

УДК 621.92

А.Н. Михайлов, д-р техн. наук, проф.,

Д.А. Михайлов, аспирант, А.П. Недашковский, инженер,  
Донецкий национальный технический университет, Украина  
Снежнянский машиностроительный завод ОАО «Мотор Сич»  
Тел./Факс: +38 (062) 3050104; E-mail: [tm@mech.dgutu.donetsk.ua](mailto:tm@mech.dgutu.donetsk.ua)

## ОСОБЕННОСТИ ПОЛИРОВКИ ЛОПАТОК ГТД С ЭРОЗИОННО-КОРРОЗИОННЫМИ РАЗРУШЕНИЯМИ ВАКУУМНЫХ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ ПОКРЫТИЙ ПОД НАПЫЛЕНИЕ НОВОГО ПОКРЫТИЯ

*В представленной работе выполнены исследования, связанные с определением процесса износа ионно-плазменного покрытия поверхностей пера лопатки. В работе исследованы особенности подготовки поверхностей пера лопатки к напылению нового покрытия посредством полирования. Предложены схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава. Для нанесения нового нитрид титанового покрытия на оставшееся старое покрытие и основной материал поверхности – с одинаковыми свойствами, разработаны рекомендации по опорному одновременному полированию двух материалов и обеспечению близких параметров шероховатости на покрытии и на основном материале пера лопатки.*

**Ключевые слова:** лопатки газотурбинного двигателя, эрозионно-коррозионные разрушения вакуумных ионно-плазменных покрытий, опорное полирование лопаток с покрытиями.

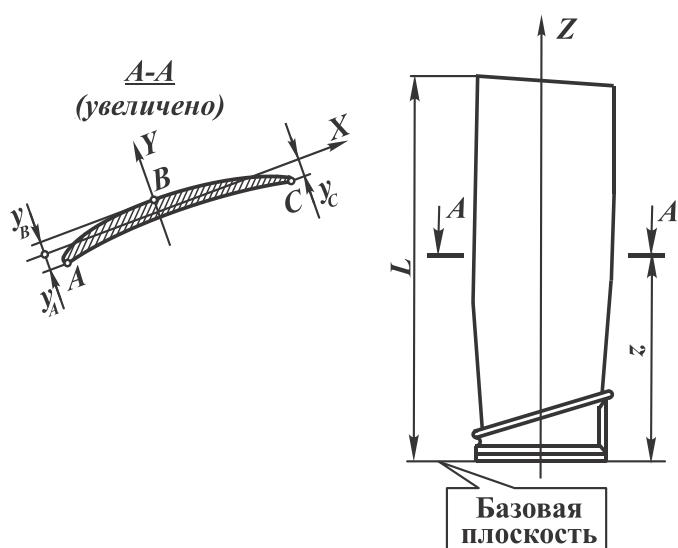


Рис. 1. Лопатка 3-й ступени компрессора ГТД ТВ3-117

или другие покрытия имеют высокую микротвердость, коррозионную и эрозионную стойкость по сравнению с параметрами основного материала пера лопатки [1, 2]. Поэтому они позволяют существенно повысить стойкость лопаток компрессора и соответственно всего ГТД.

### 1. Введение

Лопатки компрессора газотурбинного двигателя (ГТД) это сложные и дорогостоящие элементы авиационных двигателей (рис. 1), которые имеют целое множество вариантов геометрии в зависимости от номера ступени. Например, для двигателя ТВ3-117 применяются лопатки компрессора двенадцати ступеней. Для повышения стойкости лопаток компрессора широко используются различные вакуумные ионно-плазменные покрытия. Эти покрытия значительно снижают коррозионно-эрзационные разрушения пера лопаток. Можно отметить, что нитрид титановые, нитрид титановые циркониевые

Вместе с тем, в процессе эксплуатации лопаток компрессора ГТД происходит абразивный износ и эрозия, газовая, кислотная и солевая коррозия покрытия, которое в процессе эксплуатации лопаток ГТД разрушается (рис. 2). Поэтому для повышения стойкости лопаток компрессора покрытия необходимо восстанавливать. Вместе с тем, следует отметить, что процесс повторного нанесения покрытия имеет определенные особенности, связанные со следующим.

