

УДК 621.794+621.788

DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-36-43

Л.Г. Петрова, д.т.н., **В.А. Александров**, к.т.н., **А.С. Сергеева**, аспирант
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
125319, Москва, Ленинградский проспект, 64)
E-mail: petrova_madi@mail.ru

Электрический разряд как технологический фактор интенсификации процессов химико-термической обработки изделий машиностроения*

Показаны преимущества азотирования в электростатическом и высокочастотном поле, связанные с возможностью проведения процессов при нормальном давлении. Экспериментально подтверждено ускорение процесса диффузионного насыщения азотом в электрическом поле с образованием искрового разряда по сравнению с газовым азотированием. Данный способ азотирования сталей позволяет формировать слои различного строения и толщины с заданным градиентом твердости.

Ключевые слова: химико-термическая обработка; стали; азотирование; электроискровой разряд; тлеющий разряд; диффузионный слой.

L.G. Petrova, Dr.Sc. Tech., **V.A. Alexandrov**, Can.Sc. Tech., **A.S. Sergeeva**, Post graduate student
(Moscow Road-transport State Technical University (MADI), 64, Leningradsky Avenue, Moscow, 125319),

Electric discharge as technological factor of intensification of chemical-thermal treatment of engineering products

The advantages of nitriding in an electrostatic and high-frequency field connected with the possibility of carrying out processes at normal pressure are shown. The acceleration of the process of diffusion saturation with nitrogen in an electric field with the formation of a spark discharge as compared with gas nitriding is confirmed experimentally. This method of steel nitriding allows forming layers of different structure and thickness with the specified gradient of hardness.

Keywords: chemical-thermal treatment; steels; nitriding; electrospark discharge; glow discharge; diffusion layer.

Введение

Идея поверхностного упрочнения нагруженных стальных деталей машин основана на очевидном в настоящее время подходе: для повышения надежности и долговечности многих промышленных изделий достаточно обеспечить стойкость их поверхности, которая испытывает наиболее высокие нагрузки (подвергается износу, коррозии, контактными воздействиями).

Для поверхностного упрочнения широко применяются способы создания в сталях диф-

фузионных модифицированных слоев, которые обладают существенным преимуществом по сравнению с другими видами покрытий: высокой прочностью связи с основным металлом-подложкой в результате проникновения наносимого вещества в кристаллическую решетку упрочняемого материала. Кроме того, для диффузионных слоев характерно градиентное снижение концентрации насыщающего элемента по глубине, что обеспечивает плавное изменение свойств при переходе от покрытия к металлу-основе. Главным способом создания диффузионных слоев в металлах и сплавах является *химико-термическая обработка (ХТО)* [1, 2].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №17-19-01473).

В современном мире химико-термической обработке в промышленном масштабе подвергают значительную долю деталей машин и инструмента из различных сталей. Так, среди мировых тенденций разработки высококачественных конструкционных сталей для зубчатых колес фирма DaidoSteel предлагает совершенствование способов их окончательной обработки, в том числе, процессов цементации и азотирования. В легковом автомобилестроении по данным АО «АВТОВАЗ» химико-термической обработке (цементации, азотированию, нитроцементации, карбонитрированию) подвергают до 80 % от всех термически упрочняемых деталей различных узлов и механизмов [3].

Одним из наиболее эффективных видов ХТО для поверхностного упрочнения деталей машин и инструмента из различных сталей по праву считается азотирование, что объясняется достоинствами метода, обеспечивающего при сравнительно невысоких температурах обработки существенное повышение износостойкости, коррозионной стойкости, сопротивляемости усталостным нагрузкам.

Основным недостатком традиционного газового азотирования является большая продолжительность технологического цикла для получения требуемой толщины диффузионных слоев, что увеличивает потребление расходных компонентов и энергоресурсов. Так, для получения в легированной стали азотированного слоя толщиной 0,2...0,3 мм время классического печного азотирования составляет не менее 30 ч. Проблема интенсификации азотирования имеет на сегодняшний день особую актуальность и является, пожалуй, основным направлением совершенствования ХТО, так как возможности достижения все новых свойств во многом исчерпаны или требуют чересчур громоздкого усложнения процесса.

Активизации происходящих процессов при ХТО способствует воздействие как тепловой, так и других видов энергии: лазерного излучения [4], плазмы [5], ультразвука [6]. Интенсификация процесса азотирования может быть достигнута регулированием активности атмосферы, изменением ее состава, использованием ступенчатых и газоциклических процессов [7], формированием каталитических и барьерных поверхностных пленок [8].

