

Для титановых сплавов разработаны режимы биполярной ИЭХП, обеспечивающие полирование поверхности с образованием гладкой зеркальной поверхности (Ra 0,1). Для сплавов из циркония, магния и нитинола разработаны режимы униполярной ИЭХП, обеспечивающие высокую эффективность сглаживания микронеровностей при низком съёме материала.

На основании полученных результатов отработаны процессы импульсного электрохимического полирования (ИЭХП) ряда изделий из легкоокисляемых металлов и сплавов, применяемых в медицине. Примеры обработки деталей с помощью разработанной технологии представлены на рис. 1.

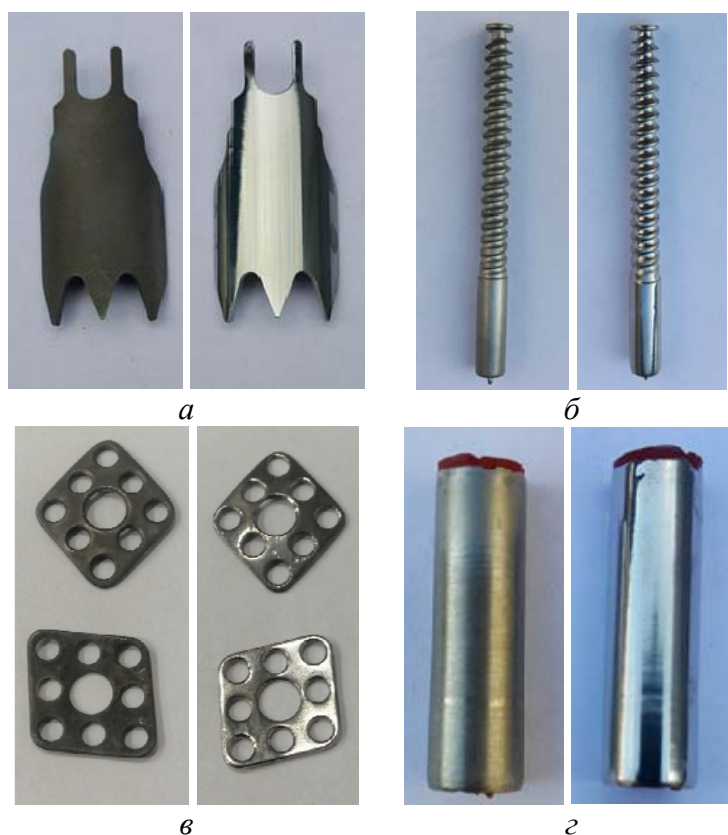


Рисунок 2 – Примеры ИЭХП изделий из легкоокисляемых металлов и сплавов: *а* – нитинол; *б* – титановый сплав ВТ6; *в* – титан ВТ1-0; *г* – циркониевый сплав Э110

#### Список использованных источников

1. Применение импульсных режимов при электрохимическом полировании коррозионностойких сталей / Ю.Г. Алексеев [и др.] // Наука и техника – 2019. – 18 №3. – 200-209 с.

УДК 621.789

### ЗАКОНОМЕРНОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ МИКРОСТРУКТУРЫ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СТАЛИ ПРИ АЗОТИРОВАНИИ В УСЛОВИИ НЕСТАЦИОНАРНОГО НАГРЕВА

*Пацэко Е.К.*

*Белорусский национальный технический университет*

Широко используемые процессы термической и химико-термической обработки металлов и сплавов, основанные на однократном нагреве и охлаждении, наиболее распространены в промышленном производстве. Азотирование, закалка и отпуск изучены,

отработаны и обеспечивают требуемые окончательные свойства сплавов. Недостатком стационарных процессов является их ограниченное влияние на микро- и субструктуру материала, а, следовательно, на комплекс эксплуатационных свойств готового изделия.

Процесс термоциклирования основан на чередовании стадий нагрева и охлаждения, которые могут повторяться с разной интенсивностью в количестве от двух и более раз. Основными параметрами термоциклической обработки являются скорость нагрева и охлаждения, диапазон температур, в которых осуществляется процесс [1–5].

Процессы низкотемпературного азотирования получили широкое распространение, так как после них не происходит разупрочнения сердцевины изделия и не требуется дополнительная термическая обработка. Однако на сегодняшний день такие процессы не используют всех потенциальных возможностей для повышения их эффективности, интенсификации и снижения себестоимости продукции. В связи с этим оптимизация классического процесса азотирования и сокращение времени насыщения в несколько раз при увеличении толщины диффузионного слоя без снижения физико-механических характеристик является актуальной задачей металловедения.

Азотирование – процесс многофакторный, т.е. строение, состав и свойства получаемых слоев изменяются в широких пределах при изменении всего одного или двух технологических параметров. Термоциклическое азотирование [2-3] – это двухстадийное азотирование с изменением температуры на стадиях насыщения и рассасывания.

Сложность интенсификации азотирования заключается в низком коэффициенте диффузии азота в железе ( $0,35 \times 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с), что обусловлено температурой процесса (450...650°C). Повышение температуры процесса оказывает влияние на коэффициент диффузии, который возрастает до значения  $0,7 \times 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с. Рост температуры с 450°C на каждые 50°C дает увеличение толщины слоя на 0,1 мм за равный промежуток времени.

