

УДК 621.785.53  
DOI:10.30987/2223-4608-2020-6-12-15

А.Д. Федотова, аспирант  
(ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (МИИТ),  
127994, г. Москва, ул. Образцова, д 9, стр. 9)  
E-mail: afca23@mail.ru

## Анализ процессов азотирования и технология для мелкосерийного производства

*Рассмотрены основные виды азотирования сталей и механизм массопереноса в насыщающей среде и обрабатываемом материале. Описаны стадии протекания процесса азотирования, выявлены несовершенства существующих технологий и предложен метод азотирования сталей в герметичных контейнерах. Приведены результаты эксперимента на двух видах сталей 40X и 4X5MΦС.*

**Ключевые слова:** азотирование; газовая среда; карбоназотированный слой; твердость; упрочнение; термическая обработка.

A.D. Fedotova, Post graduate student  
(FSAOU HE "Russian University of Transport" (MIIT), Building 9, 9, Obratsov Str., Moscow, 127994)

## Analysis of nitride hardening and technology for small-batch production

*There are considered basic kinds of steel nitride hardening and mechanism of mass transfer in saturating environment and material worked. The stages of a nitride hardening process are described, there are revealed imperfections of existing technologies and a method for steel nitride hardening in hermetically sealed containers is offered. The results of the experiments on two kinds steel 40H and 4H5MFS are shown.*

**Keywords:** nitride hardening; gas environment; carbon-nitride layer; hardness; strengthening; thermal treatment.

При восстановлении размеров деталей машиностроения с большими величинами допустимого изнашивания (более 1 мм) применяют сварочные технологии (наплавка, наварка, напыление и т.п.). Эти технологические операции связаны с локальным нагревом металла до высоких температур (более 900 °С). Это приводит к появлению напряжений растяжения в поверхностных слоях металла, которые существенно снижают усталостную прочность деталей. При эксплуатации на поверхностях таких деталей легко зарождаются, а затем развиваются микротрещины, которые переходят в макротрещины, приводящие в последствии к разрушению детали. Все это сокращает срок службы восстановленных деталей.

Целью данной работы является разработка технологии азотирования для повышения работоспособности деталей, восстановленных

сварочными технологиями.

Восстановление изношенных деталей – это достаточно эффективный и экономически оправданный метод, который хорошо зарекомендовал себя за многие годы применения в промышленности. Поэтому проблема заключается в поиске путей предотвращения преждевременного зарождения микротрещин, которые появляются в результате образования растягивающих напряжений при восстановительных технологиях. Например, для их устранения используют процессы с последующей термической обработкой (отжиг, нормализация) и химико-термические процессы (цементация, нитроцементация, азотирование). В этих случаях удастся избавиться от растягивающих напряжений и обеспечить второй жизненный цикл детали.

В частности, широко применяется в промышленности процесс азотирования, который

проводят в жидкой, порошковой или газообразной среде, при разных температурах и длительности процесса [1].

*Жидкостное азотирование.* Проводят в расплаве солей азота при температуре порядка 550...650 °С в течение 1...3 ч в специальной ванне. Метод считается наиболее эффективным благодаря быстрому массопереносу, который возможен только в жидкой фазе, когда ионы азота расположены максимально близко к поверхности детали и имеют возможность беспрепятственно восстанавливаться до атомарного состояния на поверхности, адсорбироваться на ней и диффундировать в кристаллическую решетку металла детали.

*Порошковое азотирование.* Длительность 3...15 ч в зависимости от необходимой толщины слоя и температуры в интервале 520...570 °С. Обладает низкой технологичностью, связанной с необходимостью упаковки деталей в порошковую смесь и их распаковки, а также быстрым снижением насыщающей способности смеси.

*Газовое азотирование.* Проводят в специальных печах в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре 500...600 °С в течение 8...75 ч. Данный метод наиболее распространен на предприятиях во всем мире, так как позволяет полностью автоматизировать процесс. Помимо значительной длительности требует наличия специальных нагревательных установок и очистительного оборудования. Процесс эффективен при массовом производстве.

*Ионное азотирование.* Является наиболее перспективным, обеспечивает формирование технологичных слоев за приемлемые промежутки времени (6...12 ч), но возникают затруднения при обработке деталей сложной формы и больших размеров. Как правило, насыщающая среда содержит аммиак.

При очевидных различиях все процессы имеют схожую природу и основаны на теории процессов массопереноса в насыщающей среде и в обрабатываемом материале. В насыщающей среде массоперенос осуществляется ионами низших валентностей [2], а в обрабатываемом материале – путем диффузионного перемещения за счет градиента концентраций на поверхности и в глубине материала и термодинамической активности насыщающего элемента [3].

