

## Материаловедение и технологии материалов Material Science and Materials Engineering

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 629.7.036.3-253.5.004.15

doi: 10.30987/2782-5957-2022-5-30-43

### К ВОПРОСУ СЕРИЙНОСТИ РАБОТ ПО НАНЕСЕНИЮ ЗАЩИТНЫХ НАНОПОКРЫТИЙ НА РЕСУРСОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ДЕТАЛИ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК АВИАЦИОННОЙ И НАЗЕМНОЙ ТЕХНИКИ

Вадим Викторович Быкадоров<sup>1✉</sup>, Александр Анатольевич Данилейченко<sup>2</sup>,  
Дмитрий Иванович Любченко<sup>3</sup>

<sup>1, 2, 3</sup>Луганский государственный университет имени Владимира Даля; г. Луганск, Луганская Народная Республика

<sup>1</sup> 311transport@gmail.com

<sup>2</sup> 280376@rambler.ru

<sup>3</sup> vottako@rambler.ru

#### Аннотация

Целью исследования является создание научных основ практического внедрения новых методов серийного ремонта ресурсопределяющих деталей с упрочняющими эрозионно стойкими нанопокрывтиями, подвергающимися в эксплуатации повышенному эрозионному износу.

Задача, решению которой посвящена статья, состоит в проведении исследований достоверности и технической эффективности разработанных предложений по внесению дополнений в действующую руководящую и технологическую документацию на серийный капитальный ремонт газотурбинных двигателей.

В процессе исследования применены методы: нанесение ионно-плазменных покрытий в вакууме, разрушающий (замеры микротвердости и эрозионной стойкости покрытий) и неразрушающий (инструментальный) контроль, ручная и иная обработка поверхности исследуемых деталей, математическая статистика и экспертная оценка при проведении и обработке результатов экспериментальных исследований.

Новизна работы состоит в использовании при последующем ремонте сведений о компрессор-

ных лопатках с изношенными в эксплуатации многослойными разнооттеночными упрочняющими нанопокрывтиями, особенности нанесения которых следует фиксировать в отчетной производственной ремонтной документации при предыдущем ремонте этих же лопаток.

В качестве результатов исследований выступают: подтверждение установленных ресурсных характеристик компрессорных лопаток, снижение производственного брака при ремонте лопаток с остатками высокопрочных нанопокрывтий, сохранение условий обеспечения серийности капитального ремонта газотурбинных двигателей.

Выводы. Проведенные теоретические расчеты и практические исследования предложенных методов ремонта ресурсопределяющих деталей с многослойными разнооттеночными защитными нанопокрывтиями обеспечивают как заданные требования эксплуатационной надежности газотурбинных двигателей, так и серийность капитально восстановительных работ.

**Ключевые слова:** газотурбинный двигатель, компрессор, лопатка, ремонт, ресурс, эрозионный износ.

Ссылка для цитирования:

Быкадоров В.В. К вопросу серийности работ по нанесению защитных нанопокрывтий на ресурсопределяющие детали силовых установок авиационной и наземной техники / В. В. Быкадоров, А. А. Данилейченко, Д. И. Любченко // Транспортное машиностроение. – 2022. - № 5. – С. 30–43 . doi: 10.30987/2782-5957-2022-5-30-43.

Original article

Open Access Article

### ON THE PROBLEM OF SERIAL WORKS ON THE APPLICATION OF PROTECTIVE NANOCOATINGS TO THE RESOURCE- SAVING COMPONENTS OF POWER PLANTS OF AVIATION AND GROUND EQUIPMENT

The study objective is to develop the scientific foundations for the practical implementation of new methods of serial repair of resource-saving parts with erosion-resistant nanocoatings, which are subjected to increased erosion wear in operation.

The problem to which the paper is devoted is to study the reliability and technical effectiveness of the developed proposals for making additions to the current regulatory and technological documents for the serial overhaul of gas turbine engines.

For the study the following methods are applied: application of ion-plasma coatings in vacuum, destructive (measurements of micro-hardness and erosion resistance of coatings) and non-destructive (instrumental) control, manual and other surface treatment of the studied parts, mathematical statistics and expert judgement while conducting and analysing experimental research results.

The novelty of the work is in the use of information about compressor blades with multi-layer, mul-

ti-shade reinforcing nanocoatings worn out in operation during subsequent repair. Their application should be fixed in the reporting production repair documents during the previous repair of the same blades.

Study results: confirmation of the defined resource characteristics of compressor blades, reduction of production defects during the repair of blades with remnants of high-strength nanocoatings, preservation of the conditions for ensuring the serial overhaul of gas turbine engines.

Conclusions. The theoretical calculations and practical studies of the proposed methods for repair of resource-saving components with multilayer multi-shade protective nanocoatings provide both the specified requirements for the operational reliability of gas turbine engines and the serial overhaul.

**Keywords:** gas turbine engine, compressor, blade, repair, resource, erosive wear.

*Link for citation:*

*Bykadorov V.V. On the issue of seriality of works on applying protective nanocoats to resource-determining parts of power plants of aviation and ground equipment / V. V. Bykadorov, A. A. Danileichenko, D. I. Lyubchenko // Transport Engineering. – 2022. - No. 5. – pp. 30-43. doi: 10.30987/2782-5957-2022-5-30-43.*

## Введение

Современные требования к обеспечению заданной работоспособности всех видов техники определяются, с одной стороны, необходимостью поддержания требуемого уровня надежности и безопасности эксплуатации [1], с другой, соблюдением экономических характеристик их эксплуатации и ремонта [2]. Для газотурбинных двигателей (далее – ГТД) деталями, обеспечивающими выполнение указанных требований, являются, в первую очередь, лопатки компрессоров и турбин, подшипники, шестерни, уплотнения.

Техническое состояние компрессорных лопаток существенно влияет на эксплуатационную надежность ГТД и последующую затратность их ремонта. Основные повреждения лопаток компрессоров возникают от попадания в газо-воздушный тракт двигателя посторонних предметов и от эрозионного износа пера лопаток. При-

чем второй фактор наблюдается в три раза чаще первого [3, 4].

Эрозионный износ пера компрессорных лопаток исследуется много лет [5, 6] и по различным направлениям. Так, анализ распределения пылевых частиц по компрессору ГТД представлен в [7]. В [8, 9] показаны особенности износа компрессорных лопаток.

