

Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. №7 (157). С.3-14.
Science intensive technologies in mechanical engineering. 2024. №7 (157). P.3-14.

Научная статья
УДК 621.785.53
doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-14

Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях

Лариса Георгиевна Петрова¹, д.т.н.
Ирина Станиславовна Белашова², д.т.н.

^{1,2} Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Москва, Россия

¹ petrova_madi@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7248-2454>
² info@madi.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1395-1027>

Аннотация. Актуальность проведенного исследования обусловлена потребностями машиностроения в развитии недорогих и эффективных технологий поверхностного упрочнения стальных изделий, к которым относится газовое азотирование. Целью работы является исследование влияния азотирования в газоциклическом режиме на кинетику роста диффузионных слоев и их фазовый состав в железе и сталях: инструментальной стали ХВГ и коррозионностойкой мартенситностареющей стали 03X11H10M2T (ВНС-17). Помимо изотермических процессов (при 520 °С и 620 °С) исследованы процессы с изменением температуры на активных и пассивных стадиях (термоциклирование 520 °С / 620 °С). Установлено, что газо- и термоциклирование существенно увеличивает толщину диффузионного слоя в железе по сравнению с традиционным азотированием в аммиаке, и в наибольшей степени это происходит за счет роста зоны внутреннего азотирования. Процессы с многократно повторяющимися короткими полуциклами, заканчивающиеся активной стадией насыщения в аммиаке, способствуют формированию развитой нитридной зоны. Формирование поверхностных слоев в железе без ϵ -фазы происходит при двухстадийных процессах с заключительной пассивной стадией. Показано, что термогазоциклические процессы обеспечивают кратное увеличение толщины зоны внутреннего азотирования в стали ХВГ. Процессы с длительностью полуциклов 1 и 1,5 ч с завершающей стадией деазотирования способствуют преобладанию γ' -фазы в карбонитридной зоне, что объясняет повышение износостойкости. Термогазоциклический процесс 530 °С / 580 °С в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси с завершающей пассивной стадией применен для формирования зоны соединений на базе γ' -фазы в стали 03X11H10M2T (ВНС-17).

Ключевые слова: газоциклическое азотирование, стали, диффузионный слой, зона внутреннего азотирования, карбонитридная зона, износостойкость

Благодарности: материал подготовлен в рамках научных исследований по проекту №FSFM-2024-0001.

Для цитирования: Петрова Л.Г., Белашова И.С. Газоциклические процессы химико-термической обработки: регулирование строения азотированного слоя в железе и сталях // Научноёмкие технологии в машиностроении. 2024. № 7 (157). С. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-14

Gas-cycling processes of chemical and thermal treatment: regulation of the nitride layer structure for iron and steel

Larisa G. Petrova¹, D. Eng.

Irina S. Belashova², D. Eng.

^{1,2} Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI), Moscow, Russia

¹ petrova_madi@mail.ru

² info@madi.ru

Abstract. The relevance of the research is determined by the needs of mechanical engineering in the development of inexpensive and effective technologies for surface hardening of steel products, which include gas nitride hardening. The aim of the work is to study the effect of nitride hardening in the gas-cyclic regime on the kinetics of growth of diffuse layers and their phase composition in case of iron and steel: ChWMn tool steel and corrosion-resistant maraging steel 03Ch11Ni10Mo2Ti (WSTST17). In addition to isothermal processes (at 520 °C and 620 °C), processes with temperature changes at active and passive stages (thermal cycling 520 °C / 620 °C) have been studied. It has been found that gas and thermal cycling significantly increases the thickness of the diffusion layer in iron compared to traditional nitride hardening in ammonia, and this is mainly due to the growth of the internal nitriding zone. Processes with multitime repeat short half-cycles, which end in an active saturation stage in ammonia and contribute to the formation of a developed nitride zone. The formation of surface layers in iron without an ϵ -phase occurs in two-stage processes with a final passive stage. It is shown that thermo-gas cyclic processes provide a multiple increase in the thickness of the internal nitriding zone in ChWMn steel. Processes with a duration of half cycles of 1 and 1,5 hours with the final stage of denitration contribute to the predominance of the γ' phase in the carbonitride zone, which explains the increase in wear resistance. A thermal gascyclic process of 530 °C / 580 °C in a pulsating ammonia-air mixture with a final passive stage is used to form a junction zone based on the γ' -phase in steel 03Ch11Ni10Mo2Ti (WSTST17).