Процесс разрушения вакуумного ионно-плазменного покрытия, например нитрид титанового покрытия, имеет неравномерный характер. Возможны следующие случаи разрушения покрытия (рис. 2):

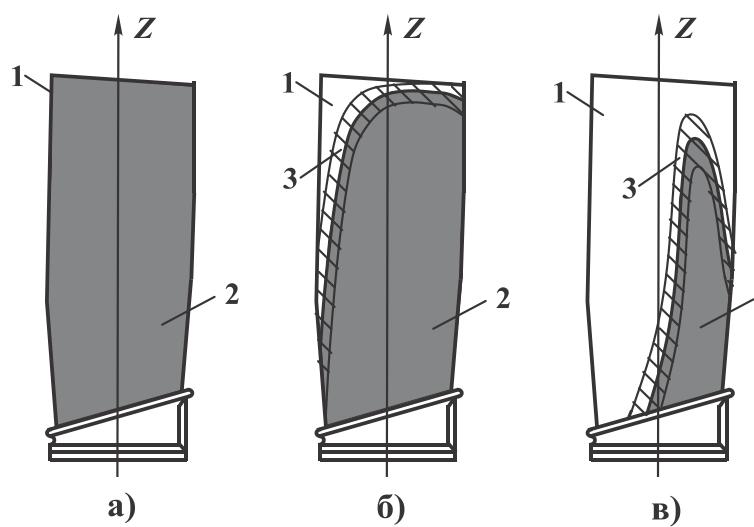


Рис. 2. Особенности разрушения ионно-плазменного покрытия лопатки:

- а – без полного разрушения покрытия по его толщине,
- б – с полным разрушением покрытия по его толщине на входной и периферийной кромке,
- в – прогрессирующее разрушение покрытия на поверхности пера

ГТД с эрозионно-коррозионными разрушениями вакуумных ионно-плазменных покрытий под напыление нового покрытия за счет обеспечения одинаковых параметров шероховатости нитрид титанового покрытия и титанового сплава поверхностей пера в условиях совместного опорного их полирования.

Для достижения поставленной цели в данной работе определены следующие задачи:

1. Рассмотреть особенности износа ионно-плазменного покрытия поверхностей пера лопатки.
2. Исследовать особенности подготовки поверхностей пера лопатки к напылению нового покрытия посредством полирования.
3. Предложить схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава.

– без полного разрушения покрытия по его толщине (рис. 2,а);

– с полным разрушением покрытия по его толщине на входной и периферийной кромке (рис. 2,б);

– прогрессирующее разрушение покрытия на поверхности пера (рис. 2,в).

Здесь обозначено: 1 – перо лопатки, 2 – покрытие пера лопатки, 3 – переходная зона пера лопатки между основным материалом пера лопатки и покрытием. Можно отметить, что в переходной зоне 3 пера лопатки необходимо обеспечивать некоторые особенности обработки, связанные с одновременной полировкой двух материалов пера лопатки.

Целью данной работы является подготовка лопатки

4. Для нанесения нового нитрид титанового покрытия на оставшееся старое покрытие и основной материал поверхности - с одинаковыми свойствами, разработать рекомендации по опорному одновременному полированию двух материалов и обеспечению близких параметров шероховатости на покрытии и на основном материале пера лопатки.

Эти задачи решаются в данной работе.

## **2. Особенности подготовки поверхностей пера лопатки к напылению нового покрытия посредством полирования**

Следует отметить, что при подготовке пера лопатки, в зоне 3 (рис. 2) необходимо обеспечивать совместную обработку двух различных материалов, имеющих различные физико-механические свойства, а именно нитрид титанового покрытия (микротвердость  $H_\mu = 21 \dots 23$  ГПа), располагающегося на поверхностях пера лопатки, и основного материала пера лопатки, изготовленного из титанового сплава, например ВТ 8М (микротвердость  $H_\mu = 1,2 \dots 1,5$  ГПа). При этом в случае совместной полировки двух принципиально различных материалов возникают случаи продавливания покрытия и углубления инструмента в основной материал пера лопатки. Это обусловлено тем, что для обработки покрытия необходимы усиленные режимы обработки, а именно удельное давление полирования поверхности с покрытием должно превышать в 1,5 ... 2,0 раза по сравнению с обработкой основного материала пера лопатки. При этом для нанесения нового нитрид титанового покрытия необходимо обеспечивать следующее особенности:

- для исключения процесса продавливания покрытия и углубления инструмента в основной материал пера лопатки (старое покрытие имеет переменную толщину) необходимы новые схемы совместной обработки двух разнородных материалов;
- для обеспечения заданных параметров качества нового покрытия, параметры шероховатости предыдущего покрытия и основного материала пера лопатки должны иметь близкие значения;
- для повышения производительности полировки поверхностей лопатки с покрытием режимы обработки должны быть ориентированы на обработку покрытия.

