

## Машиностроение Mechanical engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621

doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-4-15

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМБИНИРОВАННОЙ ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК ГТД

Александр Николаевич Михайлов<sup>1✉</sup>, Александр Владимирович Анастасьев<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Донецкий национальный технический университет, Донецк, ДНР, Россия

<sup>2</sup> Донецкий национальный технический университет, Автомобильно-дорожный институт, Горловка, ДНР, Россия

<sup>1</sup> mntk21@mail.ru

<sup>2</sup> anastasyev.av@yandex.ru

#### Аннотация

В статье представлены современные подходы к совершенствованию технологий отделочно-упрочняющей обработки лопаток газотурбинных двигателей (ГТД) с целью улучшения их эксплуатационных характеристик. Лопатки являются одними из наиболее нагруженных компонентов ГТД, их качество напрямую влияет на эффективность, надежность и долговечность работы двигателя. Актуальность работы обусловлена высокими требованиями, предъявляемыми к эксплуатационным характеристикам современных авиационных ГТД, реализация которых напрямую связана с совершенствованием технологии отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины. Рассмотрены основные методы синтеза технологических процессов и их адаптации для обеспечения функционально-ориентированного подхода. Основное внимание уделено методам синтеза технологических процессов отделочно-упрочняющей обработки, включая

разработку функционально-ориентированного технологического обеспечения (ФОТО). Приведены частные вариации реализации общих методов синтеза, такие как создание комбинированного полировальника и устройство для зонального поверхностного упрочнения. Описан алгоритм синтеза ФОТО, позволяющий адаптировать его применение в типовых технологических процессах. Приведены алгоритмы и структурные схемы синтеза технологического обеспечения, а также результаты экспериментального анализа повышения твердости и качества обработанных поверхностей. Результаты работы демонстрируют возможность интеграции предложенных технологий в существующие производственные процессы и их потенциал для дальнейшего развития.

**Ключевые слова:** технологическое обеспечение, лопатка, профиль, полировальник, упрочнение.

#### Ссылка для цитирования:

Михайлов А.Н. Технологические особенности комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаток ГТД / А.Н. Михайлов, А.В. Анастасьев // Транспортное машиностроение. – 2025. - № 2. – С. 4-15. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-4-15.

Original article

Open Access Article

### ENGINEERING FEATURES OF COMBINED FINISHING AND HARDENING TREATMENT OF GTE BLADES

Aleksandr Nikolaevich Mikhaylov<sup>1✉</sup>, Aleksandr Vladimirovich Anastasiev<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Donetsk National Technical University, Donetsk, DPR, Russia

<sup>2</sup> Donetsk National Technical University, Automobile and Road Institute, Gorlovka, DPR, Russia

<sup>1</sup> mntk21@mail.ru

<sup>2</sup> anastasyev.av@yandex.ru

## Abstract

The paper gives modern approaches to advancing the technologies of finishing and hardening treatment of gas turbine engine (GTE) blades in order to improve their operational characteristics. The blades are one of the most stressed GTE components, their quality directly affects the efficiency, reliability and durability of the engine. The relevance of the paper is due to the high requirements made to the operational characteristics of modern aviation gas turbine engines, which implementation is directly related to the improvement of the technology of finishing and hardening treatment of turbine blades. The basic methods of synthesis of engineering processes and their adaptation to ensure a function-oriented approach are considered. The main attention is paid to the methods of synthesis of engineering processes of finishing and strengthening equipment, including the development of functionally

oriented technological support. Particular variations of implementing general synthesis methods are given, such as the construction of a combined polisher and a device for zonal surface hardening. An algorithm for functionally oriented technological support synthesis is described, which makes it possible to adapt its application in typical engineering processes. Algorithms and schematic diagrams for the synthesis of engineering support are given, as well as the results of an experimental analysis of increasing the hardness and quality of treated surfaces. The results of the study demonstrate the possibility of integrating the proposed technologies into existing production processes and their potential for further development.

**Keywords:** technological support, blade, profile polisher, hardening.

## Reference for citing:

Mikhailov AN, Anastasiev AV. *Engineering features of combined finishing and hardening treatment of GTE blades. Transport Engineering. 2025;2:4-15. doi: 10.30987/2782-5957-2025-2-4-15.*

## Введение

Современное авиастроение предъявляет высокие требования к качеству и надежности газотурбинных двигателей (ГТД), которые являются ключевыми элементами как гражданских, так и военных летательных аппаратов. Одним из критически важных компонентов ГТД являются лопатки, от характеристик которых во многом зависит эффективность и долговечность двигателя. В связи с этим особое внимание уделяется методам их обработки, направленным на улучшение эксплуатационных свойств, таких как износостойкость, коррозионная стойкость и прочность. Повышение качества отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя является важной задачей, так как от этого зависят эксплуатационные характеристики и ресурс работы двигателя. Существует несколько общих методов синтеза такого технологического обеспечения для решения этой задачи, такие как оптимизация процессов механической обработки путем применения высокоточных и высокопроизводительных методов обработки, применение специальных и комбинированных инструментов, применение современных технологий упрочнения поверхности, применение комбинированных методов обработки, а также использование систем автоматизированного проектирования и моделирова-

ния на всех этапах жизненного цикла изделий. Комплексное использование этих методов позволяет более точно контролировать и адаптировать процессы отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины газотурбинного двигателя, и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики и увеличить ресурс работы двигателя.