На данный момент накоплено большое количество научно-технической информации по защите поверхности деталей от эрозионных повреждений. Например, [10-13] раскрывают различные свойства покрытий, [14-17] – методы и технологии нанесения высокопрочных защитных нанопокровов. Большинство исследований посвящено относительно недорогим, но эффективным покрытиям на основе нитрида титана TiN.

Нанесение на компрессорные лопатки различных типов нитрид титановых по-

крытий снижает на 15...25 % скорость эрозионного износа, обеспечивая силовым установкам полную или близкую к полной выработки установленных межремонтных ресурсов, что особенно важно в условиях повышенной запыленности воздуха.

Однако, не смотря на многочисленность разработанных технологий нанесения нанопокровтий на лопатки, удаление их остатков во время ремонта ГТД проблематично. Причиной тому – высокая микротвердость защитных пленок, достигающая для нитрид титанового нанослоя стандартной толщиной от 4 мкм до 7 мкм около 24 ГПа, в ряде случаев и более, а также неравномерность эрозионного изно-

са защитного покрытия по длине и ширине пера лопатки. Причем по ступеням компрессора степень износа также различна. Пример такой неравномерности представлен на правом снимке рис. 1, где входная кромка пера лопатки, выработавшая межремонтный ресурс, уже лишилась защитного покрытия, далее следует переходная зона с неравномерными остатками нитрид титанового слоя, за ней – начальная стадия эрозионного износа покрытия, и ближе к выходной кромке пера – целое покрытие, близкое к своему первоначальному состоянию, которое показано на левом снимке рис. 1.



Рис. 1. Примеры состояния компрессорных лопаток ГТД в начале эксплуатации и при поступлении в ремонт  
*Fig. 1. Examples of the state of the compressor blades of the GTE at the beginning of operation and upon receipt of overhaul*

Капитальный ремонт компрессорных лопаток, если заказчик ремонта желает получить двигатель в состоянии подобно левому снимку рис. 1, подразумевает полное восстановление такого покрытия взамен

изношенного. Так, на рис. 2 представлена лопатка с восстановленным нитрид титановым покрытием.



Рис. 2. Лопатка с нитрид титановым покрытием  
*Fig. 2. Blade with titanium nitride coating*



Рис. 3. Подготовленная лопатка под нанесение покрытие TiN  
*Fig. 3. Prepared blade for application TiN coating*

Одним из условий ремонта покрытия является подготовка поверхности пера лопатки,

закключающаяся в ее шлифовке и полировке до 9–10 класса чистоты поверхности

(рис. 3). Если не выдержать требуемой чистоты поверхности, качество наложения слоя нитрид титана на поверхность пера лопатки окажется неудовлетворительным.

Подготовка пера лопатки под наложение слоя нитрид титана с полировкой под 9 – 10 класс чистоты поверхности – процесс длительный во времени, трудоемкий. Выполняется он на полировальных бабках вручную (рис. 4) и, будучи одним из технологических этапов ремонта ГТД, характеризуется как одно из «узких мест» в серийном капитальном ремонте на стационарных предприятиях.

Сложность и трудоемкость снятия остатков изношенного высокопрочного покрытия зачастую приводит к появлению производственного брака в виде пережогов краев лопаток (рис. 5). Такой брак возникает, когда исполнитель работ пытается шлифовальными или полировальными кругами (рис. 4) полностью удалить остатки изношенных высокопрочных покрытий и подготовить поверхность в соответствии с рис. 3.

Практика заводского капитального ремонта лопаток показывает, указанный производственный брак высоковероятен при освоении технологических операций, у неопытного или уставшего к концу рабочей смены исполнителя работ, при отсутствии информации, как близко обрабатываемый круг приблизился к основному материалу пера лопатки (какая толщина остатков покрытия остается под удалением) и когда следует снижать усилия прижатия лопатки к обрабатываемому кругу.

В связи с тем, что обработка компрессорных лопаток с нитрид титановыми покрытиями сложна из-за микронных толщин изношенных защитных пленок, сложного профиля пера, вариативных размеров и количества самих лопаток в узле (например, в ГТД ТВ3-117 894 роторных и 844 статорных лопаток), а также из-за различных степеней эрозийного износа покрытия по ступеням компрессора, исследовательские работы по удалению нитрид титановых покрытий получили ограниченное развитие, относятся скорее к опытным, единичным работам на отдельно взятых лопатках и не соответствуют требованиям

серийного заводского капитального ремонта по критерию «затраты-время-эффективность-качество».

Например, в [18 – 21] предлагается удаление нитрид титанового покрытия с



Рис. 4. Ручная обработка лопаток  
*Fig. 4. Manual processing of the blades*

пера лопатки гальваническим методом травления в растворах различного химического состава. Повтор предлагаемых работ на производственной базе авиационного ремонтного предприятия подтвердил положительные результаты удаления целостного, без эксплуатационного износа нитрид титанового покрытия, соответствующего рис. 2.

Однако попытки удаления изношенного покрытия на лопатках, поступивших



Рис. 5. Пример производственного брака от пережога краев лопаток при их ремонте  
*Fig. 5. An example of a manufacturing defect from the burning of the edges of the blades during their overhaul*

в ремонт с эксплуатации (подобно правому снимку на рис. 1) выявили одновременно с удалением изношенных слоев нитрид титана подтравливание основного металла лопатки при продолжении травления более толстых или менее изношенных слоев покрытия.

Для лопаток последних ступеней компрессора, представление об их разме-

рах дает рис. 6, одновременное травление с более крупными лопатками первых ступеней компрессора ведет к производственному браку по недопустимому утонению толщины пера малогабаритных лопаток.

Введение раздельного по ступеням компрессии травления требует увеличения либо гальванических ванн и расходных материалов, либо времени на поэтапное выполнение работ по ступеням компрессора.

Кроме того, оперативный контроль над ходом травления с целью определения момента его окончания также приводит к повышенным трудозатратам исполнителей. К этому следует прибавить затраты на последующую промывку лопаток в чистой

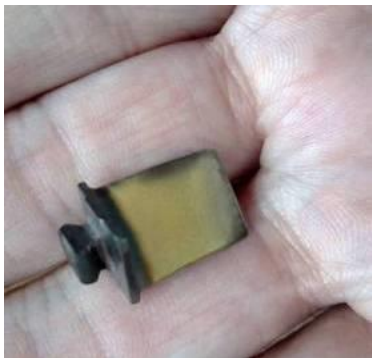


Рис. 6. Износ защитного покрытия на лопатке последней ступени компрессора ГТД

*Fig. 6. Wear of the protective coating on the blades of the last stage of the GTE compressor*

воде и их дальнейшее упрочнение, например, галтовкой и полировку под требуемый класс чистоты поверхности.

