

УДК 621.785.532

ФОРМИРОВАНИЕ ДИФфуЗИОННОГО НИТРИД-ОКСИДНОГО СЛОЯ ПРИ ГАЗОВОМ АЗОТИРОВАНИИ С ПОСЛЕДУЮЩЕМ ПАРООКСИДИРОВАНИЕМ

Эшкабилов Холикул Каршиевич - кандидат технических наук, профессор,
e-mail: kholik@rambler.ru

Каршинский инженерно-экономический институт, г. Карши, Узбекистан

Аннотация. В статье на основе существующих теорий диффузионных процессов поверхностного упрочнения рассматривается получение композиционного азотированного слоя при кратковременном газовом азотировании в атмосфере диссоциированного аммиака, при последующем процессе пароокисления, который подвергается структурным и фазовым изменениям за счёт поверхностного деазотирования и диссоциации высокоазотистого нитридного слоя с образованием низших нитридных и карбонитридных фаз. Выясняется, что в азотированном слое с морфологической текстурой в период пароокисления возникает неравновесное состояние в упрочнённом слое.

Изучены условия получения нитридного слоя с кристаллографической текстурой на первой стадии процесса азотирования, который позволяет получить равномерную тонкую поверхностную оксидную плёнку, состоящую практически из одного магнетита Fe_3O_4 , на второй стадии процесса пароокисления за счёт деазотирования нитридного слоя. На этой стадии одновременно достигается изменение соотношений нитридных фаз в азотированном слое в результате реакционной диффузии азота при диссоциации высокоазотистого нитрида с образованием модифицированных нитридов за счёт легирования кислородом из атмосферы и углеродом из матрицы стали.

Установлено, что окислением нитридного слоя в парах воды с получением поверхностного диффузионного нитрид-оксидного слоя можно достичь необходимых структурно-фазовых состояний поверхности с различными составами композиций легированных нитридных фаз на среднеуглеродистых сталях.

Ключевые слова: атомная диффузия, реакционная диффузия, высокоазотистый нитрид, деазотирование, карбонитрид, оксикарбонитрид.

UDC 621.785.532

FORMATION OF A DIFFUSION LAYER DURING GAS NITRIDING FOLLOWED BY STEAM OXIDATION

Eshkabilov Kholikul Karshievich - Candidate of Technical Sciences, professor,
e-mail: kholik@rambler.ru

Karshi Engineering-Economics Institute, Karshi city, Uzbekistan

Abstract. Based on the existing theories of diffusion processes of surface hardening, the article discusses the production of a composite nitrided layer during short-term gas nitriding in an atmosphere of dissociated ammonia, with the subsequent vapor oxidation process, which undergoes structural and phase changes due to surface denitriding and dissociation of a high-nitrogen nitride layer with the formation of lower nitride and carbonitride phases. It turns out that in the nitrided layer with a morphological texture, during the vapor oxidation period, a nonequilibrium state occurs in the hardened layer.

The conditions for obtaining a nitride layer with a crystallographic texture at the first stage of the nitriding process, which makes it possible to obtain a uniform thin surface oxide film consisting of almost one Fe_3O_4 magnetite, at the second stage of the vapor oxidation process due to denitriding of the nitride layer, are studied. At the second stage of the process of vaporization of the nitride layer,

a change in the ratios of the nitride phases in the nitrated layer is simultaneously achieved as a result of the reactive diffusion of nitrogen during the dissociation of high-nitrogen nitride with the formation of modified nitrides due to alloying with oxygen from the atmosphere and carbon from the steel matrix.

It has been established that by oxidizing the nitride layer in water vapor to obtain a surface diffusion nitride-oxide layer, it is possible to achieve the necessary structural-phase states of the surface with different compositions of alloyed nitride phase compositions on medium-carbon steels.