Keywords: gas-cycling nitride hardening, steels, diffuse layer, internal nitriding zone, carbonitride zone, wear resistance

For citation: Petrova L.G., Belashova I.S. Gas-cycling processes of chemical and thermal treatment: regulation of the nitride layer structure for iron and steel / Science intensive technology in mechanical engineering. 2024. № 7 (157). P. 3–14. doi: 10.30987/2223-4608-2024-3-14

Введение

Среди существующих технологий химико-термической обработки (ХТО) газовое азотирование остается наиболее широко распространенным методом поверхностного упрочнения стальных изделий. Азотирование обладает определенными преимуществами перед другими процессами ХТО, из которых важнейшим является возможность создания многообразных структур диффузионных слоев. Азотированные слои с регулируемым фазовым составом могут обеспечивать различные свойства поверхности для заданных условий работы деталей машин и инструментов: твердость, износостойкость, коррозионную стойкость, усталостную прочность и т. п. [1].

Требования к фазовому составу азотированных слоев применяются на основе известных механизмов изнашивания, закономерностей процессов коррозионного разрушения и других особенностей нагружения поверхности в конкретных условиях работы изделий. Традиционно полагают, что для деталей, работающих в условиях трения, необходимо сформировать твердое внешнее поверхностное покрытие на основе химических соединений. Однако для наиболее эффективной защиты от износа нитридная зона должна «опираться» на упрочненную зону внутреннего азотирования (ЗВА). Например, для режущего инструмента, испытывающего высокие удельные давления, оптимальным является строение азотированного слоя, состоящего из тонкой поверхностной карбонитридной зоны на базе γ' -фазы и развитой зоны внутреннего

азотирования [2, 3]. Считается, что для инструмента формирование хрупкой ϵ -фазы является нежелательным, поскольку вызывает снижение его работоспособности [4].

Формирование протяженной зоны внутреннего азотирования без поверхностной зоны соединений является предпочтительным для многих деталей, работающих в условиях высоких динамических нагрузок [5]. Для тонкостенных изделий может применяться сквозное азотирование с формированием зоны внутреннего азотирования, с дисперсионным упрочнением нитридами, что способствует повышению жаропрочности специальных сталей и сплавов [6]. Существуют также особые технологические приемы, обеспечивающие формирование ЗВА в виде монослоя на базе легированного твердого раствора, сохраняющего коррозионную стойкость сталей [7].

Регулирование строения азотированных слоев в железе и сталях традиционно осуществляется путем контроля азотного потенциала насыщающей атмосферы, который поддерживается на уровне растворимости азота в определенных фазах системы Fe-N. При газовом азотировании изменение азотного потенциала может быть реализовано путем разбавления аммиака, например, азотом, воздухом, кислородом и т. п. [8 – 10].

Технологии газового азотирования являются в большинстве своем низкотемпературными, поэтому для получения протяженных азотированных слоев требуются процессы большой длительности. Задача интенсификации азотирования особенно актуальна для легированных сталей, в которых медленно протекает диффузия азота. Для ускорения процесса насыщения сталей азотом применяются способы ХТО с использованием высокоэнергетических воздействий тлеющего разряда, лазера, плазмы.

Свою эффективность в активизации формирования азотированных слоев показали процессы с циклическим изменением азотного потенциала [11 – 13]. Классический газоциклический процесс предусматривает чередование стадий с высокой и низкой активностью

азотосодержащей атмосферы при одной и той же температуре. На активной стадии насыщения с высоким азотным потенциалом образуется поверхностная зона соединений; слой ϵ -фазы оказывается препятствием для дальнейшего проникновения азота вглубь слоя, что тормозит развитие зоны внутреннего азотирования. Проведение последующей стадии с пониженным азотным потенциалом вызывает рассасывание богатой азотом ϵ -фазы, т. е. процесс деазотирования, под которым подразумевают поступление высвобождающихся атомов азота в твердый раствор [14]. Многократное циклическое повторение стадий азотирования и деазотирования обеспечивает приrost азотированного слоя [15].

Изменение температуры на стадиях газоциклического процесса создает дополнительные возможности для интенсификации азотирования и регулирования фазового состава диффузионного слоя благодаря протеканию фазовых превращений [16].

Отдельный интерес представляет влияние термо- и газоциклирования на строение диффузионных слоев в легированных сталях, т. к. при наличии в железе легирующих элементов многообразие возможных фаз в азотированном слое существенно возрастает.

Целью работы является экспериментальное исследование влияния режимов газо- и термоциклического азотирования на кинетику роста азотированных слоев и их фазовый состав в железе и легированных сталях.

Методика проведения исследований

Для лабораторного эксперимента использовали установку для азотирования в проточном аммиаке, в которой предусмотрена возможность регулирования состава насыщающей среды. На модельном материале – армко-железе – изучены несколько режимов азотирования, состоящих из активных стадий в чистом аммиаке и пассивных стадий при отключении подачи аммиака. Изотермические газоциклические (ГЦ) процессы проводились при одинаковых температурах активных и пассивных стадий: режим ГЦ 520 при

температуре ниже эвтектоидной в системе Fe-N ($t_a = t_n = 520$ °C) и режим ГЦ 620 при температуре выше эвтектоидной ($t_a = t_n = 620$ °C).