Как вывод, предлагаемые в [18-21] способы удаления остатков нитрид титановых покрытий не соответствуют заводскому критерию «затраты-время-эффективность-качество» и малопригодны для соблюдения условий серийности среднего и крупного ремонтного производства.

Альтернативой гальваническим методам удаления нитрид титановых покрытий следует назвать «опорное полирование» по [22]. Данная технология предусматривает механическое, на станочном оборудовании, удаление покрытий с пера лопатки. Сущность метода состоит в «опи-

рании» на менее поврежденную эрозией поверхность покрытия одной частью зоны соприкосновения обрабатывающего круга, а другая часть этой же зоны круга удаляет примыкающий более изношенный слой покрытия до оголения основного металла лопатки. При этом вращающийся круг постепенно передвигается вдоль и поперек пера лопатки.

Проанализировав предложенный метод ремонта лопаток, выявлены три проблемных фактора. Первый. Для выполнения таких работ требуется закупка нового оборудования ЧПУ с соответствующим программным обеспечением (в авиаремонтных предприятиях отсутствуют станки, способные обрабатывающим инструментом повторять сложные профили пера компрессорных лопаток). Второй. Не уточняется, каким образом компенсируется постепенное изменение диаметра обрабатывающего круга для поддержания необходимого усилия его прижатия в опорной зоне на пера лопатки. Третий. Не дается пояснений, как избежать производственного брака при нежелательном, но неизбежном соприкосновении вращающегося абразивного круга с соседними поверхностями крученого корыта лопатки. Указанные факторы требуют дополнительного решения выявленных проблем.

Анализ предложений по [18 - 22] показал, данные технологии не в полной мере отвечают заводскому критерию «затраты-время-эффективность-качество», т.к. не удовлетворяют требованиям серийности капитального ремонта ГТД с точки зрения минимальных длительности и затратности выполнения технологических операций, сложности оперативного контроля качества и соблюдения ритмичности производственного процесса.

В отличие от выше изложенных попыток ремонта компрессорных лопаток ниже представлены результаты проведенных на серийном авиаремонтном производстве исследовательских и опытных работ по ремонту компрессорных лопаток ГТД с остатками изношенных эрозионно стойких нитрид титановых покрытий, и выработаны предложения по внедрению их в серийное ремонтное производство.

## Материалы, модели, эксперименты и методы

Исследовательские работы по нанесению защитных нанопокровов на ресурсоопределяющие детали силовых установок авиационной и наземной техники в условиях серийного капитального ремонта силовых установок проводились в три этапа.

На первом этапе проведен подбор и изучение возможности нанесения на компрессорные лопатки ГТД нового, в сравнении с нитрид титановым покрытием, более высокопрочного износостойкого покрытия, способного существенно повысить эффективность силовых установок авиационной и наземной техники. Подбор нового покрытия производился согласно критерию

«затраты\_на\_приобретение\_и\_нанесение-микротвердость-эрозионная\_стойкость», определяющему политику качества ремонтного предприятия в отношении обеспечения послеремонтной надежности силовых установок авиационной и наземной техники.

На втором этапе разработано предложение по чередованию нескольких слоев покрытий на основе нитрид титана, при этом за основу брался критерий ремонтного производства «затраты-время-эффективность-качество», определяющий серийность производственного процесса. Проведено математическое моделирование и выполнены расчеты по определению экономической эффективности указанного предложения.

Третий этап объединил в себе проведение исследовательских работ на базах Луганского государственного университета им. В.Даля и авиационного ремонтного завода. Проведено нанесение на роторные и статорные лопатки выбранного многослойного разнооттеночного покрытия на основе нитрид титана. Опытным путем проверена износостойкость полученного таким образом многослойного покрытия, а также в условиях ремонтного производства проверена ремонтпригодность изно-

шенного многослойного разнооттеночного многослойного покрытия. Подтверждены правильность математического моделирования эффективности разработанных предложений и соответствие требованиям критерия «затраты-время-эффективность-качество». По результатам работ подготовлено предложение по внесению дополнений в руководящую ремонтную документацию на серийный капитальный ремонт силовых установок авиационной и наземной техники.

В ходе работ использована научно-техническая документация по высокопрочным эрозионно стойким нанопокровым, изучены находящиеся в свободном доступе к информации результаты иных исследований, предложений и патентов научно-исследовательских отечественных и иностранных организаций и ВУЗов, проанализированы исследования и коммерческая реклама отечественной авиационной промышленности и авиационных ремонтных предприятий, опыт заводского капитального ремонта силовых установок вертолетной техники, а также эксплуатационная послеремонтная надежность вертолетных ГТД с эрозионно стойкими нанопокровыми на компрессорных лопатках.

Для проведения исследований задействованы вакуумная установка ионно-плазменного напыления «Булат-6», технологическая линия нанесения/снятия гальванических покрытий, твердомер ПМТ-3, оптический микроскоп увеличением  $\times 100$ , весы тип ТВЕ с точностью 1 мг, технологические стенд пескоструйной обработки поверхностей деталей с использованием электрокорундового песка 14А F60 дисперсностью от 100 мкм до 300 мкм под давлением  $0,32 \pm 0,02$  МПа, напольный стационарный полировальный станок модели С-3086 с кругами шлифовальными типа ПП 150x20x32 64С 10-16 ПФ и кругами войлочными полировальными типа Т 120x20 64С 6-12, муфельная электропечь типа КЭП (СНОЛ), часы.

## Результаты

В ходе исследований установлено, с точки зрения цены и износостойкости оптимальным является циркониевый нитрид титана,

имеющий микротвердость 34 ГПа против 24 ГПа у нитрида титана.