Интенсификация процесса азотирования возможна при проведении процесса с применением электрических разрядов различного типа (тлеющего, искрового, дугового, коронного) [9–10]. Так, азотирование в тлеющем

разряде (ионное азотирование) широко применяется в промышленности для поверхностного упрочнения различных конструкционных деталей, режущего и штампового инструмента. В отечественной и зарубежной практике ионного азотирования, в настоящее время, в качестве насыщающих атмосфер используют аммиак, азот, смеси их с инертными, углеродосодержащими газами и водородом. При использовании различных насыщающих сред необходимым условием интенсификации азотирования является регулирование азотного потенциала атмосферы.

Поскольку тлеющий разряд стабилен только в условиях разряджения (0,1...20 мм рт. ст.), то для реализации процессов требуется применение сложных вакуумных систем, обеспечивающих поддержание и регулирование газодинамических параметров разряда. Искровой и коронный разряды стабильно горят при нормальном давлении (760 мм рт. ст.). В этой связи открываются перспективы разработки электрофизических методов газоразрядного азотирования, не требующих использования вакуума и дополнительных источников радиационного нагрева. К таким методам азотирования, например, относятся процессы в электростатическом или высокочастотном поле.

Целью настоящей работы является выявление и систематизация технологических факторов регулирования и интенсификации процессов азотирования сталей в электроискровом и тлеющем разрядах.

Методика проведения экспериментальных исследований

Для исследования процесса азотирования железа и стали в условиях электрического разряда использовалась установка, состоящая из реактора (муфельной печи), источника высоковольтного напряжения, газобаллонной станции, а также систем регулирования электрических и газодинамических параметров процесса (рис. 1).

Азотирование проводится в аммиаке при атмосферном давлении; одним электродом служит обрабатываемый образец, а другим является металлический корпус реактора.

Подготовленные для азотирования образцы подключают к коронирующему электроду. Печь герметизируют и продувают аммиаком 15...30 мин, за это время воздушная атмосфера печи полностью заменяется аммиачной. При подаче на электроды напряжения зажигания возникает коронный или искровой разряд,

и происходит ударная ионизация компонентов насыщающей атмосферы. Разряд инициирует диссоциацию аммиака, сопровождающуюся образованием азотосодержащих ионных комплексов, которые бомбардируют обрабатываемую поверхность.

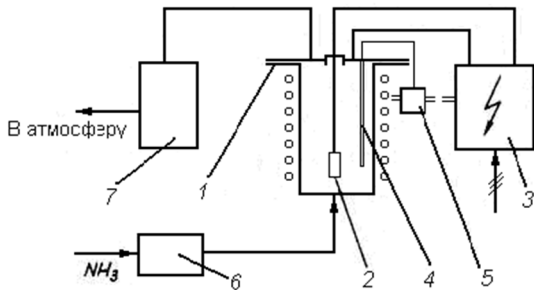


Рис. 1. Принципиальная схема установки для реализации процесса азотирования в электрическом поле: 1 – реактор; 2 – образец; 3 – блок управления; 4 – термомпара; 5 – регулятор нагрева муфеля; 6 – регулятор расхода аммиака; 7 – диссоциометр

В сильных электрических полях под воздействием газовых разрядов реализуется *катодный процесс*, при котором положительно заряженные ионы аммиака или азота притягиваются отрицательно заряженной металлической поверхностью (рис. 2).

