

## МЕТОДЫ АКТИВАЦИИ ПОВЕРХНОСТНЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО АЗОТИРОВАНИЯ

В настоящее время на отечественных машиностроительных заводах для увеличения ресурса работы нагруженных деталей, подвергаемых изнашиванию, широко используется химико-термическая обработка (ХТО). Одним из видов такой обработки является диффузионное насыщение поверхности азотом, т.е. азотирование, которое эффективно повышает не только твердость и износостойкость деталей, но и коррозионную стойкость поверхностного слоя детали.

Традиционное азотирование позволяет сформировать относительно тонкий, равномерно распределенный слой нитридов при относительно длительном периоде обработки. Поэтому вопросы интенсификации процессов низкотемпературного насыщения азотом поверхностных слоев и получения износостойких диффузионных слоев с особой морфологией слоя является актуальной научной задачей [1]. Существующие методы азотирования не используют многие потенциальные возможности для его интенсификации и повышения эффективности.

Обобщенно отмечают следующую классификацию интенсификации процесса азотирования [1, 2]:

- ускорение за счет изменения температурного режима;
- ускорение за счет использования катализаторов;
- ускорение за счет физических методов воздействия.

По результатам многочисленных теоретических и экспериментальных работ и авторского опыта можно выделить следующие основные приемы интенсификации азотирования и модификации диффузионного слоя (рисунок 1) [1–5]:

1. Управление режимом обработки: управление температурой, временем, параметрами разряда, в том числе реализация термоциклической обработки, обработка пульсирующей плазмой и пр.

2. Добавление в насыщающую среду катализаторов и активаторов, например хлор- фторсодержащих компонентов.

3. Активация азотирующей атмосферы, например, для ионно-плазменного азотирования (ИПА) это варьирование составом смесей газов.

4. Применение спецсталей с эффективной схемой легирования. Например, легирование титаном и ванадием для повышения твердости, а медью и цинком для повышения пластичности.

5. Дополнительная обработка химическим и электрохимическим способом. Формирование химически активного состояния поверхности, например, предварительное оксидирование. Оксидирование перед азотированием представляет собой предварительную термическую обработку в печах, как правило, в печной атмосфере без подачи дополнительно кислорода в камеру, с целью получения оксидной пленки. На начальном этапе диффузии она способствует поглощению азота. В этом варианте активирования поверхности, как правило, предполагается формирование нанооксидного (субмикроскопического) слоя толщиной до 1,0 мкм. Возможен вариант не оксидирования, а отжига образцов в специальной газовой среде, например, для ИПА – в смеси  $F_3N + N_2$  [2, 6].

6. Дополнительная обработка механическим способом. Активация поверхности ударно-волновой обработкой, прошивка порошковыми частицами и формирование канальных зон.

7. Дополнительное воздействие физическими методами. Воздействии переменными электромагнитными полями, ультразвук, ТВЧ, лазерное излучение.

Первоначально технологии интенсификации процесса азотирования, как отмечалось нами в работах ранее, были простыми и заключались, например, в двойном температурном цикле азотирования, при котором вначале температуру процесса поддерживали около 500 °С, а затем около 600 °С. В дальнейшем технологии совершенствовались и усложнялись.

Необходимо отметить важный аспект активирования: практически все описываемые приемы принципиально не изменяют скорость диффузии, она зависит главным образом от состояния поверхности и химического состава стали. Отметим, что обобщенно под активированием понимается дополнительное воздействие перед обработкой или непосредственно в процессе азотирования физических и химических факторов, вызывающих ускорение

процесса диффузии, образование диффузионного слоя с высокими физико-механическими свойствами.



Рисунок 1 – Блок-схема путей интенсификации азотирования, модификации и повышения характеристик диффузионного слоя

Известно, что в задачах интенсификации ХТО основной акцент делается на ускорении тех стадий процесса, которые являются лимитирующими. С этой целью целесообразным будет рассмотреть влияние каждой стадии на процесс ионно-плазменного азотирования (таблица 1) [4, 7].