Технологическое обеспечение для повышения качества отделочно-упрочняющей обработки может включать в себя различные методы и техники, например создание новых, или адаптация имеющихся режущих инструментов, применение новых инструментальных материалов или схем обработки, позволяющих учитывать эксплуатационные особенности обрабатываемых деталей и т.д. Эти методы часто используются в комбинации друг с другом для создания комплексных систем технологического обеспечения, направленных на повышение качества отделочно-упрочняющей обработки [1, 2].

Целью данной работы является разработка метода комплексной обработки путем адаптации технологического обеспечения для отделочной и упрочняющей обработки и его внедрение в типовой технологический процесс обработки лопаток турбины ГТД, с применением принципов функциональной ориентации. Для этого

необходимо решить ряд задач, а именно: на основании общего процесса синтеза технологического обеспечения разработать структуру адаптированного технологического процесса с учетом функциональных

особенностей, провести поиск вариантов функционально-ориентированного технологического обеспечения, апробировать его применение.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Одним из перспективных способов являются функционально-ориентированные технологии (ФОТ), основанные на взаимосвязи функциональных особенностей эксплуатации изделия с процессом его изготовления. Наличие обратных связей обеспечивает соответствие свойств всех функциональных элементов изделия действующим на них эксплуатационным функциям.

Основанные на ФОТ методы обеспечения функционально-ориентированных свойств лопаток включают в себя обеспечение соответствующих свойств за счет принципов ориентации функциональных воздействий. При этом для реализации ФОТ зачастую необходимо применение специализированного функционально-ориентированного материального обеспечения и инструмента, для обеспечения особых принципов ориентации. Одной из особенностей функционально-ориентированных технологий является наличие итерационно-рекуррентных связей, обеспечивающих взаимосвязь всех этапов технологического процесса. Благодаря наличию этих связей, на основании ФОТ разработано множество методов синтеза, обеспечивающих как постоянство технологических воздействий в каждой точке обрабатываемого профиля [3, 4, 5], так и обеспечивающих равнозначные или кратные свойства лопаток различных ступеней [6, 7]. При этом, рассматриваемые методы, чаще всего, затрагивают процесс синтеза в целом, без особенностей конструкции технологического обеспечения и специфики его применения.

Функционально-ориентированное технологическое обеспечение (ФОТО) представляет собой комплекс методов и инструментов, направленных на обеспечение эффективного выполнения специфических функций технологических систем. Каждый из методов синтеза ФОТО имеет

свои сильные и слабые стороны. Выбор подходящего метода зависит от конкретных задач, требований и условий эксплуатации технологической системы, при этом может применяться комбинация нескольких методов [8, 9, 10].

Лопатки имеют ряд характерных зон, обработке которых необходимо уделить максимальное внимание. К этим зонам можно отнести входную и выходную кромки, а также корытце, преимущественно в центральном сечении. Кроме того, особое внимание следует уделять обработке хвостовика, т.к. особенности его конструкции и геометрии накладывают ряд ограничений, как на возможные способы упрочнения, так и на особенности реализации упрочнения и дальнейшей отделочной обработки.

Для адаптации существующего технологического процесса с целью внедрения дополнительных операций по локальному поверхностному упрочнению и последующей отделочной обработке необходима разработка функционально-ориентированного технологического процесса. Общий процесс синтеза такой технологии напрямую связан с процессами синтеза технологического обеспечения, рассмотренным в работе [11], и представлен на рис. 1.

Функционально-ориентированное технологическое обеспечение, включающее комплекс методов и инструментов, обеспечивающих эффективное выполнение требуемых специфических функций технологических систем благодаря наличию итерационно-рекуррентных связей, обеспечивающих взаимосвязь всех этапов технологического процесса и многочисленные методы его синтеза, обеспечивающие постоянство технологических воздействий и управление свойствами изделия позволяет решить как задачу повышения качества

изделия в целом, так и повышения производительности, путем более точной адаптации к особенностям обрабатываемых поверхностей.

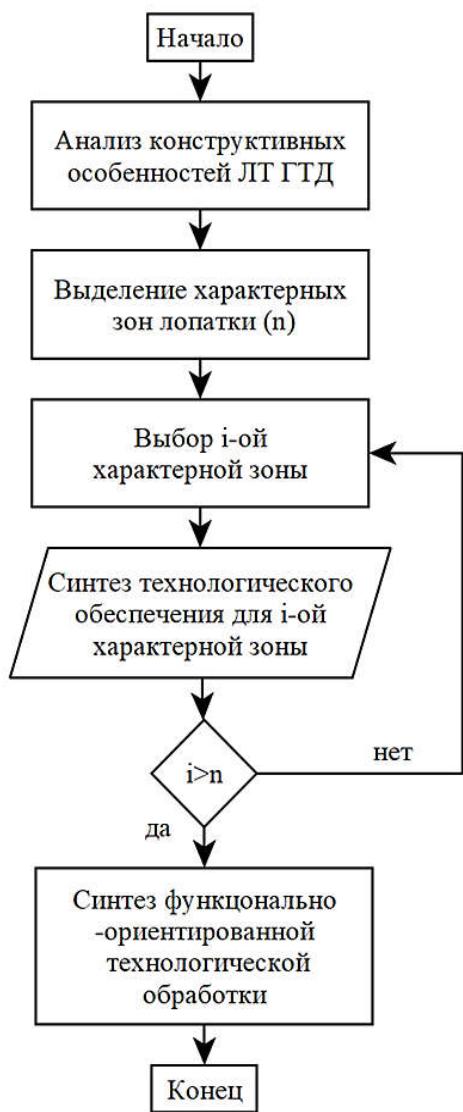


Рис. 1. Алгоритм синтеза технологического обеспечения

Fig. 1. The algorithm for the synthesis of technological support

Таким образом, для реализации функционально-ориентированного технологического процесса необходимо введение дополнительной операции зонального поверхностного упрочнения перед отделочными операциями полирования. Тогда структура отделочных операций типового технологического процесса [8], адаптированного под внедрение дополнительных операций

зонального упрочнения будет иметь вид, представленный на рис. 2.