Нанопокровы на лопатки наносились в установке «Булат-6». Далее лопатки

на технологическом стенде пескоструйной обработки поверхностей деталей подвергались с замером времени воздействию стендового эрозионного износа и нагреву, имитирующих эксплуатационный износ, но в более жестких условиях убыстрения такого процесса. Исследования производились по-отдельности на лопатках с однослойными, двухслойным (TiZrN+TiZrN) и трехслойными (TiZrN+TiN+TiZrN) покрытиями.

Для обоснования ввода в структуру покрытия циркониевого нитрида титана в данной статье представлена часть математической модели расчета повышения эксплуатационной эффективности эрозионной

$$T_{\text{выр.вх.кр.}} = \sum_s T_{\text{выр.защитн.покр.}} + T_{\text{выр.осн.матер.}}, \quad (1)$$

где:  $T_{\text{выр.защитн.покр.}}$  – время последовательного износа каждого расположенного друг на друге защитного покрытия;  $s$  – количество таких защитных покрытий на входной кромке пера лопатки;  $T_{\text{выр.осн.матер.}}$  – время износа оголенной входной кромки лопатки из сплава ВТ-8.

Данная формула также применима и для экспериментальных стендовых исследований, где параметры обдува пера лопатки, превышающие значения по [10], обоснованно следует считать частично соответствующими условиям эксплуатации, однако отражающими качественные показатели стойкости основного материала лопатки и нанесенного на него защитного покрытия.

защиты компрессора, предусматривающая расчет наработки в часах (минутах стендовых испытаний) силовой установки по времени выработки входной кромки лопатки первой ступени компрессора ГТД ТВЗ-117, имеющей защитные нанопокрyтия, до предельно допустимых в эксплуатации значений (максимально допустимые эксплуатационные требования – провал (эрозионный износ, истирание, уменьшение длины) по хорде пера лопатки минус 2 мм).

В общем виде длительность выработки входной кромки  $T_{\text{выр.вх.кр.}}$  в часах (или минутах) определяется:

Время выработки оголенного сплава ВТ-8 по входной кромке пера лопатки определяется по формуле

$$T_{\text{выр.осн.матер.}} = \frac{M_{\text{матер.вх.кр.}}}{V_{\text{износ.матер.вх.кр.}}}, \quad (2)$$

где  $T_{\text{выр.осн.матер.}}$  – время, длительность выработки в часах оголенной входной кромки пера лопатки (в данном случае первой ступени ротора компрессора двигателя ТВЗ-117);  $M_{\text{матер.вх.кр.}}$  – масса основного материала ВТ-8 лопатки, подвергаемая уносу вплоть до максимально предельной выработки в эксплуатации по провалу по хорде на 2 мм;  $V_{\text{выр.матер.вх.кр.}}$  – скорость уноса материала этой же лопатки, определяемая стендовыми исследовательскими работами, их результаты представлены в табл.

$M_{\text{матер.вх.кр.}}$  предстает как масса входной кромки лопатки, подвергающейся уносу из-за эрозионного воздействия и определяется через плотность материала и объем (ширина износа, высота и толщина зоны входной кромки лопатки по ширине износа в 2 мм):

$$M_{\text{матер.вх.кр.}} = \rho(\text{ДВШ}) \quad (3)$$

После соответствующих вычислений формула (3) для ВТ-8 приобретает вид:

$$T_{\text{выр.осн.матер.ВТ8}} = \frac{\rho(\text{ДВШ})}{V_{\text{износ.матер.вх.кр.}}} \quad (4)$$

Формулы (2, 3) применимы для расчетов по циркониевому нитрид титану и нитрид титану, если вместо плотности ВТ-8 в них внести значения плотности этих защитных покрытий. При этом значения  $D$  допустимо оставить без изменений.  $B$  и  $Ш$  следует

считать как увеличение этих параметров за счет толщины нанопленки  $T$ .

Тогда для слоя покрытия, который работает в комплексе с основным материалом, формула расчета времени износа приобретает вид:

$$T_{\text{выр.покрыт.}} = \frac{\rho(D(B+T)(Ш+2sT))}{V_{\text{износ.покрыт.}}}, \quad (5)$$

где  $T$  – толщина нанопленки, способная выполнять свои защитные функции на подложке или нижнем слое покрытия; в расчетах целесообразно принять минимальную толщину в 5 мкм;  $s$  – очередность наложенного слоя, увеличивающего лобовую ширину входной кромки лопатки под износ.

Формула (5) применима для любого количества накладываемых на лопатку слоев эрозионно стойкого защитного покрытия.

Расчеты времени по математической модели выполнены по значениям колонки 1 таблицы, итоговые значения внесены в колонку 3 этой же таблицы.

Достоверность теоретических расчетов подтверждена практическими исследованиями.

На рис. 7 представлен внешний вид компрессорных лопаток ТВ3-117 и их покрытий на промежуточных и конечных результатах пескоструйной обработки лопаток. Левый снимок – две лопатки в процессе стендовой имитации эксплуатационного эрозионного износа (частичный износ

покрытия). Правый снимок – две лопатки после полного удаления защитных покрытий (полный износ, покрытие выработано).

Полученные результаты оформлены таблицей, где строка 4) по колонке 1 содержит фактическое значение износостойкости трехслойного чередующегося покрытия на основе нитрид титана.

Исследования проводились в четырех температурных условиях: нормальные условия Н.У. (15 °С, соответствует приведенной температуре наружного воздуха для заводских стендовых испытаний ГТД) и три различных температуры нагрева лопаток с покрытием.

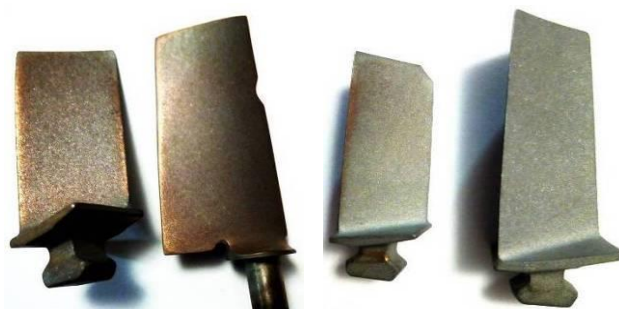


Рис. 7. Состояние защитного покрытия лопаток на разных этапах имитации эксплуатационного эрозионного износа

Fig. 7. The condition of the protective coating of the blades at different stages of simulation of operational erosion wear

Показатели стойкости исследуемых покрытий при нормальных условиях

Таблица

Table

Indicators of the durability of the studied coatings under normal conditions

Лопатка	Скорость эрозионного износа, г/мин		Время износа по ММ, мин.
	факт	по [24]	
	1	2	
1) без покрытия, материал ВТ-8	0,036	0,036	12,3
2) с нитрид титаном TiN	0,029	0,028	29,9
3) с циркониевым TiZrN	0,013	0,012	94,4
4) с TiZrN+TiN+TiZrN (усредненно как один монослой)	0,024	---	129,7



Нагрев лопаток с покрытиями производился в термопечи, имитируя температуру  $T_2$  (температура после компрессора перед камерой сгорания), которая меняется

в зависимости от режимов работы ГТД (здесь – ТВ3-117). Результаты представлены на графике рис. 8.