## **3. Схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки**

Для одновременной обработки двух разнородных материалов, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки из титанового сплава разработаны две схемы опорного полирования, представленные на рис. 3 и рис. 4. Здесь показаны: обработка поверхности спинки пера лопатки (рис. 3,а и рис. 4,а) и обработка поверхности корыта пера лопатки (рис. 3,б и рис. 4,б). На верхнем рис. 3 или рис. 4 показана схема обработки, а на нижнем – показана схема трассирования инструмента при обработке поверхности. На этих схемах обозначено: 1 – тело пера лопатки (титановый сплав ВТ-8М, 2 – нитрид титановое покрытие, 3 - инструмент – полировальный круг, 4 – эпюра удельного давления прижатия инструмента к поверхности пера лопатки, 5 - траектория трассирования инструмента при обработке пера лопатки. А также, на этих рисунках показано:  $s_o$  – поперечная подача инструмента,  $s_1$  - продольная подача инструмента,  $v_p$  – скорость резания,  $R$  – радиус полировального круга,  $F(l)$  – функция распределения удельного давления полировального круга на поверхность пера лопатки, представленная в плоскости,  $f_{max}$  – максимальное удельное давление в эпюре  $F(l)$ ,  $l$  – длина контакта полировального круга на поверхности пера лопатки (длина эпюра удельного давления),  $l_0$  – длина контакта полировального круга с удаляемым покрытием,  $l_1$  – длина контакта полировального круга с основным материалом пера лопатки,  $\omega$  - угол пе-

рекоса продольной оси полировального круга относительно касательной к полируемой поверхности пера лопатки.

В соответствии со схемами рис. 3 и рис. 4 полировальный круг следует располагать относительно полируемой поверхности пера лопатки таким образом, чтобы 75% эпюра (расстояние от точки A до точки B) распределения удельного давления приходилось на нитрид титановое покрытие, а 25% эпюра (расстояние от точки B до точки C) распределения удельного давления приходилось на взаимодействие инструмента и основного материала пера лопатки. В этом случае основная часть нагрузки концентрируется на нитрид титановом покрытии (более твердом материале в зоне AB), при этом инструмент как бы опирается на покрытие пера лопатки. Причем меньшая часть нагрузки – с меньшими удельными давлениями действует на основной материал поверхности пера лопатки в зоне BC. При этом удельное давление, приходящееся на основной материал пера лопатки должно быть примерно в 1,5 ... 2 раза меньше, чем удельное давление, действующее на материал покрытия. Это связано с тем, что нитрид титановое покрытие имеет микротвердость  $H_\mu = 21 \dots 23$  ГПа, а основной материал пера лопатки (титановый сплав ВТ-8М) имеет микротвердость  $H_\mu = 1,2 \dots 1,5$  ГПа и для обработки необходимы принципиально различные удельные давления. Здесь точка D – исходная точка начала обработки покрытия пера лопатки.