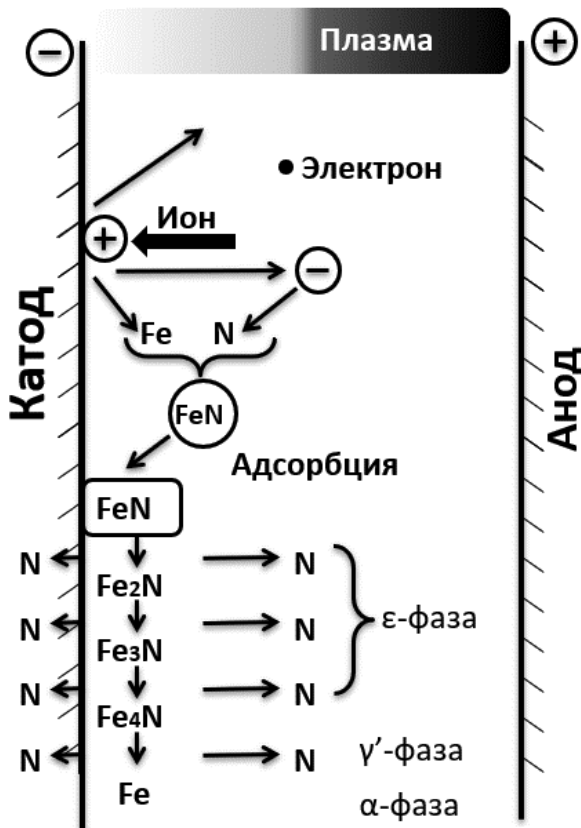


Рис. 2. Схема катодного процесса при азотировании

В отличие от традиционного печного азотирования, ХТО в электрическом поле контролируется как стандартными технологическими параметрами: продолжительностью процесса и температурой, так и величиной силы тока. После начала ударной ионизации газа напряжение, подаваемое на детали, понижается, и регулирование процесса ведется по величине тока.

При температуре азотирования 450...600 °С, когда носители заряда возникают за счёт термической диссоциации атмосферы, для образования и поддержания коронного либо искрового разряда требуется относительно низкое напряжение электрического тока. ХТО в электрическом поле с образованием искрового разряда может проводиться и без нагрева рабочего контейнера за счёт внешних источников тепла (при $t = 20\text{ °C}$), но это требует повышения электрического напряжения на стадии возникновения разряда для начальной ионизации газа. Нагрев детали до заданной температуры ХТО осуществляется вследствие бомбардировки обрабатываемой поверхности ионами.

Микроструктуру азотированных образцов исследовали в оптическом металлографическом микроскопе Neophot-21 при различных увеличениях. Микротвердость измеряли на микротвердомере ПМТ-3 (ГОСТ 9450-76).

Результаты исследований и их обсуждение

Экспериментально установлено ускорение процесса образования диффузионного слоя в техническом железе и сталях в электроискровом разряде по сравнению с традиционным азотированием. Высокая степень ионизации насыщающей атмосферы, большая концентрация ионов, радиационные эффекты на поверхности обрабатываемых деталей обуславливают возможность образования диффузионного слоя при ХТО в электроискровом разряде без дополнительного подогрева муфеля. Так, при обработке стали 38Х2МЮА в электростатическом поле при плотности разрядного тока 80 мА/мм² без дополнительного нагрева муфеля за 3 ч образуется слой глубиной 0,3 мм, тогда как при стандартном газовом азотировании этой стали при 550 °С слой глубиной 0,55 мм образуется за 30...35 ч.

Общая толщина слоя при плотности тока 80 мА/мм² и времени азотирования 1 ч составила: в техническом железе – 0,25 мм; в стали 38Х2МЮА – 0,157 мм; в стали Р18 – 0,065 мм. С увеличением продолжительности азоти-

вания общая толщина азотированного слоя растет по параболическому закону, что подтверждает диффузионный контроль процесса (рис. 3).



Рис. 3. Влияние продолжительности азотирования в электрическом поле на толщину диффузионного слоя в техническом железе ($t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, плотность тока 80 mA/mm^2)

Электрические параметры разряда оказывают существенное влияние на скорость протекания реакций: одним из главных факторов, влияющих на скорость реакций в газовой фазе, является *плотность разрядного тока*. Увеличение плотности тока при азотировании в электроискровом разряде ускоряет формирование, как диффузионного подслоя, так и поверхностной зоны соединений (рис. 4).

При проведении процесса при комнатной температуре двукратное увеличение плотности тока приводит к шестикратному увеличению толщины нитридной зоны. Например, при плотности тока 32 mA/mm^2 в техническом железе образуется нитридная зона толщиной $2\text{...}3\text{ мкм}$; при 64 mA/mm^2 – около 18 мкм ; при 80 mA/mm^2 – $20\text{...}30\text{ мкм}$.

Механизм интенсификации процессов диффузионного насыщения в электростатическом разряде связан с особенностями природы электрической искры, в которой за короткий промежуток времени выделяется энергия, резко повышающая температуру искрового канала, вызывающая оптическое излучение, появление электрического и магнитного полей, ионизационных процессов и т.д.

Эффект интенсификации азотирования в электрическом разряде вызван ускорением всех элементарных физико-химических процессов ХТО. Активизация процессов в газовой фазе происходит благодаря ускоренной ионизации, что приводит к лавинообразному нарастанию количества ионов в атмосфере и увеличивает реакционную способность газа.

