

**Изучение особенностей формирования диффузионного слоя в условиях печного и ионно-плазменного нагрева**

Ткаченко Г.А.

Белорусский государственный университет

Азотированный слой на стали, как известно, обеспечивает износостойкость, коррозионную стойкость в неагрессивных средах, разгаростойкость и т.д. Существенным недостатком азотирования является продолжительность формирования диффузионного слоя, которая составляет от 12 и более часов в зависимости от марки стали и требуемой толщины слоя. Растворимость азота в феррите не более 0,115 %, трудно образуются нитриды железа. На углеродистых сталях твердость азотистого слоя не превышает 300 HV0.1, на легированных 700 HV0.1 и более.

Сложность интенсификации азотирования заключается в низком коэффициенте диффузии ( $0,35 \times 10^{-7}$  см<sup>2</sup>/с) азота в железе, что обусловлено температурой процесса (450...650 °С).

В исследованиях по циклическому азотированию углеродистых сталей были определены режимы: № 1 – заключался в нагреве стального образца до 600 °С выдержке в течение 2 часов и последующего переноса в печь с температурой 400 °С с выдержкой в 1 час; № 2 – заключался в нагреве до 600 °С, выдержке в 1 час и охлаждении в печи с температурой 400 °С с выдержкой в течение 0,5 часа. № 3 – представлял собой нагрев до 600 °С с выдержкой 0,5 часа при 300 °С. Продолжительность режимов циклического азотирования составила 8 часов. Толщина слоя (сталь 40X) составила 0,2 мм по стационарному режиму. Циклическая обработка проводилась с использованием порошковой среды в металлическом контейнере под плавким затвором.

Перед азотированием образцы 40X были подвергнуты полному отжигу на микроструктуру соответствующую доэвтектоидной стали (феррит и перлит).

Азотирование образцов из стали 40X по режиму № 1 привело к формированию диффузионного слоя толщиной 0,15 мм (сталь 40X). Данный результат можно объяснить тем, что температурный градиент по сечению образца быстро нивелировался и формирование, напряженно-деформированного состояния (источник интенсификации диффузионных процессов при ТЦО) на поверхности образца, не происходило. Отсутствие фазовых превращений компенсируется растягивающими напряжениями в слое, под действием которых происходит интенсификация.

Азотирование по режиму № 2 в условиях циклического нагрева позволило получить более высокий уровень механических свойств и диффузионный слой большей толщины (рисунок 1). Однако в условиях термоциклирования на поверхности образца (сталь 40X) твердость слоя ниже (650 HV0.1), чем в стационарном режиме (700 HV0.1). Снижение твердости обусловлено превышением скорости диффузии атомов азота вглубь материала над скоростью адсорбции атомов.

Диффузионное насыщение азотом по режиму № 3 дает больший градиент твердости по толщине слоя по сравнению со стационарным режимом. На поверхности твердость образца стали 40X после термоциклирования невысокая, однако по толщине слоя повышается, что обусловлено скоростью диффузии атомов азота вглубь материала (рисунок 1). В переходной зоне, на расстоянии 0,3 мм от поверхности образца, твердость составила 380 HV0.1, в то время как при стационарном нагреве твердость в данной точке соответствовала основному материалу (250 HV0.1).

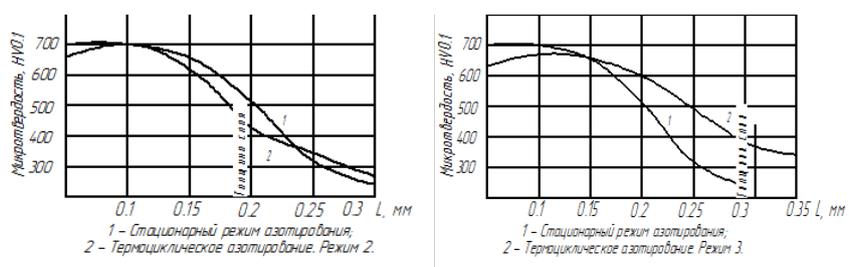


Рисунок 1 – Распределение микротвердости по толщине диффузионного слоя на стали 40X (режим 2 и 3)

Таким образом термоциклическое азотирование в условиях печного нагрева позволяет интенсифицировать диффузию атомов азота. Это обеспечивает за равный промежуток времени (8 часов) большую толщину слоя (15-20 %) и высокую твердость по толщине слоя (на 200 HV0.1). Морфология слоя и сердцевины стали 40X различается. В азотсодержащем слое перлит состоит из зернистого цементита, а в сердцевине из пластинчатого цементита.

Учитывая положительный опыт [1-3] интенсификации диффузионных процессов при азотировании с печным нагревом можно утверждать, что применение циклической ионно-плазменной термической обработки позволит сформировать диффузионный слой требуемой толщины за меньшее время.

С целью установления влияния ионно-плазменного азотирования на закономерности, зависимости структурообразования диффузионного слоя в матрице основного материала (инструментальные стали) в условиях термогазоциклического воздействия реализованы исследования следующего содержания. В частности, установлены зависимости толщины нитридной зоны от длительности полуциклов насыщения и «рассасывания».