При азотировании механизм массопереноса состоит в том, что ионы азота низших валентностей при достижении обрабатываемой поверхности по реакции диспропорционирова-

ния или по электрохимическим законам переходят в ионы высших валентностей, оставляя на поверхности атомы азота, которые адсорбируются поверхностью детали. При диффузии этих атомов образуется слой  $\alpha$ -твердого раствора азота в железе.

При достижении значительных концентраций азота на поверхности (более 5,7 % N) в результате реакционной диффузии образуется нитридный слой. Массоперенос азота осуществляется в режиме самоорганизации и на его скорость влияет насыщающая среда и скорость ее перемещения, температура обработки, наличие встречной диффузии в металле основы, возможность атомов материала свободно переходить в насыщающую среду и др.

Таким образом, вне зависимости от среды, процесс азотирования, как и любой процесс химико-термической обработки, протекает в три взаимосвязанные основные стадии:

1) образование насыщающих атомов азота на обрабатываемой поверхности. Скорость образования атомов зависит от агрегатного состояния среды, состава насыщающей среды, характера взаимодействия компонентов среды между собой и с насыщаемой поверхностью, циркуляционных процессов и т.п. Количество атомов азота, образующихся в единицу времени, создает определенную концентрацию на обрабатываемой поверхности и характеризует насыщающую способность среды;

2) адсорбция поверхностью обрабатываемого изделия образовавшихся атомов азота, т.е. образование прочных межатомных связей (ионной, ковалентной, металлической, молекулярной /Ван-дер-Ваальсовской) с атомами обрабатываемой поверхности;

3) диффузия атомов азота вглубь металла с образованием диффузионного слоя. Возникновение диффузионного слоя возможно при постоянной адсорбции поверхностью атомов азота и обеспечении непрерывного диффузионного потока от поверхности. Скорость формирования слоя на первом этапе определяется коэффициентом диффузии атомов азота в твердом растворе, а в случае образования сплошного слоя нитридов – коэффициентом диффузии атомов азота в нитридах.

Из перечисленных методов наиболее технологичным является газовое азотирование, однако, оно основано на применении диссоциированного аммиака. Поэтому основной задачей развития газового азотирования является поиск безаммиачных насыщающих сред или сред с минимальным содержанием аммиака; либо разработка циркуляционных тех-

нологий, в которых газовая насыщающая среда полностью герметизирована (закрыта) от внешней атмосферы, а по окончании процесса обработки и последующего охлаждения газовая аммиачная среда переходит в нейтральные формы, и тогда при открывании герметизированной системы аммиак не попадает в атмосферу.

Одной из таких технологий в настоящее время является азотирование в закрытых контейнерах, в которых насыщающая газовая среда образуется в результате взаимодействия компонентов смеси при температуре процесса или их перехода в газовое состояние. По окончании процесса обработки и последующего охлаждения газовая среда переходит вначале в жидкое, а затем в кристаллическое состояние.

Например, при взаимодействии в закрытом объеме порошковой смеси, содержащей технический углерод, красную кровяную соль и фтористый аммоний при нагревании образуется газовая насыщающая смесь для проведения процесса азотирования, которая и обеспечивает массоперенос азота. Охлаждение деталей вместе с остатками смеси и газовой среды в том же закрытом контейнере позволяет избежать попадания соединений азота в атмосферу.

Было проведено азотирование в вышеупомянутой смеси в герметичном металлическом контейнере с плавким затвором на основе кварцевого песка и борного ангидрида (рис. 1). Обработке подвергали образцы из сталей марок 40X и 4X5MФC при температуре 550 °C в течение трех часов. Плавкий затвор обеспечивал защиту внутреннего объема контейнера с рабочей смесью и обрабатываемой деталью от кислорода воздуха при 450...600 °C. Нагрев проводился в электрической камерной нагревательной печи.

Нагрев при таком процессе может проводиться в печах любых видов, а также с помощью электроконтактного или ТВЧ нагрева.

Результатом обработки явилось получение на образцах карбоазотированных слоев, которые состояли из двух зон:

1. Светлый не травящийся слой нитрида железа. Толщина слоя на стали 40X – 5...7 мкм, на стали 4X5MФC – 10...15 мкм. Твердость этого слоя находится на уровне 1200 HV;

2. Зона α-твердого раствора азота и углерода в железе с включениями легированных нитридов высокой степени дисперсности. Толщина этого слоя на стали 40X – 500 мкм, на стали 4X5MФC – 350 мкм. Твердость непо-

средственно под слоем нитридов составляла: на стали 40X – 850 HV, на стали 4X5MФC – 1000 HV.