Диффузионный слой, полученный в результате порошкового азотирования, в процессе последующего деазотирования претерпевает существенные изменения, причем изменения происходят как в поверхностной нитридной зоне, так и в зоне внутреннего азотирования. Диффузия азота при деазотировании имеет свои особенности. При непрерывном азотировании диффузия азота происходит в одном направлении, то есть в глубь металла. При последующем отжиге источником активного азота является сам азотированный слой. Начинается диффузия азота в двух направлениях от концентрационного максимума его в слое – в прямом, то есть по направлению в глубь металла, и в обратном – по направлению из металла.

Следует отметить, что циклический нагрев в сталях вызывает внутренние (структурные, фазовые и температурные) напряжения, релаксация которых приводит к локальной межзеренной микропластической деформации при одновременном сохранении стабильности размеров образцов и деталей. Установлено, что для термоциклированных сталей свойственны более высокая скорость и большая степень релаксации напряжений, чем для закаленных и нормализованных: наиболее активный характер релаксации напряжений наблюдается при 750...800°C, когда релаксирует до 96% напряжений в течение 3 минут [6].

Также не исключено многофакторное воздействие на процесс циклического азотирования за счет периодического чередования циклов насыщения и «рассасывания» слоя. При интенсивном выделении азота из порошковой среды (550 С) происходит насыщение, во время снижения температуры до 300°C, становится максимально возможным уменьшение насыщающей способности атмосферы, создается значительный перепад концентраций на поверхности и в глубине металла для стимулирования диффузии. Таким образом, дополнительная интенсификация происходит за счет двухстадийности процесса азотирования насыщение и рассасывание (деазотирование) при разной температуре.

В случае стационарного режима насыщения формируется диффузионный слой с равномерно распределенной микротвердостью. Максимальное значение которой достигнуто на поверхности, а по мере прохождения слоя, плавно уменьшается к основной микроструктуре.

Азотирование с применением термоциклирования в условиях печного нагрева позволяет интенсифицировать диффузию азота, скорость формирования диффузионного слоя, а также повысить свойства диффузионного слоя по сечению и на поверхности доэвтектидной стали. Тем самым за равный промежуток времени (8 ч) при термоциклировании формируется на 15...20 % большая толщина термодиффузионного слоя, более высокая микротвердость поверхности и зон диффузионного слоя на основе фаз  $\gamma'$  и  $\epsilon'$ , а также зоны внутреннего насыщения. Интенсификация процессов достигается за счет: градиента температуры и напряжений в поверхностном слое стального изделия; формирования растягивающих напряжений на поверхности во время стадии охлаждения образца [3-6], интенсивности теплосмен в единицу времени (не менее 8 раз за 8 ч) при одинаковой общей продолжительности насыщения.

При нестационарном режиме с частотой менее 1 термоцикла в час толщина слоя практически не отличается от стационарного режима и составляет 0,25 мм (за 8 ч). Также следует отметить, что термоциклирование с полной фазовой перекристаллизацией в условиях печного или индукционного нагревов оказывает интенсифицирующее воздействие на перемещение диффундирующих атомов в металлической матрице. Основными причинами быстрого формирования слоя являются: микропластическая деформация зерен, последующие процессы рекристаллизации зерен, а также мелкозернистая структура на протяжении всего цикла насыщения [5-6].

#### Список использованных источников

1. Гурьев, А.М. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей / А.М. Гурьев, Л.Г. Ворошнин, Ю.П. Хараев // Ползуновский вестник. Часть 2, 2005. – № 2. – С. 36-44.
2. Белашова, И.С. Интенсификация процессов азотирования деталей авиационной / Белашова И.С., А.О. Шашков. // Электронный журнал «Труды МАИ». В. № 47. 2014
3. Лыгденев, Б.Д. Интенсификация процессов формирования структуры диффузионного слоя при химико-термической обработке сталей: автореф. дис. ... д-ра. техн. наук: 05.02.01 / Б.Д. Лыгденев. – Барнаул, 2009. – 29 с.
4. Герцрикен, С.Д. Диффузия в металлах и сплавах в твердой фазе / С.Д. Герцрикен, И.Я. Дехтяр. – М.: Физматгиз, 1960. – 564 с.
5. Забелин, С.Ф. Основы технологии и кинетической теории процессов диффузионного насыщения сталей в условиях термоциклического воздействия на материал: дис. ... д-ра техн. наук: 05.16.01 / С.Ф. Забелин. – Чита. 2004. – 254 л.
6. Константинов, В.М. Структурообразование диффузионных слоев на конструкционных сталях при циклическом нагреве / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко, В.М. Семенченко // Наука и инновации: сб. научн. труд. VII междунар. научн.-практической. конф., Przemysl, 7-15 октября 2011 г. / редкол.: Targalski и [др.]. – Przemysl, 2011. – С. 6-8.

УДК 621.793

#### ИССЛЕДОВАНИЕ КОРРОЗИОННОЙ СТОЙКОСТИ ХРОМОВЫХ ПОКРЫТИЙ, СФОРМИРОВАННЫХ ЭЛЕКТРОДЕФОРМАЦИОННЫМ ПЛАКИРОВАНИЕМ

*Пилипчук Е.В.*

*Белорусский национальный технический университет*

**Abstract.** *The results of a comparative assessment of the corrosion resistance of coatings based on chromium, formed by the methods of galvanic deposition and electro-formation cladding with a flexible tool (EDPGI) are presented. It is shown that the clad chromium coat-*