

С. Н. Бобраков⁽¹⁾, зам. гл. инженера, к.т.н.

В. Д. Малыгин⁽¹⁾, зам. гл. инженера, к.т.н.

Г. П. Малышев⁽²⁾, профессор, к.т.н.

МАГНЕТРОННЫЙ МЕТОД НАНЕСЕНИЯ СЕРЕБРЯНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПЛЕНОК НА ЗАМКИ РАБОЧИХ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРОВ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ И ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

⁽¹⁾ ОАО «Наро-Фоминский машиностроительный завод», г. Наро-Фоминск, Российская Федерация,

⁽²⁾ Запорожская государственная инженерная академия

У роботі розглянуто нанесення плівки із срібла на поверхню титанових та жароміцних сплавів методом магнетронного напилювання.

В работе рассмотрено нанесение покрытия из серебра на поверхность титановых и жаропрочных сплавов методом магнетронного напыления.

Введение. В настоящее время в конструкциях компрессоров авиационных газотурбинных двигателей широко применяют лопатки, в том числе и рабочие, из жаропрочных и титановых сплавов, в частности сплавов ВТ8, ВТ9, ВТЗ-1, ВТ18. ЭП718-ИД. На замки рабочих лопаток, выполненных из этих сплавов, наносят слой серебра толщиной 3...5 мкм в качестве антипригарного и технологического покрытия. В настоящее время для нанесения такого покрытия повсеместно применяют гальванический метод, который имеет ряд существенных недостатков:

- серебряная пленка получается пористой, что снижает стабильность ее механических свойств по толщине;
- толщина серебряной пленки колеблется в широких пределах, поскольку гальванический технологический процесс не может обеспечить осаждение серебра с одинаковой скоростью;
- гальванический процесс нанесения серебра включает в себя порядка тридцати операций и является трудоемким;
- для реализации гальванического процесса применяют вредные и высокотоксичные вещества, такие как кислоты и цианиды, что экологически небезопасно.

Цель работы. Разработка и внедрение метода вакуумного магнетронного напыления серебра на замки рабочих лопаток в условиях ОАО «Наро-Фоминский машиностроительный завод».

Постановка задачи. Задачей приведенных исследований являлась отработка промышленной технологии нанесения покрытий.

Основная часть исследований. Процесс нанесения серебра на замки рабочих лопаток по вакуумному магнетронному методу основан на распылении материала серебряной мишени-катода при его бомбардировке ионами рабочего газа, которые образуются в плазме аномально тлеющего разряда. Возникающая при этом вторичная эмиссия поддерживает разряд и обуславливает распыление материала мишени-катода. Магнетронная распылительная система (МРС) является одной из разновидностей схем диодного распыления [1].

Основные элементы данной системы: катод, анод и магнитная система, – предназначены для локализации плазмы у поверхности мишени-катода. Наиболее

широко применяют планарные и несбалансированные магнетроны. Мишень-катод из серебра охлаждают проточной водой, поступающей по трубопроводу.

К катоду от источника питания подводят постоянное напряжение (300...800 В). Под катодом расположена магнитная система, состоящая из центрального и периферийных постоянных магнитов. Все элементы смонтированы в корпусе, присоединенном к вакуумной камере через изолирующие вакуумно-плотные уплотнения.

Основные преимущества магнетронного способа распыления – высокая скорость нанесения пленки, точность воспроизведения заданной толщины распыляемого материала ($\pm 5\%$), отсутствие пор в пленке, низкая трудоемкость и полная экологическая безопасность.

Скорость конденсации при магнетронном распылении зависит от силы тока разряда и мощности, что определяет жесткие требования к источникам питания, а также от давления рабочего газа. Для стабилизации процесса по силе тока разряда ее величину необходимо поддерживать с точностью 2 %; если стабилизацию процесса осуществляют по мощности разряда, то подводимую мощность поддерживают с точностью 20 Вт в диапазоне регулирования от 0 до 10 кВт. В качестве рабочей среды при магнетронном распылении используют инертные газы.