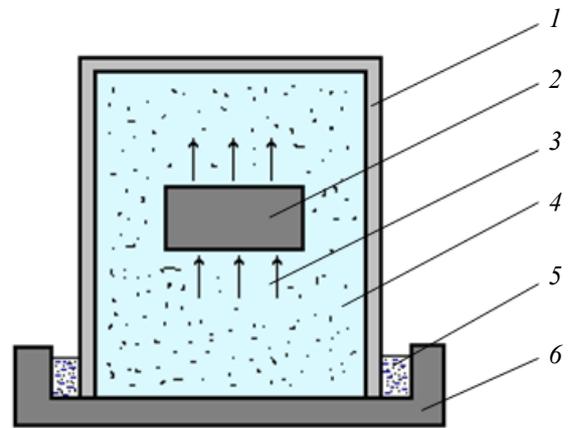


Рис. 1. Схема процесса азотирования в порошковой смеси:

1 – корпус контейнера; 2 – обрабатываемая деталь; 3 – направление насыщающего газового потока; 4 – насыщающая порошковая смесь; 5 – плавкий затвор; 6 – поддон

Значение твердости по мере удаления от поверхности к сердцевине плавно снижалось, из чего следует, что по структуре и строению, полученные таким способом слои, идентичны тем, которые получены другими распространенными способами азотирования, а значит они способны обеспечить такую же стойкость, прочность и долговечность восстановленных деталей.

Однако у описанного метода обработки есть свои нюансы, например, характер газовых потоков внутри герметичного контейнера при нагреве. В данном случае газовый поток направлен преимущественно снизу-вверх, поэтому для нижней поверхности насыщающий поток направлен к поверхности детали, а для верхней поверхности – от нее. При таком направлении потока большая толщина азотированного слоя ожидается на нижней поверхности.

В ходе эксперимента данное положение было подтверждено. На рис. 2 показан характер распределения твердости слоя от нижней и верхней поверхности образца стали 40X. Первые значения твердости на графиках получены на расстоянии 20 мкм от поверхности. Разница в толщине составила 700 мкм. Однако эта величина может изменяться в зависимости от многих факторов: формы обрабатываемой детали; плотности смеси; количества солевой

составляющей; отношения объема контейнера к объему детали.

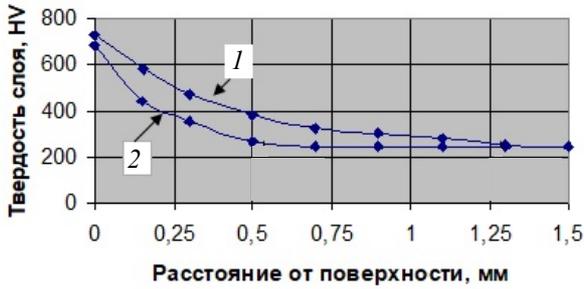


Рис. 2. Распределение твердости по толщине азотированного слоя на нижней горизонтальной плоской поверхности образцов (1) и верхней горизонтальной плоской поверхности образцов (2) стали 40X

Для получения равномерной толщины покрытия (особенно при обработке плоских деталей) рекомендуется повторная кратковременная обработка с поворотом детали на  $180^{\circ}$ .

Свойства азотированных деталей также зависят от предварительной термической обработки. После закалки и высокого отпуска наблюдается максимальный эффект от операции азотирования. Такая взаимосвязь наиболее характерна для хромистых сталей. В их структуре в процессе высокого отпуска образуются кластеры с повышенным содержанием хрома, в местах которых при азотировании образуются дисперсные нитриды хрома, что приводит к повышению твердости за счет сильного искажения кристаллической решетки. Так, например, вышеупомянутые эксперименты подтвердили, что твердость азотированной стали

40X с предварительной закалкой и высоким отпуском на 25...30 % выше, чем с предварительным отжигом.

Предложенный процесс азотирования сталей в герметичных контейнерах как нельзя лучше подходит для единичного и мелкосерийного производства при обработке восстановленных деталей. Этому способствует приемлемая длительность и температура процесса, доступность сырья для получения насыщающей среды, простота и безопасность обслуживания.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лахтин, Ю.М., Коган, Я.Д., Шпис, Х.Й., Бемер, З. Теория и технология азотирования. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
2. Крукович, М.Г., Прусаков, Б.А., Сизов, И.Г. Пластичность борированных слоев. – М.: Физматлит, 2010, – 384 с.
3. Крукович, М.Г. Моделирование процесса азотирования // МиТОМ. – 2004. – №1. – С. 24 – 31.

## REFERENCES

1. Lakhtin, Yu.M., Kogan, Ya.D., Shpis, H.-J., Bemer, Z. Theory and Technology of Nitride Hardening. – M.: Metallurgy, 1991. – pp. 320.
2. Krukovich, M.G., Prusakov, B.A., Sizov, I.G. Ductility of Borated Layers. – M.: Physmathlit, 2010, - pp. 384.
3. Krukovich, M.G. Nitride Hardening Modeling // MiTOM. – 2004. – No.1. – pp. 24-31.

Рецензент д.т.н. Н.Н. Воронин

