

ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ПОВЫШЕНИЯ РЕСУРСА
ЛОПАТОК ГТД

Корольчук А.А., Михайлов А.Н. (каф. ТМ, ДонНТУ, г. Донецк, ДНР)

Аннотация. Рассмотрены основные методы повышения коррозионной и эрозионной стойкости поверхности лопаток ГТД за счет применения прогрессивных, композиционных и гибридных технологий.

Ключевые слова: Технология, ресурс, лопатка, классификация, методы.

Ресурс лопатки как отдельного элемента конструкции двигателя можно представить как наработку до предельно допустимого состояния, предшествующего фазе катастрофического износа. Современные вертолетные газотурбинные двигатели имеют ресурс до 30 000 часов до первого капитального ремонта. Общая технология производства лопаток ГТД включает в себя следующие этап (рис. 1).

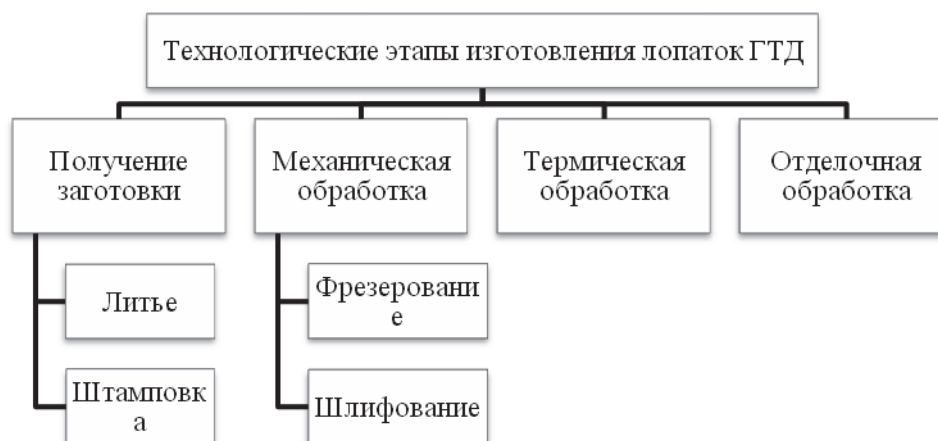


Рис. 1 – Технологические этапы изготовления лопаток ГТД

Наиболее глубоким по уровню воздействия на технологическую наследственность изделия является метод модифицирования заданных функций изделия еще на этапе формирования заготовки [1]. Однако вышеперечисленные этапы и методы не обеспечивают необходимого уровня надежности и долговечности детали. Для получения качественного и стойкого к эксплуатационным, термическим, коррозионным и эрозионным воздействиям изделия необходимо применять дополнительные технологические меры. В настоящее время для обработки лопаток применяют методы виброгалтовки, виброабразивной обработки, ультразвукового упрочнения и упрочнения методами поверхностного пластического деформирования [2].

Наиболее перспективным и экономически обоснованным направлением повышения ресурса и обеспечения износостойкости лопаток ГТД является активное внедрение операций по нанесению многофункциональных защитных покрытий различного рода.

Основные требования, предъявляемых к свойствам защитных покрытий:

- а) высокие пластические и прочностные свойства;

**ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

- б) сопротивление статическим, циклическим и термическим нагрузкам;
- в) сопротивление агрессивным средам;
- г) эрозионная стойкость;
- д) высокий уровень адгезии к поверхности заготовки;
- е) стабильность химического состава, структуры и свойств покрытия;
- ж) отсутствие дефектов;
- з) простота реализации процесса нанесения;
- и) низкая стоимость.

Указанные требования могут использоваться в комплексе или быть взаимоисключающими друг друга. По этим причинам на сегодняшний день пока не существует универсальных покрытий, удовлетворяющих всем требованиям. Выбор покрытия происходит на базе компромисса, который принимается в результате рассмотрения конкретных начальных и эксплуатационных условий работы изделия [3].