Представленная структура, в свою очередь включает в себя типовые элементы [12], и дополнительные адаптированные операции, обеспечивающие зональное упрочнение:

1. Зональное поверхностное упрочнение методами ППД с применением функционально-ориентированного технологического обеспечения элементов лопатки турбины, подвергающихся максимальным эксплуатационным воздействиям в процессе эксплуатации.

2. Зональное функционально-ориентированное полирование с применением синтезированного комбинированного полировальника, с обеспечением требуемых характеристик зон, упрочненных методами ППД.

3. Полирование предварительное пера лопатки турбины, которое проводится с целью придания поверхности лопатки турбины единообразного состояния по показателю параметра шероховатости  $Ra=0,4\ldots0,16$  мкм, после выполнения полирования способом направленного воздействия и контроля геометрии

4. Окончательное полирование элементов пера лопатки турбины, которое проводится с целью придания поверхности лопатки турбины единообразного состояния по параметрам шероховатости  $Ra = 0,1\ldots0,063$  мкм.

5. Глянцевание поверхности лопатки турбины до параметров шероховатости  $Ra = 0,05\ldots0,032$  мкм.

6. Чистка лопаток турбин с использованием ультразвуковой установки для снятия возможных загрязнений (окислов) с функциональных элементов в специальных ваннах для ультразвуковой обработки (в случае дальнейшего нанесения защитных покрытий).

7. Нанесение функционально-ориентированных сверхпрочных покрытий.

Последующие технологические операции будут зависеть от требований, предъявляемых к конкретным лопаткам турбин, и учитывать наличие защитных покрытий и т.д.

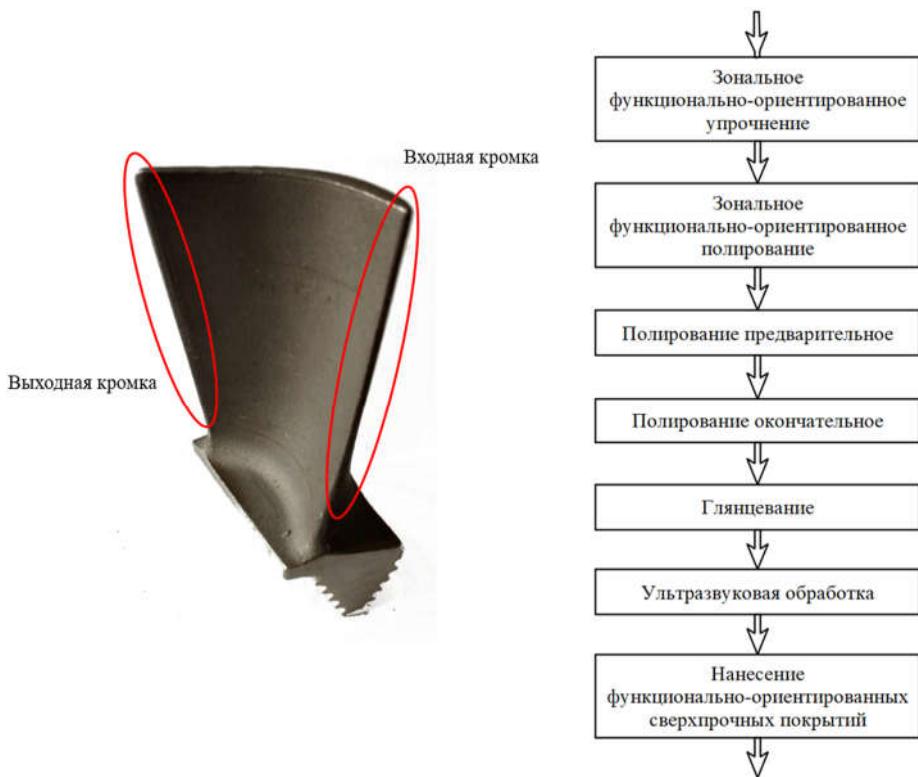


Рис. 2. Адаптированная структура отделочных операций типового технологического процесса обработки ЛТ ГТД

Fig. 2. The adapted structure of finishing operations of a typical technological process of GTE turbine engine processing

Адаптированная структурная схема, разработанная с целью обеспечения возможности реализации комбинированной зональной отделочно-упрочняющей обработки функциональных элементов позволяет применять эти операции в типовых технологических процессах, не требуя их кардинального изменения.

Для реализации представленной структуры необходимо провести синтез ФОТО для отделочной и упрочняющей обработки. Процесс синтеза вариантов технологического обеспечения отделочной обработки лопаток ГТД является сложной комплексной задачей, требующей учета многих факторов, и может быть решен, в том числе с применением морфологической матрицы. Синтез новых решений на основе морфологического анализа позволяет в достаточно сжатые сроки получать целый комплекс различных вариантов технологического обеспечения.