Keywords: *atomic diffusion, reactive diffusion, high nitrogen nitride, denitrating, carbonitride, oxycarbonitride.*

UO‘K 621.785.532

GAZLI MUHITDA AZOTLASHDAN KEYIN SUV BUG‘LARIDA OKSIDLASHDA DIFFUZION QATLAMNING SHAKLLANISHI

Eshkabilov Xolikul Karshiyevich - texnika fanlari nomzodi, professor

Qarshi muhandislik-iqtisodiyot instituti, Qarshi sh., O‘zbekiston

Annotatsiya. *Maqolada gazli dissotsiyalangan ammiakli muhitda qisqa muddatli azotlashdan so‘ng uni suv bug‘larida oksidlashda sirtida azotsizlanish va yuqori azottarkibli nitrid qatlamning kam azottarkibli nitrid va karbonitrid fazalar hosil bo‘lishi bilan kuzatiladigan struktura-fazaviy o‘zgarishlar diffuzion sirt nitrid qatlamlari shakllanishida sirt puxtalashning mavjud diffuziya jarayonlari nazariyalari asoslarida ko‘rib chiqilgan. Morfologik teksturaga ega bo‘lgan azotli qatlamda suv bug‘larida oksidlashdan keyin puxtalangan qatlamda noturg‘un holat yuzaga kelishi aniqlangan.*

Jarayonning ikkinch oksidlash bosqichida nitrid qatlam sirtida azotsizlanish hisobiga tarkibi faqat bir jinsli magnetit Fe_3O_4 dan iborat bo‘lgan yupqa sirt oksid parda shakllanishi imkonini beradigan kristallografik teksturali azotli qatlam olish sharoitlari o‘rganilgan. Bunda ikkinchi bosqichda oksidlash jarayonida oksid parda hosil qilish bilan bir qatorda yuqori azottarkibli nitrid fazaning dissotsiatsiyasi azotning reaksiya diffuziya natijasida azotli qatlamda kam azottarkibli nitrid fazalarning o‘zaro nisbatlari o‘zgarishlariga olib kelishi va uning atmosfera kislorodi va po‘lat o‘zagidagi uglerodlar bilan legirlanishi natijasida modifikatsiyalangan nitridlar hosil qilishga erishilishi keltirilgan.

Nitrid qatlamlarni suv bug‘larida oksidlash bilan tarkibida o‘rtacha miqdorda uglerod bo‘lgan po‘latlarda har xil struktura-fazaviy holatlarga ega bo‘lgan sirt diffuzion nitrid-oksida qoplamalarining turlicha nisbatdagi nitrid fazalar kompozitsiyalarini olish mumkinligi o‘rnatilgan.

Kalit so‘zlar: *atomli diffuziya, reaksiya diffuziya, yuqori azottarkibli nitrid, azotsizlanish, karbonitrid, oksikarbonitrid.*

Введение

Создание новых высокопроизводительных машин с необходимыми качественными и количественными показателями требует использования деталей из высокопрочных материалов и совершенствования методов их поверхностного упрочнения.

За последние годы учёные в области химико-термической обработки выполнили ряд работ, направленных на развитие методов повышения поверхностных характеристик машиностроительных изделий, изготавливаемых из сталей и сплавов, результаты которых послужили основой для внедрения в производственных условиях новых технологических процессов, таких как электро-химико-термических и металлотермические методы. При этом актуальными направлениями химико-термической обработки являются регулируемые процессы с использованием различных видов насыщающих сред [1-4].

При химико-термической обработке изменяется структурно-энергетическое состояние поверхности металлов и сплавов, в результате повышается твёрдость, износостойкость и

коррозионная стойкость поверхности, а также сопротивление усталости и работоспособности изделий при повышенных температурах. В процессе химико-термической обработки на поверхности упрочняемого изделия формируется диффузионный слой согласно диаграмме состояния данного сплава, так что с повышением концентрации диффундирующего элемента атомной диффузией в зависимости от времени изотермической выдержки согласно законам фазовых превращений образуются новые фазы [5-7].

В мировом машиностроении широко применяется процесс азотирования и его разновидностей для поверхностного упрочнения машиностроительных изделий, изготовленных из сталей и сплавов. При насыщении чистого железа азотом в результате взаимодействия поверхности и атмосферы в начальный период за счёт атомной диффузии образуется твердый раствор азота в Fe_α (α -фаза) и с достижением содержания азота, превышающей максимальную концентрацию азота в твердом растворе Fe_α начинает образоваться γ' -фаза, а после превышения максимальной концентрации азота в γ' -фазе возникает химическое соединение высшего нитрида - ϵ -фаза, в целом диффузионный азотированный слой состоит из композиций нитридных фаз [8, 9].

Структурно-фазовые превращения в диффузионном поверхностном слое в равновесных и неравновесных состояниях протекают по-разному, что является важным для получения того или иного фазового состава или строения упрочненного слоя, соответственно для определённых эксплуатационных свойств обрабатываемого изделия [10,11].