Механизмы ускорения процессов в электрическом разряде связывают с тепловой интенсификацией химических реакций при выделении разрядом тепла (например, в электрической дуге), а также с фотохимическим эффектом вследствие генерации коротковолновой радиации (например, в электроискровом и тлеющем разряде). Во многих случаях ускорение химических реакций в газовой фазе вызвано непосредственным воздействием свободных электронов разряда на атомы и молекулы реагирующих веществ, что способствует образованию «активных состояний»: атомарных газов (Н, N и O), свободных радикалов, двухатомных молекул и т.п. При протекании электрического тока в плазме происходит ускорение доставки заряженных частиц к поверхности металла.

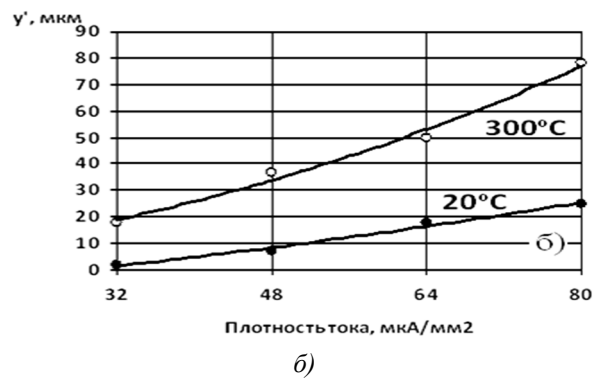
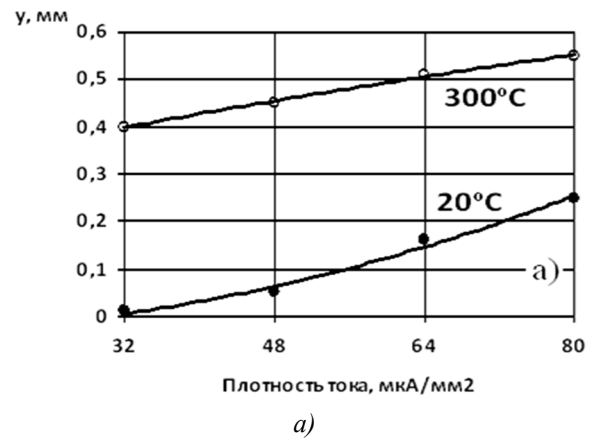


Рис. 4. Влияние плотности тока на толщину диффузионного подслоя y (а) и нитридной зоны y' (б) в техническом железе при азотировании в электрическом поле без подогрева муфеля ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$) и при подогреве муфеля до $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (время азотирования 1 ч)

Интенсификация адсорбции ионов на поверхности металла происходит за счет активации поверхности ионной бомбардировкой, удаления оксидных пленок и депассивации поверхности. Ускорение диффузии – есть

следствие повышения температуры поверхности и увеличения плотности дислокаций в результате ионной бомбардировки, а также высокого градиента концентраций насыщающего элемента в результате активизации адсорбции.

Дополнительный нагрев муфеля до определенной температуры приводит к ускорению роста диффузионного слоя. Так, нагрев до 300 °С увеличивает скорость роста слоя в два-три раза, что позволяет при токе в 80 мА/мм² получить в течение 1 ч в техническом железе общую глубину слоя в 0,55 мм (рис. 4, а). Дальнейшее повышение температуры не оказывает влияния на рост диффузионного подслоя (рис. 5, а).

Влияние температуры в муфеле на толщину нитридной зоны ε-фазы (рис. 5, б) отражает изменения в ее фазовом составе и имеет экстремальный характер: максимальная толщина нитридной зоны ε-фазы достигается при температуре 300 °С. Дальнейшее повышение температуры не приводит к увеличению толщины диффузионного слоя и уменьшает толщину зоны ε-фазы.

Анализ результатов исследований показывает, что ускоряющее действие электрического разряда на процесс формирования азотированного слоя проявляется в различной степени по отношению к росту нитридной зоны и диффузионного подслоя (см. рис. 5). В этой связи решение проблемы интенсификации азотирования необходимо увязывать с регулированием строения диффузионного слоя.

Известно, что регулирование азотного потенциала насыщающей газовой атмосферы при азотировании путем разбавления аммиака другими компонентами (полностью диссоциированными аммиаком, кислородом, воздухом, углеродосодержащими газами) может обеспечить различное строение азотированного слоя: зону внутреннего азотирования на базе α-твердого раствора с различным сочетанием нитридных фаз в поверхностной зоне соединений: низшего нитрида γ'-фазы, либо ε-фазы с заданным содержанием азота.