Методы поверхностно-пластического деформирования (ППД) являются одним из способов повышения эксплуатационных характеристик лопаток ГТД. Такие методы

упрочняющих технологий включают в себя: раскатывающие методы чистовой обработки, вибрационные, пневмо- и гидро-дробеструйные, обкатку роликами, алмазное выглаживание, дорнование, а также другие методы чистовой обработки поверхности деталей [13]. Применение таких методов позволяет достичь следующих результатов: устранение неблагоприятных растягивающих остаточных напряжений, наведенных при механической обработке, создание благоприятного микрорельефа поверхности при сохранении или уменьшении параметров шероховатости поверхности, стабилизацию степени наклена и т.д. [14]. При этом, ряд методов ППД, в силу своих технологических особенностей, имеет определенные ограничения на применение [15], с точки зрения функционально-ориентированных технологий.

В представленной работе применение операций ППД рассмотрим на примере экспериментального устройства для поверхностно-пластического упрочнения (ППУ) (рис. 3). Для детального рассмотрения выберем спинку пера, как один из

наиболее нагруженных функциональных элементов лопатки. Формирование упрочненного слоя происходит путем много-кратного соударения рабочего элемента и упрочняемой детали. Благодаря возможности применения различных типов привода и их характеристик возможна реализация широкого спектра технологических воздействий за счет большого диапазона, как

величины соударений, так и их амплитуды. Синтез вариантов функционально-ориентированного технологического оснащения (ФОТО) можно проводить на основании существующей методики синтеза технологического обеспечения повышения качества отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины [11].

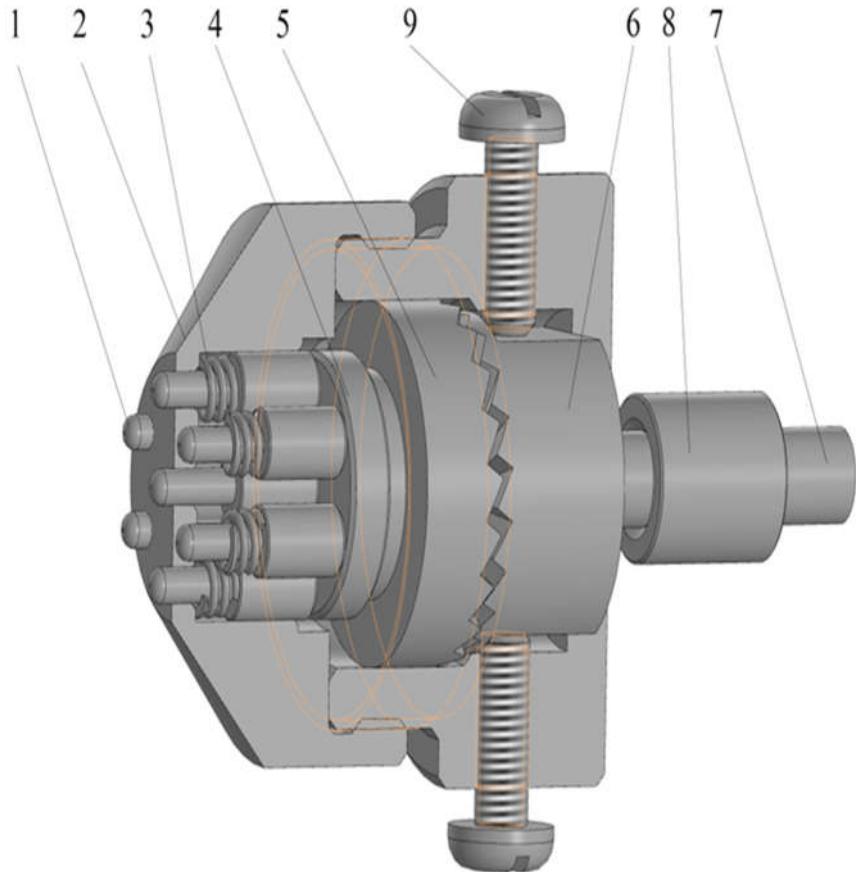


Рис. 3. Схема устройства для поверхностно-пластического упрочнения:

1 – ударник; 2 – корпус; 3 – пружина; 4 – толкатель; 5 – подвижный торцевой кулачок; 6 – неподвижный торцевой кулачок; 7 – вал электропривода; 8 – компенсирующая муфта; 9 – винт-фиксатор торцевого кулачка

*Fig. 3. Diagram of the device for surface-plastic hardening: 1 – striker; 2 – housing; 3 – spring; 4 – pusher; 5 – movable end cam; 6 – fixed end cam; 7 – electric drive shaft; 8 – compensating clutch; 9 – locking screw of the end cam*

Так, рассматриваемое устройство включает в себя семь ударников 1, установленных в разборном корпусе 2 и приводимых в рабочее положение пружинами 3. Рабочие элементы приводятся в действие пятой вала 4, на котором закреплен подвижный торцевой кулачок 5, который, при вхождении в зацепление с неподвижным торцевым кулачком 6, зафиксированном от проворота в корпусе 2 с помощью винтов 9, обеспечивает его рабочий ход.

Вал 4 приводится в движение от вала электропривода 7, соединенного через компенсирующую муфту 8. Регулировка амплитуды действия ударников регулируется за счет изменения частоты оборотов электропривода 7.