Согласно теории атомной и реакционной диффузии при благоприятных термодинамических условиях для образования высших и средних фаз в зависимости от активности насыщающих сред и состава обрабатываемой стали диффузионные процессы, не подчиняясь равновесным условиям, могут начаться с образованием фазы высшего или среднего состава, минуя возникновение низких фаз [12].

Методы и материалы

Комбинированную технологию проводили на первой стадии азотированием в атмосфере диссоциированного аммиака в условиях различной степени диссоциации и на второй стадии оксидированием нитридного слоя в парах воды. Температура насыщения при азотировании составляла выше ($620\text{ }^\circ\text{C}$) и ниже ($580\text{ }^\circ\text{C}$) эвтектоидной температуры для системы «Fe-N». С целью получения на поверхности оксидного слоя, состоящего практически из одного магнетита при оксидировании в парах воды на второй стадии температура насыщения была выбрана $550\text{ }^\circ\text{C}$, ниже эвтектоидной для системы «Fe-O». Основное исследование выполнено на стали марки 45 и 40X.

Обработанные образцы металлографического анализа на поперечных шлифах с помощью светового микроскопа «Neophot-21» и на растровом электронном микроскопе JSM-25 фирмы JEOL.

Рентгеноструктурные анализы были проведены на установке «дрон-3» с использованием отфильтрованного кобальтового k_α -излучения. Дифракционные углы записывались в интервале $2\theta = 20\text{--}130$ град, при скорости вращения образцов 1 и 2 град/мин и фазовый состав определяли методом сравнения полученных межплоскостных расстояний (d/n) с табличными значениями (d/n) для нитридных и оксидных фаз с учётом соотношения интенсивности соответствующей плоскости.

Результаты

Основной особенностью роста диффузионного слоя под воздействием активного насыщающего азота является возникновение морфологической или кристаллографической текстуры в нитридном слое. При температуре азотирования выше эвтектоида ($620\text{ }^\circ\text{C}$) при степени диссоциации $\alpha = 45\text{--}60\%$ в структуре поверхностной зоны нитридного слоя по всей толщине ϵ -фазы образуется столбчатое строение, величины крупных кристаллов которого достигают равной её толщине (рис. 1).

Рентгеноструктурным анализом было установлено, что нитридный слой состоит из нитридов ϵ -, ϵ' - и γ' - фаз. Основными недостатками полученного диффузионного нитридного

слоя является межзеренная пористость структуры, в результате которого поверхностная пористая часть слоя легко окисляется кислородом воздуха с образованием оксида Fe_2O_3 .

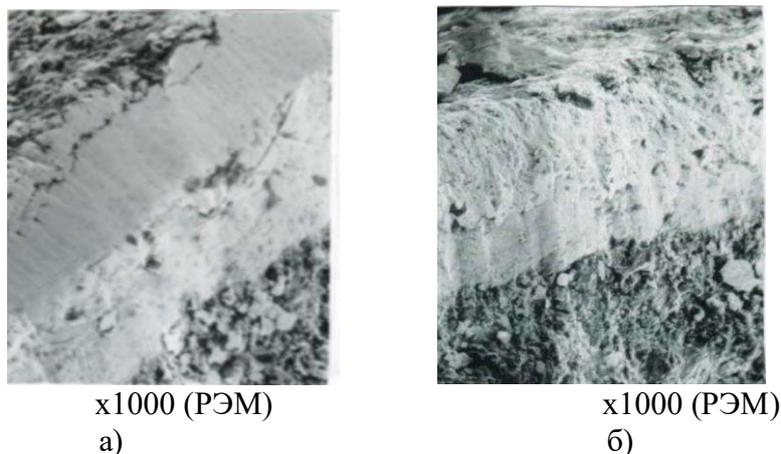


Рис. 1. Микроструктура нитридного слоя после азотирования в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре $620^{\circ}C$. $\tau_{аз} = 3$ часа, $\alpha=45-60$ %. а - Сталь 45, б - Сталь 40X.

К образованию морфологической текстуры, т.е. столбчатости структуры диффузионного слоя более склонны поверхностный высокоазотистый ϵ -нитрид, образующийся при выше эвтектоидной температуре в системе «Fe-N», в котором преобладает зернограничная диффузия при насыщении в аммиачной атмосфере. При этом на поверхностных дислокациях и границах зерен высокоазотистых нитридов особенно накапливается газообразный азот, а также углерод из матрицы стали (рис. 1, а и в).