Сравнение строения азотированных слоев при насыщении сталей в плазме тлеющего разряда как при анодном, так и при катодном процессах в условиях различных насыщающих сред (в чистом аммиаке, смесях аммиака с пропаном, с аргонном, в азото-водородных смесях) показывает, что скорости формирования диффузионных слоев и их фазовый состав находятся в зависимости от газодинамических параметров ионного азотирования и состава насыщающей атмосферы.

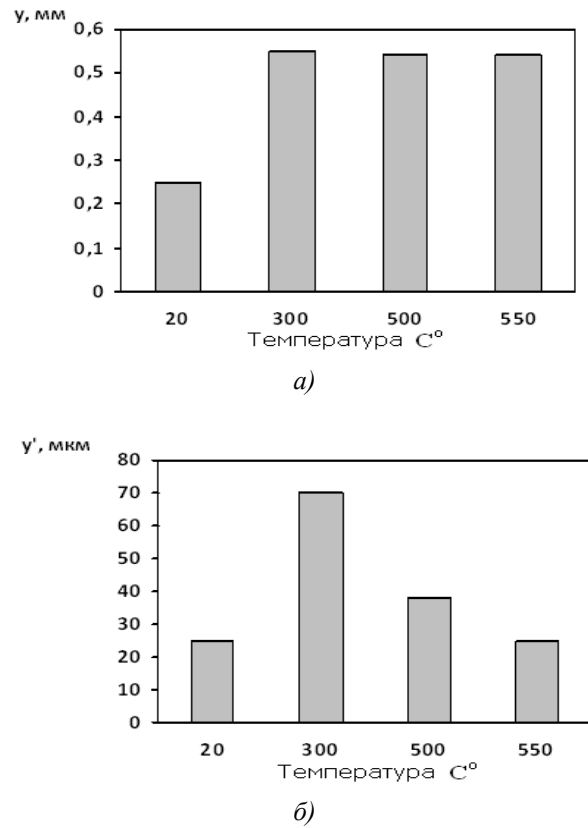


Рис. 5. Влияние температуры подогрева муфеля на толщину диффузионного подслоя y (а) и нитридной зоны y' (б) в техническом железе при азотировании в электрическом поле (время азотирования 1 ч, плотность тока 80 мА/мм²)

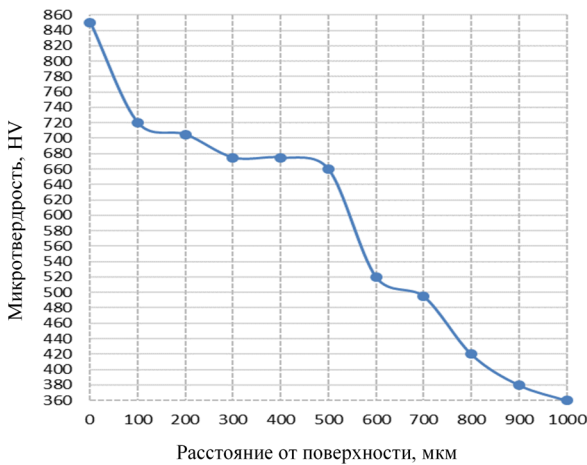
Максимальная скорость роста классического многослойного покрытия соответствует насыщению в атмосфере чистого аммиака при оптимальных давлениях в рабочем объеме контейнера для каждой температуры обработки. При этом нитридная зона в техническом железе представляет собой смесь нитридов ϵ (Fe₃N) и ζ (Fe₂N), а в стали 38Х2МЮФ – гомогенную ε-фазу (рис. 6, а). Твердость нитридной зоны составляет до 850 НВ, а зоны внутреннего азотирования – до 675 НВ благодаря образованию нитридов легирующих элементов (рис. 6, б).

Процесс ионного азотирования в аммиаке, разбавленном аргонном (10 % об. Аг в смеси), при температуре 620 °С позволяет за 6 ч получить в стали 38Х2МЮА твердый износостойкий слой, включающий нитридную зону из легированных ε- и γ'-фаз и эвтектоид (рис. 7, а). Поверхностный слой обладает твердостью, сопоставимой с твердостью закаленной стали (до 63 HRC); диффузионный подслоя имеет постоянную твердость 60 HRC на глубину до 400 мкм (рис. 7, б).