Магнетронные распылительные системы подтвердили перспективность ионного распыления как промышленного и универсального метода получения тонких серебряных технологических пленок на замках компрессорных лопаток.

Распыление в МРС осуществляют потоком ионов высоких энергий, которые бомбардируют поверхность распыляемого материала. Источником ионов является интенсивная плазма аномального тлеющего разряда. Локализацию плазмы, непосредственно у поверхности распыляемого материала осуществляют при помощи сильного магнитного поля, которое совместно с электрическим полем формирует замкнутую магнитную ловушку для плазмы в области скрещенных электрического и магнитного полей.

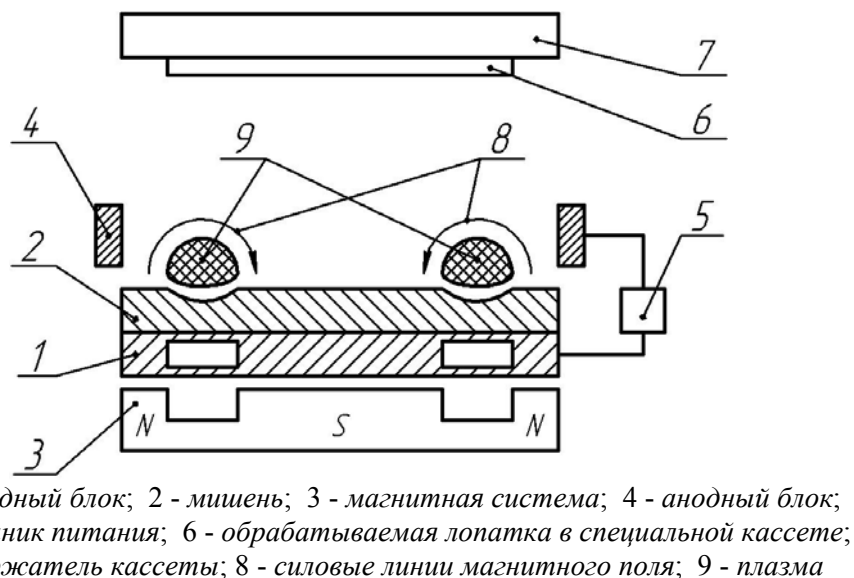


Рисунок 1 – Конструктивная схема МРС

Магнетронная распылительная система (рис. 1) состоит из водоохлаждаемого катодного блока 1, на котором с обеспечением хорошего теплового и электрического контакта установлена мишень 2 из серебра. Под катодным блоком находится магнитная система 3, а вблизи мишени – анодный блок 4. Между катодным и анодным блоками подают напряжение постоянного тока (или высокочастотное) от

источника питания 5. Обрабатываемую лопатку в специальной кассете 6 устанавливают над распыляемой мишенью на держателе 7.

Магнитная система формирует вблизи мишени замкнутое магнитное поле, силовые линии которого в общем случае проходят через мишень и имеют форму дуги (арочное магнитное поле) [2].