Рассмотрим возможные интенсифицирующие воздействия при азотировании и характер их влияния на элементарные стадии ХТО (таблица 2).

Таблица 1 – Стадии ХТО

Элементарная стадия ХТО	Где реализуется
1. Реакция в среде. Образование компоненты, выполняющей функции массопереноса	пространство, окружающее изделие
2. Диффузия в среде. Перенос активных атомов к поверхности металла	
3. Реакция на границе раздела фаз, адсорбция, хемосорбция активных атомов легирующего элемента	граница раздела «насыщающая среда – обрабатываемая поверхность»
4. Диффузия в металле	
5. Реакция в металле, образование твердых растворов и химических соединений	в поверхностном слое металла

Таблица 2 – Интенсифицирующие воздействия при азотировании и характер их влияния на элементарные стадии ХТО

Интенсифицирующие воздействия	Воздействие на элементарные стадии ХТО				
	1	2	3	4	5
<b>Физические воздействия</b>					
Электромагнитные поля	–	–	+	+	–
Лазерное излучение	–	–	–	+	+
Ультразвуковые колебания	–	–	+	+	–
Индукционный нагрев	–	–	+	+	+
<b>Технологические воздействия</b>					
Управление режимами обработки	+	+	+	+	+
Термоциклирование	–	–	–	+	–
Пластическая деформация	–	–	+	+	–
<b>Химические (электрохимические) воздействия</b>					
Активаторы и катализаторы	+	+	+	–	–
Состав азотирующей атмосферы	–	+	+	–	–
Оксидирование	–	–	+	+	+
Гальванические покрытия	–	–	+	+	+

Для ИПА первые две стадии практически отсутствуют, поскольку при устоявшемся режиме обработки ионизированная газовая среда обеспечивает постоянный подвод насыщающего элемента к поверхности. В качестве лимитирующих стадий можно выделить, прежде всего, диффузию в металле (п. 4, таблица 1) и реакцию в металле (п. 5, таблица 1), т.е. взаимодействие с образованием или твердых растворов, или химических соединений.

Таким образом, для ИПА выгоднее всего влиять, с целью интенсификации, на диффузию элемента в металл. Из рассматриваемых приемов интенсификации лишь немногие имеют потенциал активации именно этой стадии ХТО. В частности, такая интенсификация может быть достигнута динамической обработкой (прошивка) порошковыми частицами, которые формируют локальные зоны, ускоряющие процесс диффузии атомов вдоль формирующихся каналов.

Ряд элементов (чистых металлов, соединений), эффективность которых предполагается высокой, при динамических приемах активирования не исследованы.

Приведем укрупненный анализ влияния некоторых легирующих элементов (чистых металлов) на эффективность при азотировании:

1) алюминий (формируется однородный и износостойкий слой нитридов, характеризующийся высокой прочностью сцепления с основой, есть опасность образования повышенной хрупкости поверхностной нитридной зоны и выделение нитридов в виде сплошной каймы);

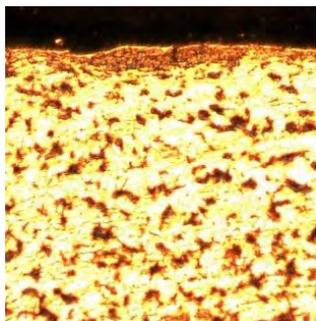
2) титан и ванадий (повышается поверхностная твердость, возрастает эффективная глубина слоя);

3) медь, цинк (формируется однородный диффузионный слой, повышается пластичность, снижается хрупкость).