Азотирование нержавеющей стали 12Х18Н10Т при параметрах процесса: температура 630 °С; давление 15 мм рт. ст.; время процесса 10 ч; насыщающая среда – аммиак+СО₂ (40 % об.) приводит к образованию диффузионного слоя толщиной до 250 мкм с формированием поверхностной зоны соединений толщиной 50...60 мкм с твердостью 1170 HV (рис. 8).



а)

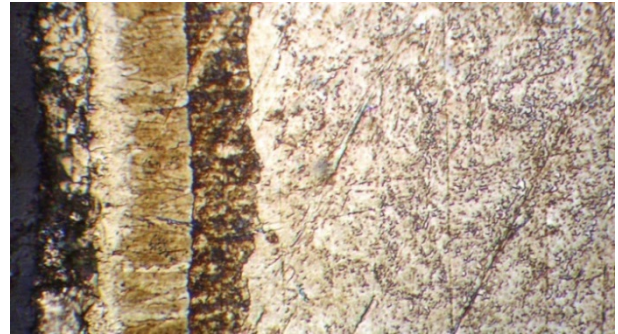


б)

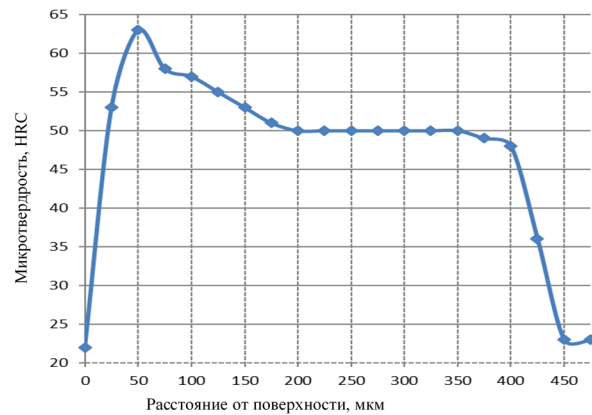
Рис. 6. Микроструктура диффузионного слоя (а) и распределение микротвердости (б) в стали 38Х2МЮА после азотирования в тлеющем разряде в чистом аммиаке при температуре 540 °С, давлении 20 мм рт.ст., времени процесса 16 ч

Известно, что скорость роста каждой фазы азотированного слоя зависит от интенсивности диффузионных процессов в прилегающих зонах. Так как скорость диффузии азота в нитридах значительно ниже диффузионной подвижности азота в твердых растворах, то одним из факторов интенсификации процессов азотирования сталей является создание слоев на базе зон внутреннего азотирования. Эффективным является процесс азотирования, обеспечивающий регулирование азотного потенциала атмосферы на уровне предельной растворимости азота в фазах с максимальной его подвижностью.

Так, при азотировании в аммиачно-аргонной плазме тлеющего разряда состава 10 % об. NH₃ + 90 % об. Ar по режиму циклического процесса ($P = 0,3...0,6$ мм рт. ст.) образуется слой высокоазотистого α -твердого раствора без поверхностной нитридной зоны, который имеет в 1,5 раза большую толщину по сравнению со слоем, получаемым при аналогичном катодном процессе.



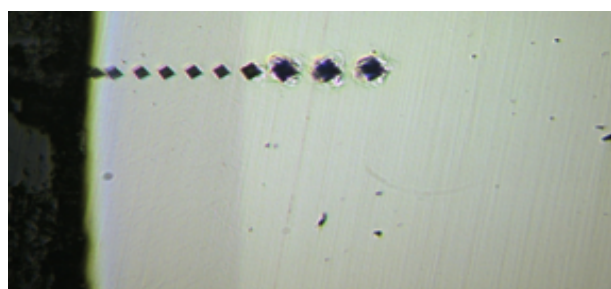
а)



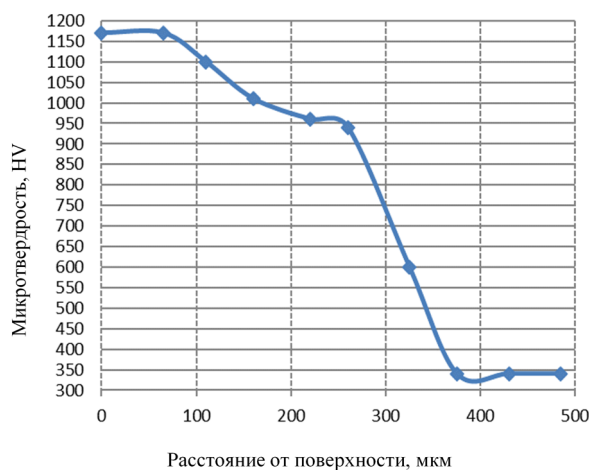
б)