Представленное устройство спроектировано таким образом, что имеет ход ударников 2 мм, с возможностью изменения частоты воздействий в широком диапазоне, за счет регулирования частоты

вращения электропривода, а максимальный диаметр упрочняемой зоны без перемещения установки составляет 19 мм. При работе электропривода, ось толкателя 4 вращается и перемещает подвижный торцевой кулачок 5, относительно неподвижного торцевого кулачка 6, вследствие чего происходит ускоренное перемещение ударников 1, и их последующее соударение с упрочняемой поверхностью. Возврат ударников 1 в исходное положение, обеспечивается за счет пружин 3. Аналогичным образом может варьироваться длина или диаметр ударников, в зависимости от геометрии обрабатываемого участка и максимальных прилагаемых усилий к нему, в том числе ограниченных как силовыми характеристиками привода, так и особенностями конструкции обрабатываемой лопатки.

Как показывают приведенные в работе [16] результаты – применением такого способа обработки можно добиться локального упрочнения поверхности. При этом за счет изменения конструкции, типа и количества ударников – можно адаптировать устройство для обработки конкретных функциональных элементов. Однако, следует отметить, что применение такой обработки влечет за собой необходимость более тщательной последующей отделочной обработки в упрочненных зонах, что следует учитывать при синтезе соответствующего технологического оснащения.

Процесс полирования лопаток турбин в большей степени выполняется в ручном режиме, что обусловлено их сложной пространственной формой и особенностями технологии. При этом, в процессе полирования задействован различный инструмент и схемы обработки. Одним из ключевых аспектов является конструирование полировального круга [12], который должен обеспечивать эффективное и качественное удаление микронеровностей с поверхности лопатки.

Одним из таких инструментов может выступать комбинированный полировальный круг, выполненный из трех слоев равной толщины, выполненных из различных полировальных материалов, отличающих-

ся своими абразивными и механическими свойствами, фасонной, симметричной, образованной рядом сопряженных конических поверхностей с различным углом конусности с общей центральной вершиной формы, позволяющие выполнять операции предварительного и окончательного полирования, а также глянцевания, без необходимости смены инструмента.

Фасонная, симметричная форма круга позволяет выполнять операции полирования одновременно только одним слоем полировального материала, при этом, обеспечивая возможность перехода к другим слоям с минимальными затратами времени. Последовательный переход от обработки первым к обработке последним слоем позволит реализовать предварительное и окончательное полирование вместе с глянцеванием за один проход, без необходимости в смене инструмента.

При этом, очередность расположения, форма и толщина каждого слоя круга может быть различна. Например, спрофилирована по радиусу, обеспечивающему возможность проведения обработки каждым слоем материала, при этом слои абразивных материалов различной зернистости выполнены равной толщины, или же из слоев материала различной толщины, для обеспечения более равномерного износа каждого функционального слоя. Изготовленные по данной схеме круги, представлены на рис. 4, состоят из слоев различного абразивного материала, а именно: рис. 4а) для обработки рабочих лопаток турбин, состоящий из слоя жесткошерстного войлока 1; слоя из полиуретана 2 и слоя из мягкошерстного войлока 3; рис. 4б) для обработки сопловых лопаток, состоящий из слоя жесткошерстного войлока 1, слоя из нетканого нейлонового материала с абразивной пропиткой из оксида алюминия 4, и слоя из мягкошерстного войлока); рис. 4в) для зональной обработки лопаток направляющего аппарата, состоящего из слоя трехмерного волокна с нанесенными абразивными зернами оксида алюминия и слоя из мягкошерстного войлока 3. Каждый слой обеспечивает определенный вид обработки, так слой из жесткошерстного войлока (рис. 4 поз. 1) предназначен для

выполнения операций предварительного полирования, слои из полиуретана (TPU-95A) (рис. 4 поз. 2) и нетканого нейлонового материала с абразивной пропиткой из оксида алюминия (рис. 4 поз. 4) предназначены для окончательного полирования; слой из мягкошерстного войлока (рис. 4 поз. 3) предназначен для операции глянце-

вания, с учетом обеспечения соответствующих режимов обработки; а слой из трехмерного волокна с нанесенными абразивными зернами оксида алюминия на связке из синтетических смол (рис. 4 поз. 5) – для обеспечения зональной функционально-ориентированной обработки.

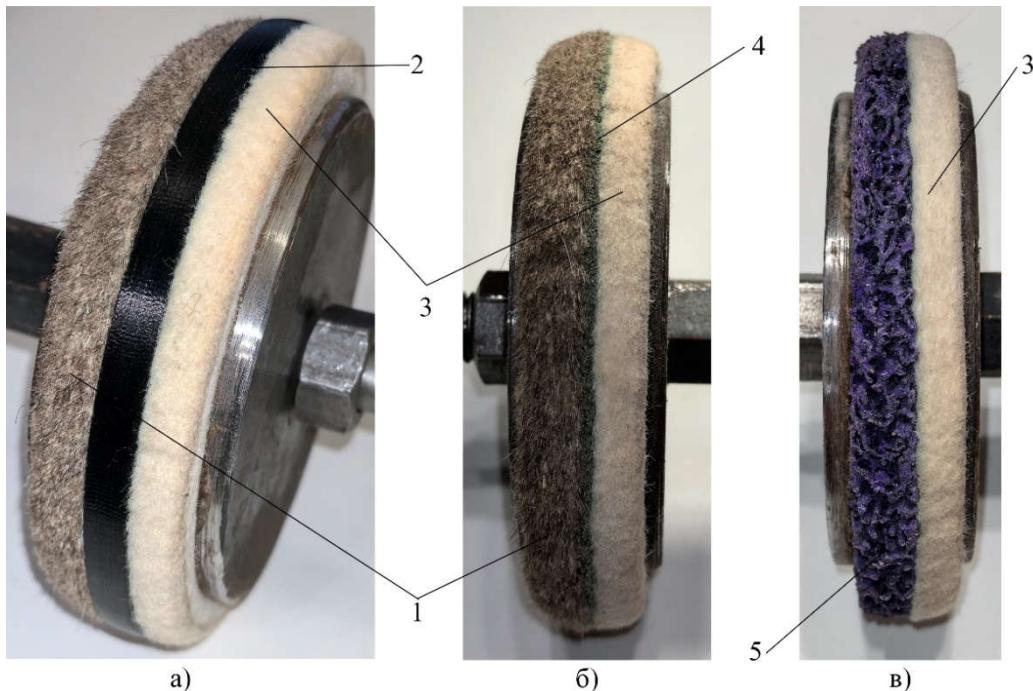


Рис. 4. Варианты общего вида комбинированного полировальника:

а – с тремя слоями различных материалов разной толщины; б – с двумя слоями различных материалов равной толщины; в – с тремя слоями различных материалов разной толщины; 1 – слой из жесткошерстного войлока; 2 – слой из полиуретана (TPU-95A); 3 – слой из мягкошерстного войлока; 4 – слой нетканого нейлонового материала с абразивной пропиткой из оксида алюминия; 5 – слой трехмерного волокна с нанесенными абразивными зернами оксида алюминия на связке из синтетических смол

Fig. 4. Variants of the general appearance of the combined polisher:

a) with three layers of different materials of different thickness; b) with two layers of different materials of equal thickness; c) with three layers of different materials of different thickness; ; 1 – a layer of coarse-wool felt; 2 – a layer of polyurethane (TPU-95A); 3 – a layer of soft-wool felt; 4 – a layer of non-woven nylon material with abrasive impregnation of aluminum oxide; 5 – a layer of three-dimensional fiber with applied abrasive grains of aluminum oxide on a bundle of synthetic resins

Применение данных кругов позволяет сократить затраты времени на смену инструмента при обработке без потери производительности, что является очень актуальным при ручном способе полирования.

При этом, помимо выбора материалов, важным аспектом является профилирование полировального круга. Круг может быть специально сформирован с учетом геометрии лопатки турбины, что обеспечит оптимальный контакт с поверхностью и позволит достичь высокого каче-

ства полировки даже на сложных участках. Профилирование может осуществляться различными способами, например, с помощью механической обработки, 3D-печати или специальных форм для прессования.

Применение таких полировальных кругов напрямую связано с применением различных полировальных паст, позволяющих достичь поставленных результатов. Так, в качестве составов для полирования можно применять как твердые полиро-

вальные пасты (например, выполненные в виде брусков отечественные пасты «Шлифовальные технологии» *GTOOL*) или жид-

кие составы (например, *3M Finesse-It Polish*). Рекомендации по применению таких материалов приведены в таблице

Таблица

Рекомендации по применению полировальных паст для слоев круга

*Table*

*Recommendations for the use of polishing pastes for circle layers*

Слой	Абразивная паста	
	3M	<i>GTOOL</i>
Жесткошерстный войлок	<i>Finesse-It Finishing Material</i> (белый)	Розовая паста
Мягкошерстный войлок	<i>Finesse-It Polish K211/K215</i>	Зеленая паста
Полиуретан (TPU-95A)	<i>Finesse-It Final Finish</i> (серый)	Белая паста
Нетканый нейлоновый материал	Не требует паст, абразив внедрён в материал	
Трехмерное волокно		

Таким образом, синтез вариантов технологического обеспечения отделочной обработки лопатки турбины включает в себя тщательный выбор материалов, многослойную конструкцию полировального

круга и его профилирование в соответствии с геометрией лопатки.

Это позволяет добиться высокого качества полировки и обеспечить требуемые эксплуатационные характеристики лопатки турбины.

## Результаты

Зона контакта устройства ППУ и обрабатываемого образца из сплава

ЭП609Ш (07Х12НМБФ-Ш) представлена на рис. 5.



Рис. 5. Зона контакта устройства ППУ и контрольного образца  
*Fig. 5. The contact area of the PUF device and the control sample*

Упрочнение проводилось в рассматриваемой зоне на протяжении равных интервалов времени, после каждого цикла упрочнения проводился визуальный контроль и контроль параметров твердости поверхностного слоя, с занесением в соответствующий протокол. По средним значениям полученных данных построен график изменения микротвердости в процессе упрочнения, приведенный на рис. 6.

Согласно полученным результатам – увеличение микротвердости поверхностного слоя заготовки составило до 10 %. Таким образом, на основании приведенных выше данных можно сделать заключение, что применение подобного устройства для упрочняющей обработки лопаток возможно и актуально, но требует дополнительной адаптации рабочих элементов, с учетом функциональных особенностей обрабатываемых изделий и их геометрии.