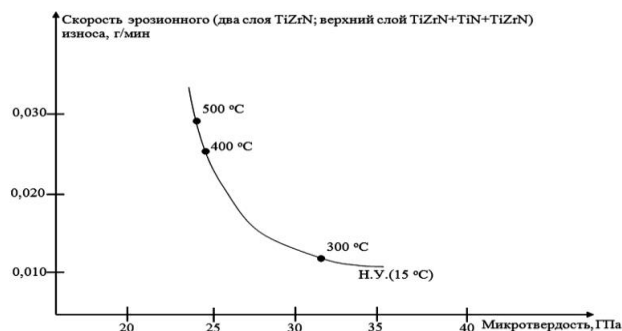


Рис. 8. Изменение рабочих характеристик защитных покрытий на основе нитрида титана при нагреве компрессорных лопаток до температур в компрессоре ГТД ТВ3-117

*Fig. 8. Changing the performance characteristics of protective coatings based on titanium nitride when the compressor blades are heated to temperatures in the compressor of GTE TV3-117*

Эти исследования проведены на двух вариантах покрытия: два слоя циркониевого нитрида титанового покрытия (нижний слой имитирует слой-подложку трехслойного покрытия), трехслойное чередующееся покрытие по строке 4 таблицы. Выбор трехслойного покрытия  $TiZrN+TiN+TiZrN$  обусловлен следующими причинами: а - положительными результатами исследований на эрозионную стойкость, изложенными в данной работе; б - относительной дешевизной, удорожание нанесения  $TiZrN$  в сравнении с одним слоем нанопокрyтия  $TiN$  составило 63 %, определение цен высчитано по покрытиям из [9]; в - максимальной гарантированной достаточностью трехслойного покрытия для выработки ГТД ТВ3-117 межремонтного ресурса МРР 1500 часов без эрозионного повреждения основного материала ВТ-8 лопаток, что гарантирует их последующую ремонтпригодность при капитальном ремонте ГТД; г - визуальным для исполнителя такого ремонта различием цветовых оттенков между слоем  $TiZrN$  и слоем  $TiN$ . Так, например, замер времени эрозионной стойкости трехслойного покрытия  $TiZrN+TiN+TiZrN$  позволил визуально контролировать износ верхнего циркониевого нитрида титанового покрытия с переходом эрозионного воз-

действия к следующему, ниже лежащему слою, в данном случае нитрид титановому покрытию и т.д.

Используя эффект разноотте-точности многослойных покрытий, авторами статьи предложен и проверен на производственной базе авиаремонтного предприятия новый метод ремонта компрессорных лопаток как ресурсопределяющих деталей с остатками эрозионно стойких защитных нанопокрyтий. Метод отличается от предложений по [19 – 23] сохранением стандартной технологии ремонта лопаток с использованием имеющегося на каждом авиаремонтном предприятии предусмотренного руководящей ремонтной документацией станочного оборудования (рис. 4). Преимущество состоит в предоставлении исполнителю работ возможности, по предварительному знанию им очередности ранее нанесенных различных по цветовой гамме слоев покрытия, оперативно визуально определять свои усилия прижима пера лопатки к обрабатываемому кругу. Это позволяет доводить поврежденные эрозионным износом слои защитных покрытий под 9-ю или 10-ю чистоту поверхности пера лопатки без необходимости, как это предлагается в [19 – 23], полного снятия таких покрытий.

Снимок на рис. 9 демонстрирует по предложенному методу практический результат ремонта двух разнооттеночных слоев нитрид титана и циркониевого нитрид титана под нанесение нового противозерозионного защитного покрытия. Показана лопатка после ручной подготовки поверхности, доведенной до 9-го класса чистоты поверхности. На снимке различимы более светлые и более темные оттенки слоев нитрид титана и циркониевого нитрид титана, а также частично оголенная поверхность металла лопатки после ее ремонта.



Рис. 9. Пример заполировки лопатки без полного удаления остатков защитных покрытий  
*Fig. 9. An example of polishing a blade without completely removing the remnants of protective coatings*

### Заключение

Результаты исследований и опытных работ показали, в процессе заводского ремонта лопаток компрессоров ГТД полное удаление остатков изношенных эрозионно стойких нанопокровов под нанесение новых нецелесообразно с точки зрения соблюдения требований серийности капитального ремонта силовых установок авиационной и наземной техники. Для этого достаточна на станочном оборудовании ручная, шлифовальными и полировальными кругами, обработка остатков покрытий без полного их удаления до девятого класса чистоты поверхности пера лопаток, чем сокращаются трудозатраты на ремонт лопаток под наложение новых защитных слоев эрозионно стойких нанопокровов.

Предотвращение возникновения производственного брака в виде пережога или недопустимого уточнения пера ремонтируемой лопатки обеспечивается заблаговременным, при предыдущем заводском ремонте, нанесением на ее перо нескольких чередующихся визуально различимых разнооттеночных слоев нанопокровов. Ремонт таких слоев позволяет своевремен-

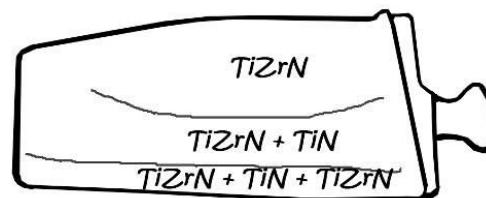


Рис. 10. Вариант внесения информации в дело ремонта об особенностях нанесенных защитных покрытий на лопатку

*Fig. 10. The option of entering information into the overhaul Case about the features of the applied protective coatings on the blade*

Порядок и количество наложения новых слоев на подготовленные для этого остатки старых покрытий должны указываться в заводском технологическом процессе ремонта лопаток и фиксироваться исполнителем в отчетной технологической ремонтной документации (Деле ремонта деталей узла компрессора). Схематично, в принципиальном виде, оформление исполнителем в Деле ремонта сведений о слоях покрытия показано на рис. 10. Как и заполнение самого Дела, указанное оформление производится вручную.