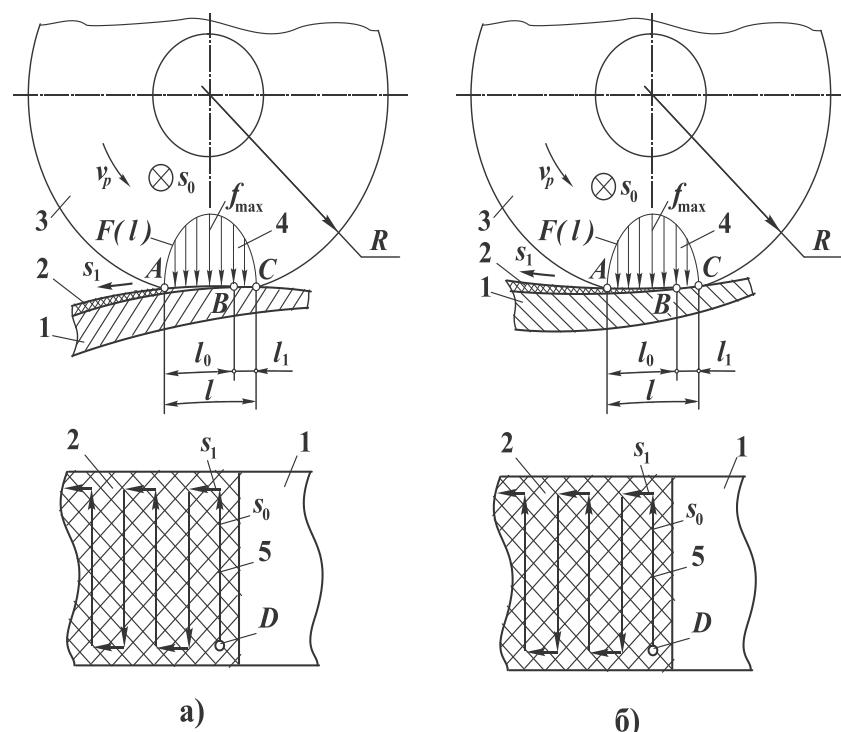


Рис. 3. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга по подаче  $s_o$ :

**а** – полирование покрытия спинки, **б** – полирование покрытия корыта

На рис. 3 приведена схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга с полируемой поверхностью двух материалов распределается из условия 75% по поверхности с покрытием и 25% по поверхность без покрытия. При этом максимальное удельное давление действует в зоне покрытия. Это обеспечивает при обработке двух материалов усиленные удельные давления в зоне покрытия и смягченные режимы в зоне обработки поверхности без покрытия. При этом реализуется опорное полирование двух материалов

с опорой инструмента на более твердый материал – нитрид титановое покрытие. Это исключает процесс продавливание полировального круга через покрытие в основной материал пера лопатки.

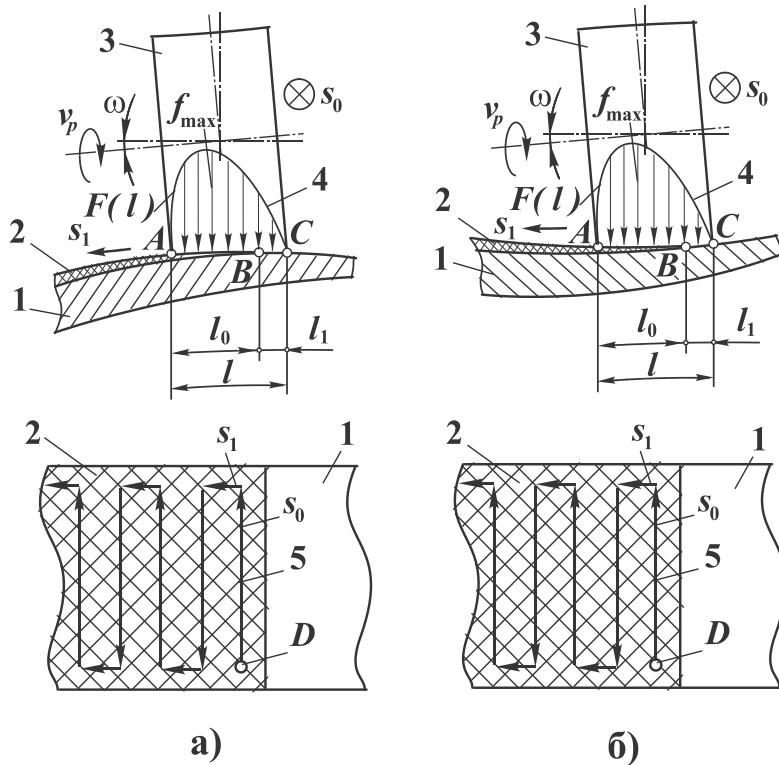


Рис. 4. Схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче  $s_o$  и перекосом  $\omega$ :  
а – полирование покрытия спинки, б – полирование покрытия корыта

ных материалов, а именно из титанового сплава и старого нитрид титанового покрытия, к нанесению нового нитрид титанового покрытия. При этом обеспечивать заданные параметры качества обработки пера лопатки ГТД.