Условно все существующие процессы нанесения защитных покрытий можно разделить по принципу реализации процесса на физические (Physical Vapour Deposition, PVD) и химические (Chemical Vapour Deposition, CVD) [25].

Химическое газофазное осаждение (CVD) является процессом, в котором устойчивые твердые продукты реакции зарождаются и растут на подложке в среде с протекающими в ней химическими реакциями. При этом используются различные источники энергии (плазма, ультрафиолетовое излучение и т.д.).

Термин «физическое газофазное осаждение» описывает три основных способа нанесения покрытий: испарение, распыление и ионное осаждение. При физическом осаждении материал покрытия переходит в газовую фазу из твердого состояния в результате испарения под воздействием тепловой энергии или в результате распыления за счет кинетической энергии столкновения частиц материала [4].

Сравнительный анализ различий процессов физического и химического осаждения защитных покрытий представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнительный анализ PVD- и CVD-процессов.

Наименование характеристики	PVD-процесс	CVD-процесс
Давление	Вакуум или пониженное давление	Атмосферное или вакуум
Температура	200..500°C	700..1100°C
Скорость осаждения	2..4 ч	20..35 ч
Структура	Аморфно-тонкокристаллическая	Кристаллическая с гранями
Уровень адгезии покрытия к поверхности заготовки	Большая сцепляемость	Меньшая сцепляемость
Дефекты (поры, трещины)	Крайне редки	Возможны
Наносимые покрытия	TiN, TiC, TiCN, TiAlN, ZrC, HfN, HfC, CrN, Al ₂ O ₃ и др.	TiN, TiC, TiCN, Al ₂ O ₃ и др.
Необходимость в термообработке	Не требуется	Необходима для снятия напряжений

**ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

Продолжение таблицы 1

Предварительная подготовка	Требуется высокое качество подготовки поверхности	Не требуется высокое качество подготовки поверхности
-------------------------------	--	--

Согласно проведенному анализу можно сделать вывод, что упрочняющая обработка лопаток ГТД методом физического осаждения покрытия более предпочтительна с точки зрения меньшего термического воздействия на материал заготовки, большей производительности процесса и более широкого выбора осаждаемых покрытий.

В производстве деталей для авиационного двигателестроения наибольший интерес представляют покрытия, реализуемые методом распыления. В частности, повсеместное распространение получил процесс ионного осаждения. Характерной особенностью этого метода является процесс ионной бомбардировки поверхности заготовки направленным потоком ионов высокой энергии. Это происходит как для очистки подложки перед нанесением покрытия, так и непосредственно в процессе. Материал покрытия нагревается любым методом: плазменным, электрическим, электронно-лучевым и т.д. Среди очевидных преимуществ ионно-плазменного метода нанесения покрытий – управляемый нагрев, очистка подложки на атомном уровне в процессе осаждения; высокая плотность материала покрытия, исключающая появление пор и трещин; высокая адгезия покрытия; высокая точность и производительность процесса осаждения; получение субмелкозернистой структуры покрытия [5].

Технология ионно-плазменного нанесения покрытий позволяет получать покрытия от 1 мкм толщиной практически из любых материалов среди тех, что активно используются в машиностроении в качестве защитных покрытий. Наибольшее распространение получило использование для ионизации соединений алюминия, хрома, циркония и титана. В таблице 2 приводим результаты коррозионных лабораторных испытаний образцов лопаток газовых турбин после ионно-плазменной обработки [6].

Таблица 2 – Результаты коррозионных лабораторных испытаний образцов из стали после ионно-плазменной обработки.

Вид ионов при Ионно-плазмен- ной обработке	Степень коррозионного поражения, % поверхности, после ускоренных циклических испытаний в количестве циклов			
	4	7	9	10
Al	Без дефектов	1..5	3..15	5..20
Cr	Без дефектов	5..30	30..40	40
Zr	Без дефектов	Без дефектов	Без дефектов	Отдельные точки коррозии
Ti	Без дефектов	Без дефектов	Без дефектов	Отдельные точки коррозии
Без покрытия	30..40	55..65	65..75	70..80

Специалистами АО «Мотор Сич» и Запорожского национального технического

**ПРОГРЕССИВНЫЕ, СПЕЦИАЛЬНЫЕ И НЕТРАДИЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ**

университета были представлены результаты эксперимента, призванного дать сравнительную оценку степени относительного эрозионного износа лопаток ГТД с разным типом защитных покрытий и без такового [7].