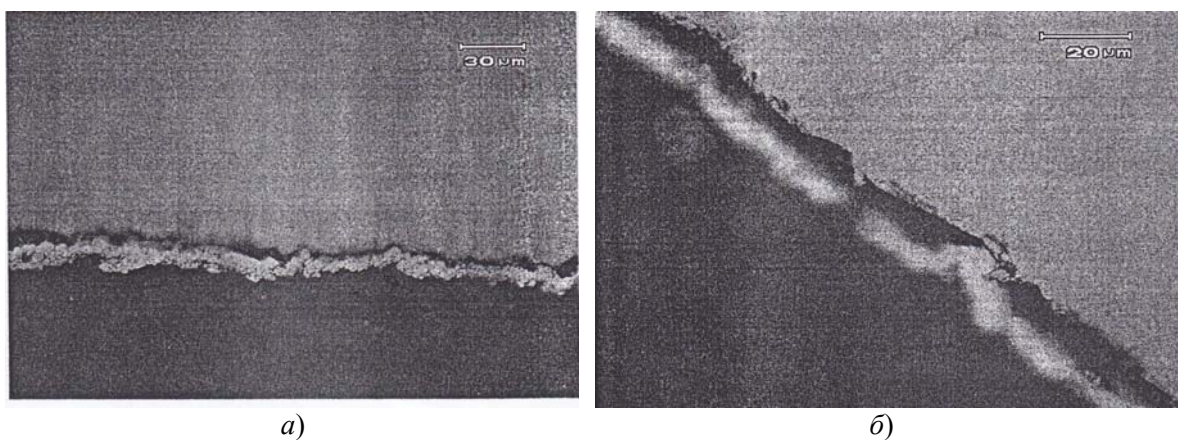
МРС работает следующим образом. Из рабочей камеры откачивают воздух и заполняют ее рабочим газом (обычно аргоном). Устанавливают необходимую степень разрежения и подают напряжение между катодным и анодным блоками МРС (400...600 В в режиме постоянного тока).

Зажигают аномальный тлеющий разряд плазмы, который локализуют у поверхности мишени магнитным полем, что обеспечивает высокую степень ионизации и плотность плазмы. Ионы плазмы ускоряются электрическим полем до высоких энергий и бомбардируют мишень, выбивая из нее атомы серебра (стадия распыления). Зона распыления на мишени имеет вид замкнутой дорожки и определяется конфигурацией и величиной магнитного поля, сформированного магнитной системой. Ширина зоны распыления примерно соответствует расстоянию между полюсами магнитной системы.

Атомы, распыленные в зоне эрозии мишени, пролетают расстояние между мишенью и держателем кассеты, конденсируются на обрабатываемом замке лопатки, формируя на нем пленочное серебряное покрытие [3].

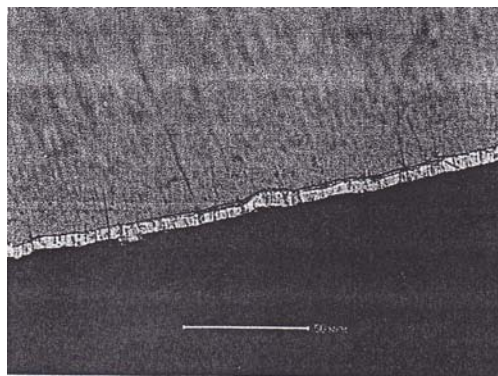
На образование пленки и ее характеристики существенное влияние оказывает напряженное состояние поверхностного слоя, возникающее при механической обработке лопаток при котором наблюдается деформация кристаллической решетки. Механическую обработку лопаток компрессоров из титановых сплавов на финишных операциях проводят вручную, при этом на их поверхности возникают напряжения, разные по величине и знаку, что приводит к нестабильности, а иногда и к снижению их усталостных характеристик. Установлено, что чем ниже уровень остаточных напряжений в слое подложки (покрываемой лопатке), тем стабильнее идет процесс нанесения серебра и тем лучше степень сцепления пленки с основным металлом в процессе эксплуатации, что, в конечном счете, сказывается на усталостных характеристиках покрытия. Особенно это актуально для титановых сплавов [4].

На рис. 2 приведены микроструктуры покрытия замка лопатки из сплавов ВТ18 и ВТ3-1 без дополнительного стабилизирующего отжига. Отчетливо видна тенденция к отслоению покрытия.



а) сплав ВТ18, X 500
б) сплав ВТ3-1, X 1000
Рисунок 2 – Микроструктура переходного слоя сплав – серебро

Для снятия остаточных напряжений в поверхностном слое лопаток из титановых сплавов авторами был использован стабилизирующий отжиг. Отжигу в вакууме (температура – 520 ± 10 °С, время выдержки – 2 ч) подвергали готовые детали. Микроструктура перехода сплав – серебро приведена на рис. 3. Видно, что стабилизирующий отжиг позволил улучшить степень сцепления покрытия с металлом замка.