Рис. 7. Микроструктура диффузионного слоя (а) и распределение микротвердости (б) в стали 38Х2МЮА после азотирования в тлеющем разряде в смеси 90% об. NH₃+10% об. Ar при температуре 620 °С, давлении 20 мм рт.ст., времени процесса 6 ч

При азотировании в углеродосодержащей плазме тлеющего разряда оптимальной с точки зрения поверхностных характеристик диффузионных слоев, является смесь, состоящая из 88...92 % об. аммиака и 8...12 % об. пропана, которая обеспечивает получение зоны соединений из смеси карбонитридов Fe₃(NC) и Fe₂(NC) в техническом железе и карбонитрида Fe₃(NC) в стали 38Х2МЮА (при температуре 520 °С). Повышение температуры азотирования до 650 °С приводит к появлению в зоне соединений незначительного количества карбонитрида, изоморфного с решеткой цемента Fe₃(NC).



а)



б)

Рис. 8. Микроструктура диффузионного слоя (а) и распределение микротвёрдости (б) по толщине азотированного слоя в стали 12Х18Н10Т после ионного азотирования при параметрах процесса: температура 630 °С; давление 15 мм рт. ст.; время процесса 10 ч; насыщающая среда – аммиак+СО₂ (40 % об.)

Азотирование в азото-водородной атмосфере, полученной предварительной 100 % -ной диссоциацией аммиака, дает возможность формировать зону соединений на базе гомогенной γ' -фаз. Толщина нитридной зоны γ' -фаз при продолжительности азотирования 1 ч составляет 5...7 мкм и практически не увеличи-

вается со временем, что объясняется, возможно, ее узкой областью гомогенности.

Процессы ионного азотирования с регулированием строения азотированного слоя путем управлением составом насыщающей среды могут быть применены для деталей машиностроения, работающих в различных условиях эксплуатации (табл. 1).

1. Применение регулируемых процессов ионного азотирования

Параметры процесса	Структура	Условия работы	Пример
Насыщающая среда – 100 % NH ₃ ; = 540 °С; τ = 16 ч; P = 20 мм рт.ст.	– ϵ -фаза; – зона внутреннего азотирования	– износостойкость; – ударная вязкость; – коррозионная стойкость	муфта из стали 38Х2МЮА
Насыщающая среда – 90 % NH ₃ +10 % Ar t = 620°С; τ = 6 ч; P = 20 мм рт.ст.	– нитридная зона $\epsilon + \gamma' + MeN$; – эвтектоид; – зона внутреннего азотирования	– повышенная износостойкость	шестерня планетарного редуктора из стали 16Х3НВФМБ
Насыщающая среда – 60 % NH ₃ + 40 % CO ₂ t = 620°С; τ = 11 ч; P = 15 мм рт.ст.	– нитридная зона $\epsilon + CrN/Cr_2N$; – легированная зона внутреннего азотирования	– повышенная температура; – циклическое изменение температуры; – ударные нагрузки	матрица штампа из стали 12Х18Н10Т

Выводы

1. Экспериментально подтверждено ускорение процесса диффузионного насыщения азотом технического железа и сталей при азотировании в электрическом поле с образованием искрового разряда, по сравнению с классическим газовым азотированием. Путем регулирования технологических параметров процесса (плотности электрического тока и

температуры подогрева реакционного муфеля) можно добиться желаемого соотношения толщины нитридной зоны и диффузионного подслоя.

2. Показаны преимущества азотирования в электростатическом и высокочастотном поле, связанные с возможностью проведения процессов при нормальном давлении, что не требует применения вакуумных систем для поддержания и регулирования газодинамических

параметров разряда и дополнительных источников радиационного нагрева. Дополнительным преимуществом процесса азотирования в электрическом разряде является двукратное сокращение расхода газа благодаря высокой степени ионизации атмосферы.