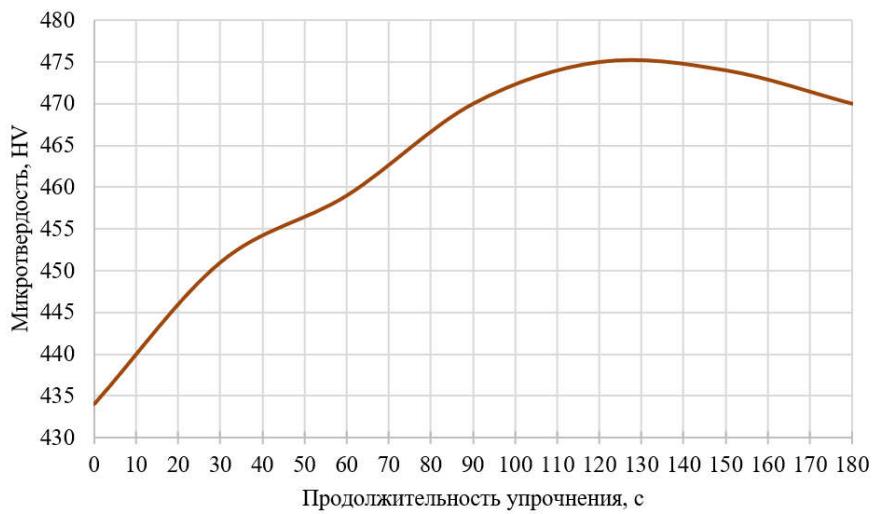


Рис. 6. График зависимости твердости поверхности лопатки от продолжительности упрочнения  
*Fig. 6. A graph of the dependence of the hardness of the blade on the duration of hardening*

## Заключение

Как следствие всего вышесказанного, можно сделать ряд следующих выводов:

1. Возможные вариации технологического обеспечения ОУО могут включать в себя всевозможные конструкторские решения, при этом их итоговое количество и выбор наиболее подходящего варианта может зависеть от множества факторов.

2. Применение методов упрочняющей обработки для придания требуемых эксплуатационных свойств функциональных элементов на профиле лопатки ГТД, в том числе, и методами поверхностно-пластического деформирования, может быть обеспечено путём синтеза специализированного технологического обеспечения, с учетом определенных ограничений на применение различных методов ОУО.

3. Синтез вариантов технологического обеспечения отделочной

обработки ЛТ ГТД, на примере процессов полирования, включает в себя тщательный выбор материалов, многослойную конструкцию полировального круга и его профилирование в соответствии с геометрией лопатки. Для достижения оптимальных результатов полировальный круг может быть изготовлен из нескольких слоев различных полировальных материалов, каждый из которых выполняет определенную функцию. При этом, помимо выбора материалов, важным аспектом является профилирование полировального круга. Круг может быть специально сформирован с учетом геометрии лопатки турбины, что обеспечит оптимальный контакт с поверхностью и позволит достичь высокого качества полировки даже на сложных участках.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Суслов, А.Г., Порошин, В.В. Комплексная система обеспечения и повышения качества и конкурентоспособности машин. Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 7(49). С. 4-7.
- Суслов, А.Г. Конструкторско-технологическое обеспечение качества и конкурентоспособности изделий машиностроения. Наукоемкие технологии в машиностроении. 2017. № 7(73). С. 25-28.
- 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 Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, Комсомольск-на-Амуре, 16–17 ноября 2023 года. Комсомольский-на-Амуре государственный университет. Комсомольск-на-Амуре, 2023. С. 3-5.

4. Михайлов, А.Н., Анастасьев, А.В., Пичко, Н.С. Методика синтеза технологического обеспечения повышения ресурса отделочно-упрочняющей обработки лопаток турбины ГТД. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2023. № 1(80). С. 41-50.
5. Михайлов, А.Н., Анастасьев, А.В., Пичко, Н.С. Основы синтеза механизма повышения ресурса лопаток турбины газотурбинного двигателя на базе функционально-ориентированного подхода. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2022. № 4(79). С. 35-43.
6. Пичко, А.П., Михайлов, Д.А., Михайлов, А.Н. Технологические особенности синтеза структуры процессов отделочно-упрочняющей обработки лопаток компрессора и турбины с функционально-ориентированными покрытиями. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2019. № 4(67). С. 56-71.
7. Хавлин, Т.В., Михайлов, Д.А., Михайлов, А.Н. Метод разработки функционально-ориентированных технологических решений для обработки поверхности пера лопаток турбин газотурбинных двигателей. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. 2019. № 2(65). С. 65-76.
8. Михайлов, А. Н. Основные принципы и особенности синтеза функционально ориентированных технологий машиностроения. Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 2(26). С. 44-53.
9. Михайлов, А.Н., Цыркин, А.Т., Петров, А.М. Обеспечение свойств изделий при синтезе функциональноориентированных технологий машиностроения. Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-2. С. 283-290.
10. Медарь, А. В. Методология технологического синтеза. Технология машиностроения. 2008. № 4. С. 78-81.
11. Михайлов, А. Н., Анастасьев, А.В., Пичко, Н.С. Синтез функционально-ориентированного технологического обеспечения для поверхностно-пластического упрочнения лопаток ГТД. Высокие технологии в машиностроении: Материалы XXI всероссийской научно-технической конференции с международным участием, Самара, 10–12 апреля 2024 года. Самарский государственный технический университет. Самара, 2024. С. 175-179.
12. Михайлов, А.Н., Анастасьев, А.В., Хавлин, Т.В., Пичко, Н.С. Синтез функционально-ориентированного материального обеспечения для отделочно-упрочняющей обработки лопаток газотурбинного двигателя. Математическое моделирование систем и процессов: сборник материалов Международной научно-практической конференции, Псков, 10–11 ноября 2022 года. Псковский государственный университет. Псков, 2022. С. 107-110. DOI 10.37490/978-5-0200-102-6-107-110.
13. Федорченко, Д.Г., Новиков, Д.К. Технологические методы повышения надёжности деталей ГТД. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. 2015. Т. 19, № 1(67). С. 62-66.
14. Кротинов, Н.Б. Поверхностное пластическое упрочнение лопаток газотурбинных двигателей. Вестник СГТУ. 2014. №3(76). С. 68-71.
15. Макаров, В.Ф., Жукотский, В.А., Бычина, Е.Н. Проблемы автоматизации финишной обработки сложнопрофильных поверхностей лопаток ГТД. Известия Тульского государственного университета. 2016. № 8-2. С. 52-55.
16. Михайлов, А.Н., Анастасьев, А.В., Пичко, Н.С. Испытание экспериментального устройства поверхности-пластического упрочнения при обработке сложных пространственных поверхностей. Технологическое оборудование для горной и нефтегазовой промышленности: сборник трудов XXII международной научно-технической конференции, Екатеринбург, 04–05 апреля 2024 года. Уральский государственный горный университет. Екатеринбург. 2024. С. 330-333.