но переходить от шлифовки к заполировке остатков слоев ранее нанесенного защитного покрытия без критичного ремонта основного материала лопатки.

Для сохранения ремонтпригодности компрессорных лопаток из сплава ВТ-8 выработка стандартного или продленного по техническому состоянию межремонтного ресурса силовых установок без существенного эрозионного повреждения основного материала компрессорных лопаток достигается наложением на них многослойного разнооттеночного покрытия, например,  $TiZrN+TiN+TiZrN$ .

Тип, конфигурация и количество слоев может устанавливаться во внутриводской технологической и фиксироваться в отчетной ремонтной документации.

Для снижения производственных затрат на ремонт компрессорных лопаток с эрозионным износом их очередной капитальный ремонт целесообразно выполнять на том же ремонте предприятия, которое ранее наносило такие слои нанопокровов и располагает информацией о конфигурации и количестве наложенных на компрессорные лопатки слоев.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Тарасенко Ю.П., Кривина Л.А., Фель Я.А. Использование наноструктурированного ионно-плазменного покрытия нитрида титана для повышения износостойкости плунжерных пар топливных насосов. Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2014;3 (31):142–148.
2. Носов М.В. Оценивание эффективности эксплуатации технических систем на основе модели теории марковских процессов. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-effektivnosti-ekspluatatsii-tehnicheskikh-sistem-sredstv-na-osnove-modeli-teorii-markovskih-protssessov/viewer>.
3. Еникеев Г.Г. Комплексная защита газотурбинного двигателя, эксплуатирующегося в запыленной атмосфере и морской среде. Вестник Уфимского государственного авиационного технического университета. Авиационная и ракетно-космическая техника. 2000;3;1:С.41–48.
4. Статистические данные по забраковке лопаток ротора компрессора двигателей ТВ3-117 за период с 2009 по 2013 годы. Луганск: Луганский авиационный ремонтный завод, 2018.
5. Мубояджян С.А. Мы впервые в мировой практике применили принцип конструирования покрытия. URL: <https://viam.ru/interview/2044>.
6. Белан Н.В., Омельченко В.В., Прокопенко А.Н. и др. Повышение эрозионной стойкости рабочих лопаток компрессора ГТД. Авиационная промышленность. 1986;1:С. 19–20.
7. Алексеев В.К., Волкова Л.Ф., Гликсон И.Л., Лукьянов В.С. Распределение пылевых частиц в проточной части компрессора. Авиационная промышленность. 1989;7:24 – 25.
8. Ефанов В.С., Прокопенко А.Н., Овчинников А.В., Внуков Ю.Н. Эрозионная стойкость лопаток компрессора вертолетных ГТД с различными типами покрытий. Авиационная промышленность. 2017;1:122–123.
9. **Павленко Д.В., Двирник Я.В.** Закономерности изнашивания рабочих лопаток компрессора вертолетных двигателей, эксплуатирующихся в условиях запыленной атмосферы. Вестник двигателестроения. Технология производства и ремонта. 2016;1:44, 46.
10. Юрьев Е.Н., Михневич К.С., Кривобоков В.П. и др. Свойства пленок нитрид титана, полученных методом магнетронного распыления. Известия Самарского научного центра РАН. 2014;16;4(3):672 – 676.
11. Хамдохов А.З. Структурно-фазовая однородность субмикронных пленок нитрида титана и способы ее повышения: диссертация кандидата технических наук : Нальчик, 2017. – 103 с.
12. Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей. URL: <https://viam.ru/public/files/2007/2007-204852.pdf>. Дата обращения 15.11.2020.
13. Мубояджян С.А., Александров Д.А., Горлов Д.С., Егорова Л.П., Булавинцева Е.Е. Защитные и упрочняющие ионно-плазменные покрытия для лопаток и других ответственных деталей компрессора ГТД. URL: <https://viam.ru/public/files/2012/2012-206071.pdf>.
14. Способ нанесения защитного покрытия газотермическим напылением: патент № 2430992 Росс. Федерация / Наговицын Е.М., Шаронова Н.И., Гейкин В.А. [и др.] – заявл. 12.04.2010; опубл. 27.10.2011. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/243/2430992.html>.
15. Дабижа Е.В., Лещук А.А., Бондарь И.В., Борисова Н.Н. Получение эрозионно- и жаростойких многослойных покрытий для лопаток ГТД способом микроэлектродугового ионно-плазменного вакуумного распыления материалов. Современная электрометаллургия. Плазменно-дуговая технология. URL: <https://patonpublishing-house.com/sem/pdf/2013/pdfarticles/01/6.pdf>.
16. Патент № 2718877 RU. С23С 14/04. Способ нанесения функционально-ориентированного износостойкого покрытия на лопатку газотурбинного двигателя / А.Н. Михайлов, Д.А. Михайлов, В.А. Михайлов, Е.А. Шейко, А.П. Пичко, Н.С. Пичко, В.И. Сухарев. Заявка № 2018107164 от 26.02.2018. – Бюл. № 11, 15.04.2020. – 7 с.
17. Михайлов Д.А. Технологическое обеспечение повышения работоспособности лопаток компрессора газотурбинного двигателя на основе функционально ориентированных покрытий: автореферат дис. на канд. техн. наук. URL: [http://donntu.org/sites/default/files/documents/avtor\\_eferat\\_0.pdf](http://donntu.org/sites/default/files/documents/avtor_eferat_0.pdf).
18. Добрынин Д.А., Яцок И.В., Доронин О.Н. Удаление упрочняющих покрытий на основе нитридов титана и циркония с поверхности деталей из титановых сплавов. Защитные и упрочняющие покрытия. Труды ВИАМ. URL: <http://www.cyberleninka.ru/article/n/udalenie-uprochnyayuschih-pokrytiy-na-osnove-nitridov-titana-i-tsirkoniya-s-poverhnosti-detaley-iz-titanovyh-splavov/viewer>.
19. Раствор для удаления покрытия из нитрида титана: патент № 2087591 Рос. Федерация / Остапов О.В., Хазанская И.И. URL: <https://findpatent.ru/patent/208/2087591.html>.
20. Раствор для удаления покрытия из нитрида титана: патент № 2471017 Рос. Федерация / Быбин А.А., Невьянцева Р.Р., Парфенов Е.В. URL: <http://allpatents.ru/patent/2471017.html>.
21. Раствор для удаления покрытия из нитрида титана: патент № 2081207 Рос. Федерация / Амирханова Н.А., Невьянцева Р.Р., Тимергазина Т.М. URL: <http://www.findpatent.ru/patent/208/2081207.html>.
22. Михайлов А.Н., Михайлов Д.А., Недашковский А.П. Особенности восстановления лопаток ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями ва-