При азотировании с последующим пароксидированием (нитрооксидированием) нитридного слоя с морфологической текстурой, полученной при выше эвтектоидной температуре ($620^{\circ}C$), поверхностная зона окисляется на большую глубину нитридного слоя, так как кислород свободно проходит по дефектам и границам столбчатых зерен нитридов вглубь диффузионного слоя (рис. 2).

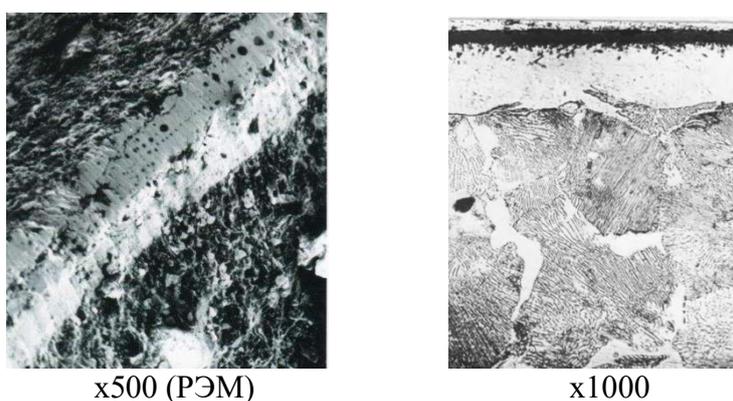


Рис. 2. Микроструктура нитрид-оксидного слоя после азотирования ($\tau_{аз}=3$ часа, $\alpha=45-60$ %) и последующем пароксидировании ($\tau_{ок} = 0,5$ часа) при температуре $620^{\circ}C$. а - Сталь 45, б - Сталь 40X.

В процессе проведения азотирования при степени диссоциации аммиака $\alpha = 30-45$ % при температуре выше эвтектоида и последующим пароксидированием при той же температуре под нитридным слоем наряду с вышеуказанными дефектами образуется нежелательная смесь α – твёрдого раствора, γ – эвтектоида и цементита, образовавшаяся в результате обезуглероживания перлитных участков в матрице стали (рис. 3).

Нитридный слой с малым количеством пор и достаточной толщиной поверхностной высокоазотистой ϵ -фазы для дальнейшего её пароксидирования возможен только в интервале

температуры 570–590 °С и при этом в условиях проведения процесса в атмосфере аммиака $\alpha=30-45\%$ в микроструктуре нитридного слоя выявляется накопление углерода матрицы стали в микропорах и свободного азота в слое из-за активности, при высокой концентрации азота на поверхности насыщения и влиянием на процесс обезуглероживания, препятствуя внедрению углерода в ϵ -фазу с образованием низкоазотистый карбонитридный слой $Fe(N,C)$, изоморфный к ϵ -фазе (рис. 4, а), а при диссоциации аммиака $\alpha=45-60\%$ поры имеют дислокационный характер и накопление атомарного или молекулярного азота и углерода из матрицы заметно не происходит, т.е. формирование нитридного слоя протекает близко к равновесной форме (рис. 4, б).

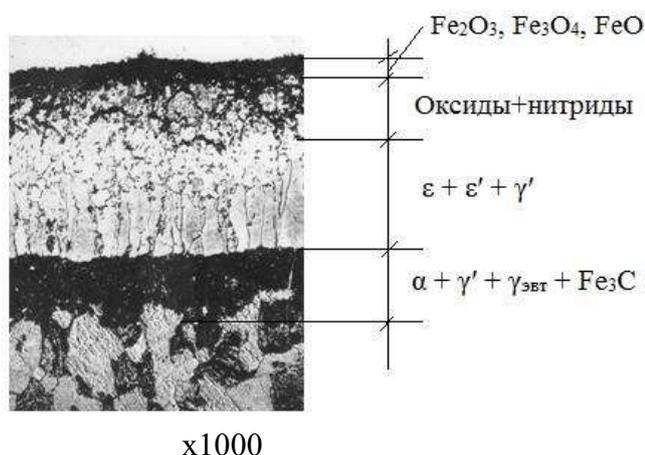


Рис. 3. Микроструктура нитрид-оксидного слоя после азотирования ($\tau_{аз}=3$ часа, $\alpha=30-45\%$) с последующим пароксидированием ($\tau_{ок}=0,5$ часа) при температуре 620 °С. Сталь 45.