3. Азотирование сталей в тлеющем разряде с регулированием состава атмосферы позволяет формировать упрочненные слои различного строения и толщины с заданным градиентом твердости, что обеспечивает работоспособность изделий в различных условиях изнашивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов и сплавов / Ю.М. Лахтин, Б.Н. Арзамасов. – М.: Металлургия, 1985. – 256 с.
2. Petrova, L.G. Progress in theory and practice of thermochemical treatment of steels/ International Heat Treatment and Surface Engineering. 2012. Т. 6. № 4. С. 168-170.
3. Тихонов, А.К. Металловедение и термическая обработка в автомобилестроении. В 2 ч. Часть I. / А.К. Тихонов. – М.: Металлургиздат, 2018 – 784 с.
4. Chudina, O.V. Increase of reliability of loaded machine parts by surface modification using methods of laser treatment/Chudina O.V., Petrova L.G., Aleksandrov V.A., Zinchenko V.M., Trifonov O.N. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Т. 13. № 7. С. 2477-2481.
5. Petrova, L.G. Thermochemical treatment of steels in the plasma of a hydrostatic glow-spark discharge / L.G. Petrova, V.A. Aleksandrov, P.E. Demin // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 54, №5-6. – P.309-314.
6. Prikhod'ko, V.M. Effect of ultrasonic cavitation on nitrated steel surface layer condition / V.M. Prikhod'ko, V.A. Aleksandrov, D.S. Fatyukhin, L.G. Petrova // Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – Vol. 57, №5-6. – P.300-303.
7. Belashova, I.S. Intensified saturation of iron with nitrogen by the method of thermogasocyclic nitriding/Belashova I.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Polymer Science. Series D. 2018. Т. 11. № 1. С. 90-95.
8. Петрова, Л.Г. Интенсификация процесса азотирования конструкционной низкоуглеродистой стали путем формирования каталитической пленки оксида меди / Л.Г. Петрова, В.А. Александров, А.Ю. Малахов, А.Е. Перекрестов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2015. – №3 (123). – С.37-43.
9. Рамазанов, К.Н. Ионное азотирование в неоднородной плазме тлеющего разряда / К.Н. Рамазанов, Д.З. Ишмухаметов, Н.С. Садкова // Вестник Уфимского государственного

авиационного технического университета. – 2011. – Т. 15, №3 (43). – С.67-71.

10. Агафонов, С. Интенсификация азотирования в электростатическом поле // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2007. – №6. – С. 205-210.

REFERENCES

1. Lakhtin, Yu.M. *Metal and Alloy Chemical-thermal Treatment* / Yu.M. Lakhtin, B.N. Arzamasov. – M.: Metallurgy, 1985. – pp. 256.
2. Petrova, L.G. Progress in theory and practice of thermochemical treatment of steels/ International Heat Treatment and Surface Engineering. 2012. Т. 6. № 4. Pp. 168-170.
3. Tikhonov, A.K. *Material Science and Thermal Treatment in Automobile Industry*. In 2 Parts. Part I. / A.K. Tikhonov. – M.: Metallurgizdat, 2018 – pp. 784.
4. Chudina, O.V. Increase of reliability of loaded machine parts by surface modification using methods of laser treatment/Chudina O.V., Petrova L.G., Aleksandrov V.A., Zinchenko V.M., Trifonov O.N. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2018. Т. 13. № 7. Pp. 2477-2481.
5. Petrova, L.G. Thermochemical treatment of steels in the plasma of a hydrostatic glow-spark discharge / L.G. Petrova, V.A. Aleksandrov, P.E. Demin // Metal Science and Heat Treatment. – 2012. – Vol. 54, №5-6. – P.309-314.
6. Prikhod'ko, V.M. Effect of ultrasonic cavitation on nitrated steel surface layer condition / V.M. Prikhod'ko, V.A. Aleksandrov, D.S. Fatyukhin, L.G. Petrova // Metal Science and Heat Treatment. – 2015. – Vol. 57, №5-6. – P.300-303.
7. Belashova, I.S. Intensified saturation of iron with nitrogen by the method of thermogasocyclic nitriding/Belashova I.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Polymer Science. Series D. 2018. Т. 11. № 1. Pp. 90-95.
8. Petrova, L.G. Process intensification of structural low-carbon steel nitriding by formation of copper oxide catalytic film /L.G. Petrova, V.A. Alexandrov, A.Yu. Malakhov, A.E. Perekrestov // *Strengthening Technologies and Coatings*. – 2015. – No.3 (123). – pp. 37-43.
9. Ramazanov, K.N. Ion nitriding in heterogeneous plasma of glow discharge / K.N. Ramazanov, D.Z. Ishmukhametov, N.S. Satkova // *Bulletin of Ufa State Aircraft Technical University*. – 2011. – Vol. 15, No.3 (43). – pp. 67-71.
10. Agafonov, S. Nitriding intensification in electrostatic field // *Bulletin of Krasnoyarsk State Agricultural University*. – 2007. – No.6. – pp. 205-210.

Рецензент д.т.н. М.Г. Шальгин