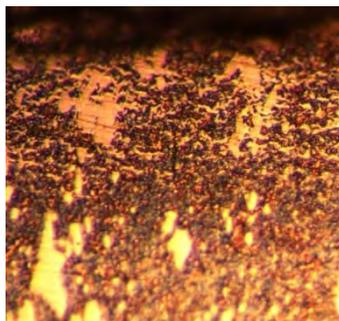
Для активации поверхности использовался процесс динамической прошивки стали сгустками порошковых частиц [8]. В рамках этого процесса поток микрочастиц прошивает образцы стали 20 и Х12Ф в твердом агрегатном состоянии за время менее чем 1000 мкс на глубины в сотни миллиметров. Далее проводилось ИПА образцов по режиму: температура 560 °С, время 10 ч.

Для стали, традиционно не применяющейся для процессов азотирования (сталь 20), диффузионный слой образовался по толщине незначительный (около 0,05–0,10 мм), причем преимущественно

состоящий из зоны внутреннего азотирования, нитридный слой составил около 5 мкм. Морфология слоя практически идентична традиционной, нитридная зона однородна, выделяются только несколько участков с более глубоким проникновением в стальную матрицу (рисунок 2, а). На стали Х12Ф (рисунок 2, б) отсутствует нитридная зона (белый слой), диффузионный слой неоднородный и состоит преимущественно из зоны внутреннего азотирования и включений нитридов (предположительно низшего нитрида –  $\gamma'$ ).



а  $\times 200$



б  $\times 1000$

Рисунок 2 – Микроструктуры стали 20 (а) и стали Х12Ф (б) после предварительной активации прошивкой и последующим ионно-плазменным азотированием

В результате апробации процесса активирования поверхности прошивкой порошковыми частицами (фторид натрия, карбид кремния, алюминий) конструкционной стали 20 и инструментальной стали Х12Ф выявлены процессы ускорения диффузионных процессов за счет созданного дополнительного градиента концентрации и дефектности структуры.

## Литература

1. **Ионная** химико-термическая обработка сплавов : Монография / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. – 399 с.
2. **Козечко, В.А.** Интенсификация процесса азотирования конструкционной стали / В.А. Козечко // Журнал инженерных наук. – 2014. – Т. 1. – № 3. – С. F1–F5.

3. **Лахтин, Ю.М.** Современное состояние процесса азотирования / Ю.М. Лахтин // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 1993. – № 7. – С. 17–21.

4. **Теория** и технология азотирования / Ю.М. Лахтин [и др.]. – М.: *Металлургия*, 1991. – 320 с.

5. **Ионная** химико-термическая обработка сплавов / Б.Н. Арзамасов [и др.]. – М.: *Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана*, 1999. – 400 с.

6. **Бойназаров, У.Р.** Влияние предварительного окисления на процесс азотирования / У.Р. Бойназаров, А.А. Каримов // *Современные материалы, техника и технология : материалы 3-й Междунар. науч.-практ. конф., Курск, 27 декабря 2013 г.; редкол.: Горохов А.А. (отв. ред.); Юго-Зап. гос. ун-т. В 3-х т.– Курск, 2013. Т. 1. – С. 90–92.*

7. **Будзыновский, Т.** Анализ влияния легирования и параметров процесса на структуру и свойства азотированных слоев сталей с целью оптимизации состава стали и технологии азотирования : автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / Т. Будзыновский; СПбГТУ. – СПб., 2000. – 32 с.

8. **Using dynamic** pre-activation of steel surfaces for nitriding intensification / Y. Usherenko [et al.] // *11th International Scientific and Practical Conference Environment. Technology. Resources : Proceedings, Rezekne, Latvia, 15–17 of June 2017. – Rezekne, Latvia, 2017. – Vol. 3. – P. 321–324.*

*УДК 621.785.5*

**В.Г. ДАШКЕВИЧ, канд. техн. наук (БНТУ)**

## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛУПРОНИЦАЕМЫХ СЛОЕВ ДЛЯ ТЕРМОДИФФУЗИОННОГО БОРИРОВАНИЯ**

**Введение.** Химико-термическая обработка применяется в различных отраслях машиностроения для повышения надежности и долговечности широкого ассортимента деталей машин и инструмента, позволяет получать на поверхности изделия слой, отли-