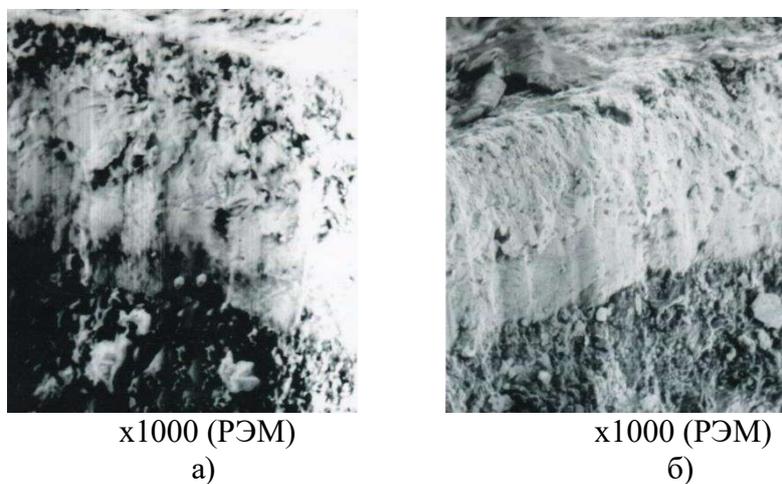


Рис. 4. Микроструктура азотированного слоя. Азотирование: $T=580\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\tau_{аз} = 3$ ч. Сталь 45
а - $\alpha=30-45\%$; б - $\alpha=45-60\%$.

Формированный диффузионный нитридный слой в процессе насыщения в диссоциированном аммиаке при температуре ниже эвтектоида в кристаллохимическом отношении отличается от строения и состава упрочняемой стали. Образующийся нитридный слой будет состоять из определённых композиций нитридных фаз с кристаллографической текстурой (рис. 4). Структурно-фазовая разновидность нитридного слоя определяется относительными размерами перлита и феррита, а также расположениями фаз и формой насыщаемой поверхности. Диффузионные процессы преимущественно протекают по границам зерен высокоазотистых и низкоазотистых нитридных соединений, создавая условия градиента концентрации азота из насыщающей атмосферы и углерода из матрицы, основным

местом структурообразования служат вероятные границы раздела между нитридными фазами и граница между матрицей и нитридной фазой (рис. 4, а и б).

В процессе азотирования в атмосфере диссоциированного аммиака при температуре ниже эвтектоида можно получить достаточную толщину нитридного слоя и малое количество микропоры, которые после процесса оксидирования в парах воды залечивается образованием оксидов железа. Последовательным оксидированием в парах воды получаемого нитридного слоя на поверхности можно сформировать плотный тонкий оксидный слой (рис. 5).

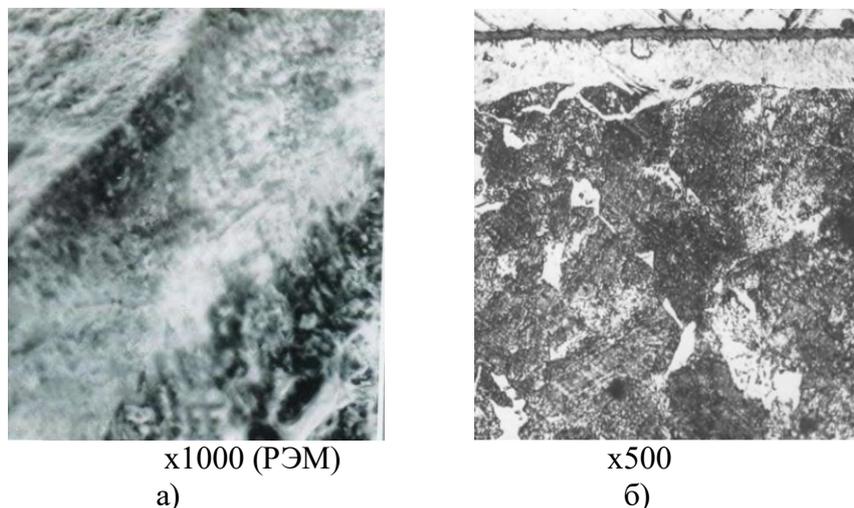


Рис. 5. Микроструктура нитрид-оксидного слоя. Азотирование при 580°C ($\tau_{\text{аз}}=3$ ч, $\alpha=45\text{-}60\%$) и пароксидирование при 550°C ($\tau_{\text{ок}}=1,0$ ч). а - Сталь 45, б - Сталь 40Х.

