УГАТУ, 2018).

**СМЫСЛОВ Анатолий Михайлович**, проф. каф. технол. машиностроения. Дипл. инж.-технол. (УАИ, 1973). Д-р техн. наук по тепл. двигателям лет. аппаратов (УГАТУ, 1993). Иссл. в обл. ионно-имплант. и вакуумно-плазм. модиф. поверхности.

#### METADATA

**Title:** On the issue of GTE compressor blisk blade surface treatment.

**Authors:** A. V. Oleinik, A. M. Smyslov

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia.

**Email:** tm@usatu.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 24, no. 1 (87), pp. 17-24, 2020. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**Abstract:** The issues of formation of the blisk's blade from titanium alloys surface layer quality during their mechanical and hardening processing is considered. As well as the subsequent application of erosion-resistant coating. Processing irregularities occur to the complexity of the part's shape during PVD coating deposition. In order to reduce it, blisk biaxial rotation in the vacuum chamber is considered.

The trajectory selection is carried out with numerical methods.

**Key words:** blisc; PVD; ion implantation; finite element model; electrolytic plasma processing; surface treatment; surface plastic straining; GTE compressor blades; tooling.

**About authors:**

**OLEINIK, Alexey Valerievich**, Undergraduate Student, Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. Engineer-technol (USATU, 2018).

**SMYSLOV, Anatoliy Mikhaylovich**, Prof., Dept. of Mechanical Engineering Technology. Dipl. Engineer-technol (UAI, 1973). Dr. of Tech. Sci. in heat engines of aircraft (USATU, 1993).