Испытания проходили в стендовом режиме с использованием полноразмерного двигателя ТВ3-117ВМА, укомплектованного рабочими лопатками с 16 вариантами покрытий. В качестве абразивного материала использовался кварц молотый пылевидный с грануляцией помола 0,02 мм. Результаты испытаний приведены в рисунке 2.

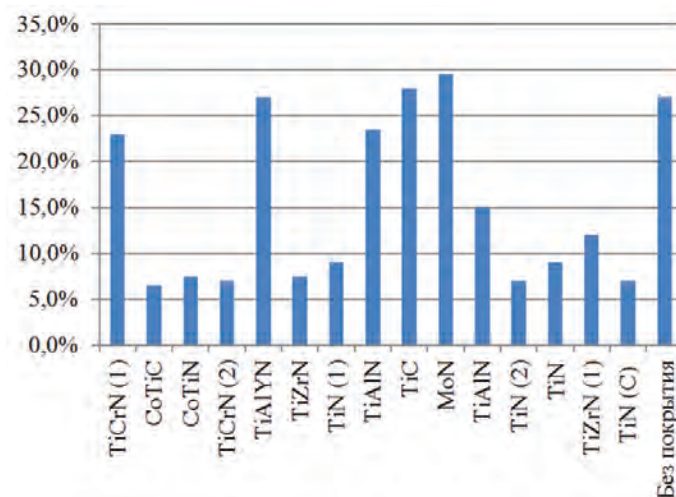


Рис. 2. Результаты оценки уровня эрозионного износа лопаток ГТД с различным типом защитных покрытий.

Соответственно представленным результатом наибольший интерес и перспективу использования несут в себе покрытия из нитрида титана (TiN).

Список литературы: 1. Каблов Е.Н. Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей. / Е.Н. Каблов, С.А. Мубояджян, С.А. Будиновский, А.Н. Луценко / Журнал «Металлы» №5. – М.: Изд-во ООО НПП «ЭЛИЗ», 2007. – С. 23-35. 2. Качан А.Я. Отделочно-упрочняющие технологии обработки лопаток моноколес современных газотурбинных двигателей. / А.Я. Качан, А.В. Богуслаев, Д.В. Павленко, С.В. Мозговой. / Журнал «Вестник двигателестроения» №1. – Запорожский национальный технический университет. – С. 81-90. 3. Никитин В.И. Коррозия и защита лопаток газовых турбин. – Л.: Машиностроение, 1987. – 272 с. 4. Кривобоков В.П. Плазменные покрытия. Методы и оборудование. Учеб. пособие. / В.П. Кривобоков, Н.С. Сочугов, А.А. Соловьёв. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 104 с. 5. Кирюханцев-Корнеев Ф.В. Перспективные наноструктурные покрытия для машиностроения. / Ф.В. Кирюханцев-Корнеев, А.Н. Швейко, Е.А. Левашов, Д.В. Штанский. / Журнал «Вопросы материаловедения», № 2 (54), 2008. – С. 187-201. 6. Мубояджян С.А. Эрозионностойкие покрытия из нитридов и карбидов металлов и их плазмохимический синтез. / С.А. Мубояджян. / Журнал «Российский химический журнал», №1, 2010. – 19 с. 7. Ефанов В.С. Эрозионная стойкость лопаток компрессора вертолетных ГТД с различными типами покрытий. / В.С. Ефанов, А.Н. Прокопенко, А.В. Овчинников, Ю.Н. Внуков. - Журнал «Вестник двигателестроения» №1, 2017. – Запорожский национальный технический университет. – С. 120-123.