При оксидировании нитридного слоя с кристаллографической текстурой преобладает реакционная диффузия и за счёт деазотирования поверхности нитридного слоя образуется оксидный слой с высокими адгезионными свойствами, а также происходит диссоциация высокоазотистого нитрида и роста диффузионного низкоазотистого нитридного слоя, позволяющего формирование равновесной структуры.

Были проведены рентгеноструктурные анализы образцов с нитрид-оксидными покрытиями на стали 45, полученные азотированием на первой стадии при температуре 580°C в ниже эвтектоидной температуре для системы «Fe-N» и пароксидированных на второй стадии при температуре 550°C в ниже эвтектоидной температуре согласно диаграмме состояния «Fe-O».

В нитридном слое в процессе азотирования согласно диаграмме в равновесных условиях должны образоваться Fe_{2-3}N (ϵ -фаза) и Fe_4N (γ' -фаза), однако наличие углерода в матрице, участвуя при взаимной диффузии, приводит к образованию карбонитрида $\text{Fe}_{2-3}(\text{CN})$ и в части цементита нитрокарбида $\text{Fe}_{2-3}(\text{NC})$ (ϵ' -фазы), после оксидирования в парах воды, которые модифицируется кислородом и образуются низконитридные оксикарбонитриды $\text{Fe}_3(\text{CNO})$ и $\text{Fe}_3(\text{NCO})$ (ϵ'' -фаза).

При азотировании выше эвтектоидной температуры образовавшийся твёрдый раствор внедрения азота в г. ц. к. γ -фаза является изоморфным аустениту и период решетки фазы меньше, чем периода решётки γ' -фазы, и поэтому межзеренное обезуглероживание матрицы через структуры γ -фазы происходит более интенсивно, чем в структуре γ' -фазы, в которой часть углерода погашает с образованием твёрдого раствора внедрения углерода с образованием фазы $\text{Fe}_4(\text{NC})$.

Обсуждение

В процессе газового азотирования в результате атомной диффузии в зернах перлита и феррита независимо от технологических условий насыщения поверхности формируется диффузионный слой с неравновесной структурой.

При взаимодействии поверхности углеродистых сталей с насыщающей средой в зернах феррита преимущественно образуются нитриды, а в перлитных участках из-за наличия углерода формируются карбонитриды, что создаёт поверхностную неоднородность и неравновесное состояние взаимодействия активности диффундируемого азота из-за структурно-энергетического условия образования новых фаз нитридов.

По мере легирования ε -нитрида сначала углеродом и в дальнейшем кислородом происходит изменение параметров г.п.у. решетки ε -фазы. Причем ε -фаза обеднена азотом и рентгеноструктурно выявляется в виде двух изоморфных фаз: изоморфной карбонитридной фазы, обозначенной как ε' -фаза с параметрами решетки $a=0,269$ нм, $c=0,436$ нм и оксикарбонитридной фазы, обозначенной как ε'' -фаза с параметрами решетки $a=0,267$ нм, $c=0,436$ нм [13].

Поскольку в процессе оксидирования происходит деазотирование на поверхности нитридного слоя (ε -фаза) с образованием оксидов в атмосфере паров воды и одновременно диссоциация нитридного слоя с образованием низших нитридов с ростом толщины вглубь матрицы, в результате которого доля γ' -фазы в диффузионном слое растёт. Атомы азота располагаются в центре ячейки г.ц.к. решётки γ' -фазы и по мере повышении концентрации азота в нём период решетки γ' -фазы изменяется.

К кинетическим факторам механизма формирования неравновесной структуры относятся условия подачи и скорости поступления насыщающего элемента относительно насыщаемой поверхности, различие скорости реакций взаимодействия насыщающей атмосферы на границе зерна перлита и феррита, скорость нагрева и способ охлаждения, различие скорости диффузии азота в поверхность стали и скорости самодиффузии в нитридном слое.