кумных ионно-плазменных покрытий. Прогрессивные технологии и системы машиностроения. Междунар. сб. науч. раб. – Донецк: ДонНТУ, 2014. - № 1. – С. 159–163.

## REFERENCE

1. Tarasenko Yu.P, Krivina L.A, Fel Ya.A. The use of nanostructured ion-plasma coating of titanium nitride to increase the wear resistance of plunger pairs of fuel pumps. University Proceedings. The Volga Region. Technical Sciences. 2014;3(31):142-148.
2. **Nosov M.V.** Performance evaluation of the operation of technical systems based on the model of Markov processes [Internet]. Available from: <https://cyberleninka.ru/article/n/otsenivanie-effektivnosti-ekspluatatsii-tehnicheskikh-sistem-sredstv-na-osnove-modeli-teorii-markovskih-protsesov/viewer>.
3. Enikeev G.G. Comprehensive protection of a gas turbine engine operating in a dusty atmosphere and marine environment. Vestnik USATU. Aviation and Rocket and Space technology. 2000;3(1):41-48.
4. Statistical data on rejecting rotor blades of the compressor of TV3-117 engines from 2009 to 2013. Lugansk: Lugansk Aviation Repair Plant; 2018.
5. Muboyajyan S.A. We applied the principle of coating design for the first time in the world practice [Internet]. Available from: <https://viam.ru/interview/2044>.
6. Belan N.V, Omelchenko V.V, Prokopenko A.N, et al. Increasing the erosion resistance of the rotor blades of GTE compressor. Aviation Industry. 1986;1:19-20.
7. Alekseev V.K, Volkova L.F, Glikson I.L, Lukyanov V.S. Distribution of dust particles in the compressor flow chamber. Aviation Industry. 1989;7:24-25.
8. Efanov V.S, Prokopenko A.N, Ovchinnikov AV., Vnukov Yu.N. Erosion resistance of the compressor blades of helicopter GTE with various types of coatings. Aviation Industry. 2017;1:122–123.
9. Pavlenko DV, Dvirnik YaV. Regularities of the wear of the compressor blades of helicopter engines operating in dusty atmosphere. Vestnik Dvigotelestroeniya. Technology of Production and Repair. 2016;1:44-46.
10. Yuryev EN, Mikhnevich KS, Krivobokov VP, et al. Properties of titanium nitride films obtained by magnetron sputtering. Izvestia of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2014;16;4(3):672-676.
11. Khamdokhov A.Z. Structural and phase homogeneity of submicron titanium nitride films and ways to increase it [dissertation]. [Nalchik (RF)]: 2017.
12. Kablov E.N, Muboyajyan S.A, Budinovsky S.A, Lutsenko A.N. Ion-plasma protective coatings for gas turbine engine blades [Internet]. Available from: <https://viam.ru/public/files/2007/2007-204852.pdf>. Accessed 15.11.2020.
13. Muboyajyan S.A, Aleksandrov D.A, Gorlov D.S, Egorova L.P, Bulavintseva E.E. Protective and reinforcing ion-plasma coatings for blades and other critical parts of GTE compressor [Internet]. Available from: <https://viam.ru/public/files/2012/2012-206071.pdf>.
14. Nagovitsyn E.M, Sharonova N.I, Geikin V.A, et al. Patent no. 2430992 Russian Federation. Method of applying a protective coating by gas thermal spraying [Internet]. 2011 Nov 27. Available from: <http://www.findpatent.ru/patent/243/2430992.html>.
15. Dabizha E.V, Leshchuk A.A, Bondar I.V, Borisova N.N. Obtaining erosion and heat-resistant multilayer coatings for gas turbine blades by micro-electric arc ion-plasma vacuum dusting of materials. Electrometallurgy Today. Plasma-arc Technology [Internet]. Available from: <https://patonpublishing-house.com/sem/pdf/2013/pdfarticles/01/6.pdf>.
16. Mikhailov A.N, Mikhailov D.A, Mikhailov V.A, Sheiko E.A, Pichko A.P, Pichko NS, Sukharev V.I. Patent no. 2718877 RU. C23C 14/04. The method of applying a functionally oriented wear-resistant coating to the blade of a gas turbine engine. 2020 Apr 15.
17. Mikhailov D.A. Technological support for improving the operability of gas turbine engine compressor blades based on functionally oriented coatings [abstract of the dissertation on the Internet]. Available from: <http://donntu.org/sites/default/files/documents/avtoferat0.pdf>.
18. Dobrynin D.A, Yatsyuk I.V, Doronin O.N. Removal of reinforcing coatings based on titanium and zirconium nitrides from the surface of parts made of titanium alloys [Internet]. Protective and Strengthening Coatings. Trudi VIAM. Available from: <http://www.cyberleninka.ru/article/n/udalenie-uprochnyayuschih-pokrytiy-na-osnove-nitridov-titana-i-tsirkoniya-s-poverhnosti-detaley-iz-titanovyh-splavov/viewer>.
19. Ostapov O.V, Khazanskaya I.I. Patent no. 2087591 Russian Federation. Solution for removing titanium nitride coating [Internet]. Available from: <https://findpatent.ru/patent/208/2087591.html>.
20. Bybin A.A, Nevyantseva R.R, Parfenov E.V. Patent no. 2471017 Russian Federation Solution for removing titanium nitride coating [Internet]. Available from: <http://allpatents.ru/patent/2471017.html>.
21. Amirkhanova N.A, Nevyantseva R.R, Timergazina T.M. Patent no. 2081207 Russian

Federation. Solution for removing titanium nitride coating [Internet]. Available from: <http://www.findpatent.ru/patent/208/2081207.html>.