Температурный интервал термоциклирования при газоциклическом азотировании инструментальных сталей представлял собой нагрев до 600 °С, выдержку в течение 2 часов и перенос в печь с температурой 400 °С с последующей выдержкой 1 час (режим 1). Режим 2 (1 час на 1,5 часа), режим 3 (0,5 часа на 0,5 часа). Режим стационарного насыщения имел продолжительность 8 часов при температуре 600 °С, что обеспечило толщину слоя 168 мкм на стали 4X5МСФ (рисунок 3).

Проведение термоциклирования с частотой 4 термоцикла позволяет сравнить значения с полученными при термоциклировании с выдержкой. В результате термоциклического азотирования формируются композиционные нитридные слои с чередующимися прослойками высокоазотистых и низкоазотистых фаз, азотистого феррита. Толщина слоя составляет 124 мкм (рисунок 3).

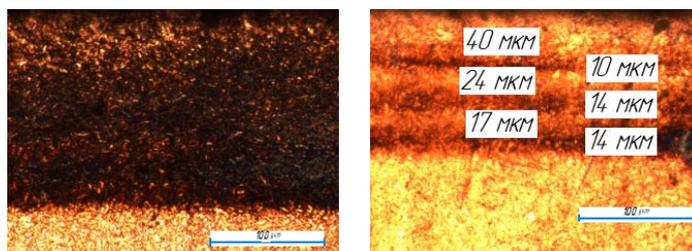


Рисунок 3 – диффузионные слои при ИПА (с левой стороны – стационарный процесс; с правой стороны – циклический процесс)

Термоциклирование с частотой 6 термоциклов позволяет сформировать композиционные нитридные слои с чередующимися прослойками высокоазотистых и низкоазотистых фаз, азотистого феррита с толщиной азотированного слоя 138 мкм. Что значительно меньше, чем при термоциклировании с выдержкой, но при этом на 14 мкм больше, чем после 4 циклов теплосмен.

Особенности формирования диффузионных слоев в условиях циклического нагрева в контейнере (порошковая среда) и по режиму термогазоциклирования с использованием ионно-плазменного нагрева представляют собой следующее.

При термоциклировании в контейнере, на стадии охлаждения (ниже температуры интенсивной химической реакции в порошковой среде) количество носителей молекулярного азота уменьшается и за счет этого наблюдается «рассасывание» слоя (за счет температуры и релаксации напряженно-деформированного состояния). Последующий цикл нагрева запускает процесс химической реакции между компонентами среды. Увеличивается концентрация активных атомов, интенсифицируются сорбционные процессы. В металлическом образце при нагреве процесс «разгонки слоя» интенсифицируется с ростом температуры.

Во время термогазоциклирования в ионно-плазменной среде концентрация атомарного азота находится на постоянном уровне. Это обеспечивает все стадии диффузионных процессов. Во время охлаждения образцов в печи насыщающая среда отсутствует и наблюдается незначительный процесс «разгонки слоя». Стадия нагрева образцов в печи с ионно-плазменной атмосферой приводит к росту диффузионного слоя, поверх сформировавшегося ранее азотсодержащего слоя. Это связано с высокой концентрацией компонента в насыщающей атмосфере и быстрым поверхностным нагревом, также химическим составом стали (диффузия азота из сформированных нитридов легирующих элементов затруднительна, так как соединение стабильно при высоких температурах). Преобладающим становится процесс формирования слоя, а не диффузии вглубь металла.

Таким образом, термоциклический нагрев по предложенным режимам в отличие от стационарного процесса позволяет за равный промежуток времени (8 часов) сформировать диффузионные слои, обладающие повышенной микротвердостью по толщине слоя, большей концентрацией компонента по толщине слоя. Также получить уникальные композиционные слои с чередующимися прослойками высокоазотистых и низкоазотистых фаз.

Исследования выполнены в рамках задания 6.3 ГПНИ 9, подпрограмма 9.6 «Механизация агропроцессов и «точное» сельское хозяйство»

## Литература

1. Износостойкость стали 40X13 после упрочнения методом термоциклического ионно-плазменного азотирования в условиях абразивного изнашивания / А. В. Рутковский // Материалы МНПК, Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, 2009 – С. 240–250
2. Кидин, И.Н. Электро-химико-термическая обработка металлов и сплавов / И.Н. Кидин, В.И. Андрюшечкин, В.А. Волков. – М.: Металлургия, 1978. – 320 с.
3. Константинов В.М., Ткаченко Г.А. Упрочнение быстроизнашиваемых деталей почвообрабатывающих плугов нитроцементацией с локальным циклическим индукционным нагревом / В.М. Константинов, Г.А. Ткаченко // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. – №2. – С. 44 – 50.
4. В.М. Константинов, Исследование особенностей структурообразования доэвтектоидных конструкционных сталей при различных режимах термоциклической обработки // В. М. Константинов, Д.М. Бердиев, А.А. Юсупов, Г.А. Ткаченко / Металлургия: Республ. Межведом. Сб. науч. Тр. Вып.42 – Минск: БНТУ, 2021. С. 176-189.