Отклонение от равновесной структуры азотированного слоя при образовании той или иной фазы в диффузионном слое зависит от начальной концентрации диффундирующего элемента в насыщающей среде, поскольку с увеличением концентрации насыщающего элемента образование слоя неравновесной структурой становится более вероятным. Диффузионный слой с неравновесной структурой происходит и при насыщении сталей одновременно с различными элементами или при насыщении одним элементом сплавов имеющих разные структуры и различные дисперсности зерна на поверхности.

В диффузионных процессах насыщения структурообразование на поверхностном слое является обязательным условием с получением того или иного фазового состава или последовательно расположенных композиций фаз в поверхностной зоне.

При газовом азотировании в аммиаке Ю.М. Лахтиным экспериментально подтверждено, что в начальный момент насыщения азотом в поверхностной зоне деталей образуется твердый раствор азота в феррите Fe_α . Поверхностный Fe_α является неоднородным и в процессе насыщения при увеличении содержания азота неоднородность увеличивается. С повышением концентрации азота предельной растворимости азота в Fe_α образуется новая Fe_4N (γ' -фаза), а при дальнейшем повышении концентрации азота в γ' -фазе образуется нитрид $Fe_{2-3}N$ (ε -фаза) (Рис.6).

В результате при азотировании железа и его сплавов в среде аммиака в заэвтектидных температур насыщения, согласно диаграмме состояния «Fe-N», формируется композиционный слой, состоящий из: Fe_2N (ξ -фаза) \rightarrow $Fe_{2-3}N$ (ε -фаза) \rightarrow Fe_4N (γ -фаза).

Проведённые исследования показывают, что образование нитрид – оксидного слоя на поверхности с отклонением от равновесной структуры, прежде всего, зависит от начальной концентрации азота, чем выше концентрация азота в насыщающей атмосфере, тем больше вероятность образования азотированного слоя с неравновесной структурой. Нитридный слой с неравновесной структурой также происходит при насыщении азотом с участием углерода в составе матрицы стали.

Реакционная диффузия азота происходит между высокоазотистых и низкоазотистых нитридов, а также карбонитридных (перлитных зёрнах) и нитридных (ферритных зёрнах)

фазах, в результате которой изменяется структура и химический состав в азотированном слое. Поэтому сложно подвергать регулированию композиций фаз, что является основным недостатком процесса газового азотирования, препятствующего его применению для упрочнения сталей из среднеуглеродистых сталей.

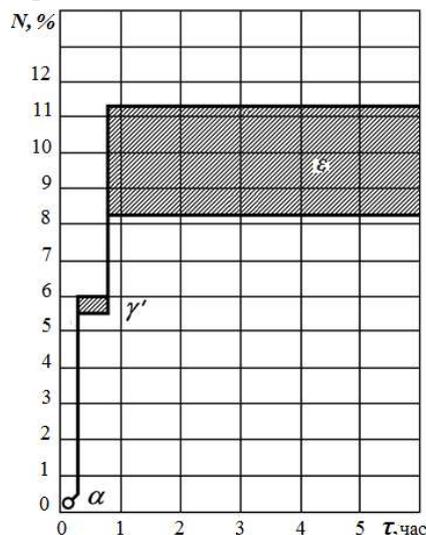


Рис. 6. Образование низких и высших нитридов в начальной стадии азотирования в диссоциированном аммиаке в зависимости от продолжительности насыщения. Температура азотирования 520 °С (по Ю.М.Лахтину).

Образование низкоазотистой γ' -фазы, как твёрдый раствор упорядоченного расположения атомов азота в г. ц. к. решётке Fe_γ , происходит внедрениями атомов азота и углерода, т.е. происходит атомная диффузия в узкой области гомогенности периода решётки с образованием фазы $Fe_4(NC)$ на поверхностной зоне упрочняемого изделия.

При оксидировании нитридного слоя в парах воды наряду с образованием оксидной плёнки в период изотермической выдержки нитридный слой в результате реакционной диффузии подвергается двусторонней диссоциации, в которой источником азота является высокоазотистая ϵ -фаза и карбонитридная ϵ' -фаза. В результате реакционной диффузии между высшими и низкими нитридными фазами и углерода из матрицы стали образуется низкоазотистая карбонитридная ϵ'' -фаза, легирование кислородом из насыщающей атмосферы формирует новую оксикарбонитридную ϵ'' -фазу. В целом нитридный слой будет состоять из композиций низших легированных углеродом и кислородом нитридов.