## REFERENCES

1. Suslov AG, Poroshin VV. An integrated system for ensuring and improving the quality and competitiveness of machines. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2015;7(49):4-7.
2. Suslov AG. Design-technological support of quality and competitive ability of engineering products. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. 2017;7(73):25-28.
3. Anastasyev AV, Mikhaylov AN. Synthesis of the technological process structure for ensuring the consistency of cutting conditions during the finishing treatment of GTE blades. Proceedings of the All-Russian Scientific and Practical Conference of Young Scientists, November 16-17, 2023: Science, Innovation and Technology: From Ideas to Implementation; Komsomolsk-on-Amur: Komsomolsk-on-Amur State University; 2023.
4. Mikhaylov AN, Anastasyev AV, Pichko NS. Method of synthesis of technological support of increasing the resource of finishing and hardening treatment of GTE turbine blades. Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. 2023;1(80):41-50.
5. Mikhaylov AN, Anastasyev AV, Pichko NS. Basis of synthesis of the mechanism of increasing the resource of turbine blades of a gas turbine engine on the basis of a function-oriented approach. Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. 2022;4(79):35-43.
6. Pichko AP, Mikhaylov DA, Mikhaylov AN. Technological features of the synthesis of the structure of the process-in finishing and strengthening treatment of compressor and turbine blades with functional oriented coatings. Progressive Technologies

- and Systems of Mechanical Engineering. 2019;4(67):56-71.
7. Khavlin TV, Mikhaylov DA, Mikhaylov AN. A method of developing a functionally-oriented technological solutions for surface treatment of the pen turbine blades of gas turbine engines. Progressive Technologies and Systems of Mechanical Engineering. 2019;2(65):65-76.
  8. Mikhaylov AN. Basic principles and features of synthesis of function-oriented engineering technologies. Uprochnyaushie Tekhnologii I Pokrytiya (Strengthening Technologies and Coatings). 2007;2(26):44-53.
  9. Mikhaylov AN, Tsyrkin AT, Petrov AM. Ensuring the properties of products in the synthesis of function-oriented engineering technologies. Izvestiya Tula State University. Tula State University. Technical Sciences. 2016;8-2:283-290.
  10. Medar AV. Methodology of technological synthesis. Technologiya Mashinostroeniya. 2008;4:78-81.
  11. Mikhaylov AN, Anastasyev AV, Pichko NS. Synthesis of function-oriented technological support for surface-plastic hardening of turbine blades. Proceedings of the XXI All-Russian Scientific and Technical Conference with International Participation, April 10-12, 2024: High Technologies in Mechanical Engineering; Samara: Samara State Technical University; 2024.
  12. Mikhaylov AN, Anastasyev AV, Khavlin TV, Pichko NS. Synthesis of function-oriented material support for finishing and hardening treatment of gas turbine engine blades. Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, November 10-11, 2022: Mathematical Modeling of Systems and Processes; Pskov: Pskov State University; 2022. DOI 10.37490/978-5-00200-102-6-107-110.
  13. Fedorchenko DG, Novikov DK. Technological methods to improve the reliability of gas turbine engine. Vestnik USATU. 2015;19(1(67)):62-66.
  14. Krotinov NB. Surface plastic hardening of blades of gas turbine engines. Vestnik SSTU. 2014;3(76):68-71.
  15. Makarov VF, Zhukotsky VA, Bychina EN. Problems of automating finishing of complex-profile surfaces of gas turbine blades. Izvestiya Tula State University. 2016;8-2:52-55.
  16. Mikhaylov AN, Anastasyev AV, Pichko NS. Testing of an experimental surface-plastic hardening device for processing complex spatial surfaces. Proceedings of the XXII International Scientific and Technical Conference, April 04-05, 2024: Technological Equipment for Mining, Oil and Gas Industry; Yekaterinburg: Ural State Mining University; 2024.

#### Информация об авторах:

**Михайлов Александр Николаевич** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Технология машиностроения», тел. +79493060879.

**Mikhailov Aleksandr Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, phone: +79493060879.

**Анастасьев Александр Владимирович** – старший преподаватель кафедры «Автомобильный транспорт», тел. +79493497428.

**Anastasiev Aleksandr Vladimirovich** – Senior Lecturer at the Department of Road Transport phone: +79493497428.

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

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

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

**Статья поступила в редакцию 09.01.2025; одобрена после рецензирования 14.01.2025; принятая к публикации 30.01.2025. Рецензент – Нагоркин М.Н., доктор технических наук, доцент Брянского государственного технического университета.**

**The article was submitted to the editorial office on 09.01.2025; approved after review on 14.01.2025; accepted for publication on 30.01.2025. The reviewer is Nagorkin M.N., Doctor of Technical Sciences, Associate Professor of Bryansk State Technical University.**