#### 4. Заключение

Таким образом, выполненные исследования позволили реализовать следующее:

1. В представленной работе рассмотрены особенности износа ионно-плазменного покрытия поверхностей пера лопатки. При этом установлено, что при эксплуатации лопатки покрытие изнашивается не равномерно на ее поверхностях.
2. Исследованы особенности подготовки поверхностей пера лопатки имеющих разнородные материалы к напылению нового покрытия посредством полирования.
3. В работе разработаны схемы опорного одновременного полирования двух материалов лопатки, а именно нитрид титанового покрытия и основного материала пера лопатки – титанового сплава.
4. Для нанесения нового нитрид титанового покрытия на оставшееся старое покрытие и основной материал поверхности - с одинаковыми свойствами, разработаны рекомендации по опорному одновременному полированию двух материалов и обеспе-

На рис. 4 приведена схема опорного полирования двух материалов с ориентированием продольной оси полировального круга перпендикулярно подаче  $s_o$  и перекосом  $\omega$ . Здесь, на рис. 4,а представлена схема полирования покрытия спинки, на рис. 4,б – схема полирования покрытия корыта. В представленной схеме полирования все позиции и обозначения аналогичны рис. 3. При этом процесс опорного полирования реализуется за счет перекоса оси  $\omega$  полировального круга относительно полируемой поверхности лопатки.

Представленные схемы обработки позволяют вести подготовку поверхностей пера лопатки состоящих из двух принципиально различных

чению близких параметров шероховатости на покрытии и на основном материале пера лопатки.

**Список литературы:**

1. Технология производства авиационных двигателей. Ч. 1. Основы технологии / Богуслаев В.А., Качан А.Я., Долматов А.И., Мозговой В.Ф., Кореневский Е.Я. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2007. – 518 с.
2. Отделочно-упрочняющая обработка деталей ГТД / Богуслаев В.А., Яценко В.К., Жеманюк П.Д., Пухальская Г.В., Павленко Д.В., Бень В.П. – Запорожье: ОАО «Мотор Сич», 2005. – 559 с. ISBN 966-7108-91-0.
3. Ящерицын П.И. Тонкие доводочные процессы обработки деталей машин и приборов / Ящерицын П.И., Зайцев А.Г., Барботько А.И. – Минск: Наука и техника, 1976. – 328 с.
4. Михайлов А.Н. Основы синтеза функционально-ориентированных технологий / А.Н. Михайлов. – Донецк: ДонНТУ, 2009. – 346 с. ISBN 966-7907-24-4.

Надійшла до редакції 07.02.2014

**О.М. Михайлов, Д.О. Михайлов, О.П. Недашковський**

**ОСОБЛИВОСТІ ПОЛІРУВАННЯ ЛОПАТОК ГТД З ЕРОЗІЙНО-КОРОЗІЙНИМИ РУЙНУВАННЯМИ ВАКУУМНИХ ІОННО-ПЛАЗМОВИХ ПОКРИТЬ ПІД НАПИЛЕННЯ НОВОГО ПОКРИТТЯ**

У представлений роботі виконані дослідження, пов'язані з визначенням процесу зносу іонно-плазмового покриття поверхонь пера лопатки. У роботі досліджено особливості підготовки поверхонь пера лопатки до напилення нового покриття за допомогою полірування. Запропоновано схеми опорного одночасного полірування двох матеріалів лопатки, а саме нітрид титанового покриття і основного матеріалу пера лопатки - титанового сплаву. Для нанесення нового нітрид титанового покриття на старе покриття і основний матеріал поверхні - з однаковими властивостями, розроблені рекомендації по опорному одночасному поліруванню двох матеріалів та забезпеченю близьких параметрів шорсткості на покритті і на основному матеріалі пера лопатки.

**Ключові слова:** лопатки газотурбінного двигуна, ерозійно-корозійні руйнування вакуумних іонно-плазмових покріттів, опорне полірування лопаток з покріттями.

**A.N. Mikhaylov, D.A. Mikhaylov, A.P. Nedashkovskiy**

**POLISHING GTE BLADES WITH EROSION-CORROSION FRACTURES OF PVD COATINGS**

This paper provides investigations related to determination of the wear process of PVD coating of blade surfaces. We investigate the features of airfoil surface preparation to new coating deposition by polishing. We propose schemes supporting simultaneous polishing of two blade materials, namely PVD coating and the base material of the blade - titanium alloy. To apply new PVD coating on the old coating and on the base material of the surface (with the same properties) we developed recommendations for simultaneous polishing of two reference materials and ensuring close roughness on the coating and on the base material of the blade.

**Key words:** turbine engine blades, erosion-corrosion fractures of PVD coatings, polishing of coated blades.