В зависимости от времени процесса оксидирования формируемые твёрдые растворы азота, углерода и кислорода в железе имеют различные соотношения и дисперсности зерна в диффузионном композиционном нитрид-оксидном покрытии.

При газовом азотировании при формировании нитридного слоя из-за отклонения от равновесной формы протекания диффузия сопровождается образованием высокоазотистой ϵ -фазы за счёт высокой концентрации азота в насыщающей атмосфере одновременно с реакционно-граничной диффузией, что подтверждается возникновением и ростом морфологической текстуры нитридного слоя, а образование низшего нитрида сопровождается атомной диффузией, внедрением в г. ц. к. решётку атомов азота и углерода, образуя твёрдый раствор $Fe_4(NC)$ (γ' -фаза) [9].

Заключение

В целом можно сделать следующие выводы:

- при газовом азотировании сталей в результате реакционно-граничной и атомной диффузии азота на поверхности формируется композиционный слой, состоящий из смеси высокоазотистых и низкоазотистых нитридных, карбонитридных фаз и зоны внутреннего азотирования;

- высокоазотистая нитридная фаза $Fe_{2-3}N$ (ϵ -фаза) с морфологической текстурой не обеспечивает равновесное условие для протекания реакционной и граничной диффузии в процессе оксидирования;

- структурно-фазовое состояние поверхности на стали с нитрид-оксидным диффузионным покрытием с тонкой поверхностной оксидной плёнкой, обладающей защитными и положительными градиентами свойств на поверхности, можно получить при пароксидировании в ниже эвтектоидной температуры в системе «Fe-O»;

- при оксидировании нитридного слоя происходит диссоциация высокоазотистого нитрида с формированием модифицированных низкоазотистых нитридов за счёт легирования углеродом и кислородом.

В целом комбинации технологических процессов кратковременного низкотемпературного газового азотирования и пароксидирования являются возможностью модификации азотированного слоя, в результате которого на упрочняемой поверхности достигается регулирование составов композиций нитридных фаз с получением поверхностной оксидной плёнкой на изделиях из среднеуглеродистых сталей.

Литература

- [1] Ворошнин Л.Г. Перспективы развития химико-термической обработки// Упрочняющие технологии и покрытия. 2008, №1. –С.5-8.
- [2] Федонин О.Н., Киричек А.В, Петрешин Д.И. Технологическое повышение эксплуатационных свойств деталей машин. // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2018, №4. – С. 43-48.
- [3] Дубинин Г.П. О перспективах развития химико-термической обработки металлов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004, №7. – С. 5-6.
- [4] Ворошнин Л.Г., Менделеева О.Л. Химико-термическая обработка микрообъектов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008, №1. –С.15-19.
- [5] Лахтин, Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. - М.: Машиностроение, 1976. -256 с.
- [6] Русев Р.Д. Фазовые равновесия в системе железо-азот-углерод. // Металловедение и термическая обработка металлов, 1991, №6. -С. 14-17.
- [7] Зинченко, В.М., Сыропятов В.Я. Управление процессом газового азотирования с помощью кислородного зонда. // Металловедение и термическая обработка металлов, 2001, №7. -С. 28 - 31.
- [8] Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.И., Бёмер З. Теория и технология азотирования. - М.: Металлургия, 1991. - 320 с.
- [9] Pye D. Practical Nitriding and Ferritic Nitrocarburizing. ASM Publication, 2003. -256 p.
- [10] Eshkabilov Kh., Berdiyev Sh. Structure and properties of the modified diffusion nitride-oxide surface layer. E3S Web of Conferences 264, 05054 (2021). CONMECHYDRO – 2021. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202126405054/>
- [11] Palček P., Mintách R., Nový F., Chalupová M. & Marônek M. Change of fatigue characteristics of deep drawing sheets by nitrooxidation. // Chemické listy, Vol. 105, Issue 16 (2011). - P. 539-541.
- [12] Банных О. А., Будберг П.Б., Алисова С. П. и др. Диаграммы состояния двойных и многокомпонентных систем на основе железа. –М.: Металлургия, 1986 г.
- [13] Коган Я.Д, Эшкабилов Х.К. Оксизотирование металлических изделий// “Упрочняющие технологии и покрытия”, 2006, № 6. –с. 10-15.