сплав ВТ18, X 500

Рисунок 3 – Микроструктура переходного слоя сплав – серебро после стабилизирующего отжига

Попутно изучили влияние стабилизирующего отжига на длительную и усталостную прочности сплавов ВТ3-1, ВТ8, ВТ9 и ВТ18. Испытания проводили по известным методикам в соответствии с требованиями действующих стандартов.

Испытания лопаток из сплавов ВТ8 и ВТ9 проводили на четырех уровнях напряжений: $\sigma = 520, 480, 460, 440$ МПа. Лопатки, не разрушившиеся при испытании, проверены цветной дефектоскопией. Дефекты не обнаружены. Получен предел выносливости для лопаток пятой, шестой и седьмой ступеней компрессора высокого давления, равный $\sigma_{-1} = 440...460$ МПа. Предел выносливости лопаток без стабилизирующего отжига составлял $400...420$ МПа. Таким образом, установлено, что выносливость сплавов ВТ8 и ВТ9 после стабилизирующего отжига повышается на 10...15 %. Длительная прочность этих сплавов не изменяется.

Стабилизирующий отжиг сплава ВТ18 позволяет повысить его длительную прочность на 7...10 %, при этом его выносливость не изменяется. Как было установлено, стабилизирующий отжиг практически не влияет на свойства сплава ВТ3-1, что можно объяснить устойчивостью β -фазы, полученной при проведении изотермического отжига. Нами не было обнаружено структурных изменений сплава после стабилизирующего отжига. В сплавах ВТ8 и ВТ9, из-за меньшей устойчивости β -фазы, наблюдали дестраивание структуры сплавов при стабилизирующем отжиге, что повышало и его выносливость. Испытания показали, что стабилизирующий обжиг обеспечивает повышение выносливости лопаток из титановых сплавов не менее чем на 10...15 %.

Аналогичные исследования по нанесению покрытий на замки компрессорных лопаток из сплава ЭП718-ИД показали, что нанесение серебряного покрытия на жаропрочный сплав возможно и эффективно. При этом не требуется дополнительного стабилизирующего отжига, так как лопатки вальцуются 2...3 раза и после каждой вальцовки проводят термическую обработку, в результате чего лопатки поступают на серебрение в отожженном состоянии.

Выводы

1. На ОАО «Наро-Фоминский машиностроительный завод» разработан и внедрен метод вакуумного магнетронного напыления серебра на замки рабочих лопаток компрессора.

2. Определены основные технологические параметры нанесения серебряной пленки.

3. Показано, что для качественного напыления серебра на замки рабочих лопаток, изготовленных из титановых и жаропрочных сплавов, необходима соответствующая подготовка поверхностей деталей, которая предусматривает удаление оксидного слоя, достижение необходимого класса чистоты поверхности после механической обработки и снятие остаточных напряжений в поверхностном слое металла замка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. НТЦ «Нанотехнология» Магнетронное распыление. Режим доступа: http://www.Nano.org.ua/magnetron_rus.htm.
2. Патент РФ № 2296182. Установка для нанесения покрытий в вакууме / *А. Н. Афонин, С. Н. Бобраков, В. Д. Малыгин*; заявитель и патентодержатель ООО «ЭСТО-Вакуум». Оpubл. 27.03.2007.
3. Патент РФ № 2296181. Способ обработки поверхности лопаток газотурбинного двигателя / *А. Н. Афонин, С. Н. Бобраков, В. Д. Малыгин*; заявитель и патентодержатель ООО «ЭСТО-Вакуум». Оpubл. 27.03.2007.
4. Патент РФ № 2296180. Способ нанесения покрытия на изделия в вакуумной камере / *А. Н. Афонин, С. Н. Бобраков, В. Д. Малыгин*; заявитель и патентодержатель ООО «ЭСТО-Вакуум». Оpubл. 27.03.2007.

Стаття надійшла до редакції 19.04.2010 р.

Рецензент, проф. Б.П.Середа