22. Mikhailov A.N, Mikhailov D.A, Nedashkovsky A.P. Features of restoring GTE blades with erosion and corrosion destruction of vacuum ion-

plasma coatings. Advanced technologies and systems of mechanical engineering: International Collection of Scientific Works; Donetsk: DonNTU, 2014;1:159-163.

23. Dushkin A.M, Proshchin A.B, Ivanov E.G. Protective coatings for steel blades of GTE compressor. Aviation Industry. 1988;7:13-15.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Васильев, И. П. Использование ионной имплантации в двигателестроении: монография / И. П. Васильев. – Луганск, 2017. – 211 с.
2. Михайлов, А. Н. Методика направленного поиска рациональных структурных вариантов процессов обработки лопаток ГТУ с учетом технологических связей / А. Н. Михайлов, А. П. Пичко, Д. А. Михайлов и [др.] // Машиностроение и техносфера XXI века: Сборник трудов XXVI международной научно-технической конференции в г. Севастополе 23-29 сентября 2019 г. – Донецк: ДонНТУ, 2019. - С. 311-317.
3. Михайлов, А. Н. Структурный синтез комплексного многосвязного технологического процесса обработки лопаток компрессора газотурбинных двигателей с функционально-ориентированными покрытиями / А. Н. Михайлов, Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов // Научно-технические технологии в машиностроении. – Брянск: БГТУ, 2020. - № 1 (103). – С. 40-48.

нии. – Брянск: БГТУ, 2020. - № 1 (103). – С. 40-48.

4. Михайлов, Д. А. Общая методология синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинного двигателя. / Д. А. Михайлов. // Прогрессивные технологии и системы машиностроения: Международный сб. научных трудов. – Донецк: ДонНТУ, 2021. - Вып. 1 (72). - С. 40 - 57.
5. Михайлов, Д. А. Общий подход синтеза комплексного многосвязного технологического процесса обеспечения функционально-ориентированных свойств газотурбинных двигателей / Д. А. Михайлов, Е. А. Шейко, В. А. Михайлов, А. Н. Михайлов // Машиностроение и техносфера XXI века: Сб. трудов XXVII международной научно-техн. конференции в г. Севастополе 14-20 сентября 2020 г. – Донецк: ДонНТУ, 2020. - С. 235-253.

## BIBLIOGRAPHIC LIST

1. Vasiliev I.P. The use of ion implantation in engine engineering. Lugansk; 2017.
2. Mikhailov A.N, Pichko A.P, Mikhailov D.A, et al. Methodology of the directed search for rational structural variants of machining GTE blades taking into account technological connections. Mechanical engineering and technosphere of the XXI century: Proceedings of the XXVI International Scientific and Technical Conference in Sevastopol; 2019 Sept 23-29; Donetsk: DonNTU: 2019.
3. Mikhailov A.N, Mikhailov D.A, Sheiko E.A, Mikhailov V.A. Structural synthesis of complex multi-coherent engineering process of compressor blade processing of gas turbine engines with function-oriented coatings. Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering. Bryansk: BSTU. 2020;1(103):40-48.

4. Mikhailov D.A. General methodology to synthesize a complex multi-coherent engineering process for providing function-oriented properties of a gas turbine engine. Progressive technologies and systems of mechanical engineering: International collection of scientific papers; Donetsk: DonNTU. 2021;1(72):40 - 57.
5. Mikhailov D.A, Sheiko E.A, Mikhailov V.A, Mikhailov A.N. General approach to the synthesis of a complex multi-coherent engineering process for providing function-oriented properties of gas turbine engines. Mechanical engineering and technosphere of the XXI century: Proceedings of the XXVII International Scientific and Technical Conference in Sevastopol; 2020 Sept 14-20; Donetsk: DonNTU, 2020.

## Сведения об авторах:

**Быкадоров Вадим Викторович**, кандидат технических наук, доцент, директор Института транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля, г. Луганск, кв. Молодежный, 20-а, ЛГУ им. В. Даля, корпус 5, 910034, +380642-344868, e-mail: 311transport@gmail.com.

**Данилейченко Александр Анатольевич**, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой

двигателей внутреннего сгорания Института транспорта и логистики Луганского государственного университета имени Владимира Даля», г. Луганск, кв. Молодежный, 20-а, ЛГУ им. В. Даля, корпус 5, 910034, +380642-344868, e-mail: 280376@rambler.ru .

**Любченко Дмитрий Иванович**, старший преподаватель кафедры двигателей внутреннего сгорания Луганского государственного университета имени

Владимира Даля», г. Луганск, кв. Молодежный, 20-а, ЛГУ им. В. Даля, корпус 5, 910034, +380642-

344868, e-mail: vottako@rambler.ru, Author-ID-РИНЦ 1130478.

**Bykadorov Vadim Viktorovich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Transport and Logistics at Lugansk State University named after Vladimir Dahl, 20-a Molodyozhniy Block Lugansk; phone: +380642-344868, e-mail: 311transport@gmail.com.

University named after Vladimir Dahl, 20-a Molodyozhniy Block Lugansk; phone: +380642-344868, e-mail: 280376@rambler.ru .

**Danileychenko Aleksander Anatolyevich**, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines of the Institute of Transport and Logistics at Lugansk State

**Lyubchenko Dmitry Ivanovich**, Senior Lecturer of the Department of Internal Combustion Engines of the Institute of Transport and Logistics at Lugansk State University named after Vladimir Dahl, 20-a Molodyozhniy Block Lugansk; phone: +380642-344868, e-mail: vottako@rambler.ru, Author-ID- RSCI 1130478.

**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 14.01.2022; одобрена после рецензирования 27.01.2022; принята к публикации 21.04.2022. Рецензент – Соловьев Д.Л., доктор технических наук, профессор Муромского филиала (института) Владимирского государственного университета, член редсовета журнала «Транспортное машиностроение».

The article was submitted to the editorial office on 14.01.2022; approved after review on 27.01.2022; accepted for publication on 21.04.2022. The reviewer is Solovyov D.L., Doctor of Technical Sciences, Professor of Murom Branch of Vladimir State University, member of the Editorial Board of the journal *Transport Engineering*.