Термогазоциклический режим ТГЦ 520/620 предусматривал разные температуры на активных и пассивных стадиях процесса: $t_a = 520$ °C и $t_n = 620$ °C (рис. 1). При всех режимах поддерживали степень диссоциации аммиака: на активных стадиях $\alpha_a = 25...30$ % при $t_a = 520$ °C и $\alpha_a = 40...45$ % при $t_a = 620$ °C; на пассивных стадиях $\alpha_n = 68...70$ % при $t_n = 520$ °C и $\alpha_n = 94...98$ % – при $t_n = 620$ °C.

При общем времени процесса 6 ч варьировали число циклов N , включающих активную и пассивную стадии (см. рис. 1). Каждый цикл состоит из двух полуциклов определенной продолжительности $\tau_{пц}$, одинаковой для стадий насыщения и деазотирования (0,5, 1, 1,5 и 3 ч). Процессы, заканчивающиеся финальной пассивной стадией (П-режим), оказываются «асимметричными»; «симметричные» процессы предусматривали дополнительную активную стадию 0,5 или 1 ч (А-режимы).

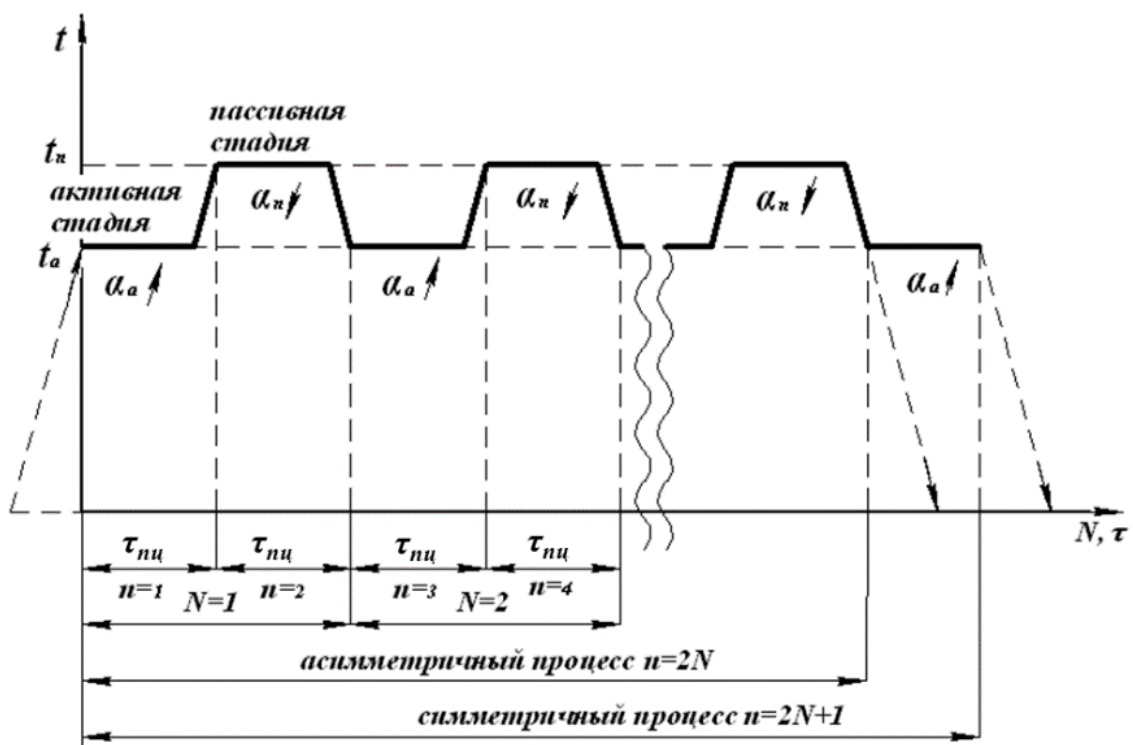


Рис. 1. Схема термогазоциклического процесса азотирования

Fig. 1. Diagram of the thermal gas-cycling nitride hardening process

При общем времени процесса 6 ч варьировали число циклов N , включающих активную и пассивную стадии (см. рис. 1). Каждый цикл состоит из двух полуциклов определенной продолжительности $\tau_{пц}$, одинаковой для стадий насыщения и деазотирования (0,5; 1; 1,5 и 3 ч). Процессы, заканчивающиеся финальной пассивной стадией (П-режим), оказываются «асимметричными»; «симметричные» процессы предусматривали

дополнительную активную стадию 0,5 или 1 ч (А-режимы).

Экспериментальные исследования термогазоциклических процессов азотирования выполнены также для высокоуглеродистой инструментальной стали ХВГ и для коррозионностойкой мартенситностареющей стали 03X11H10M2T (ВНС-17). Для высоколегированной стали 03X11H10M2T, которая относится к

трудноазотируемым, режимы ТГЦ были несколько изменены. Активные стадии насыщения (530 °C и 580 °C) проводились в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси в режиме микроциклирования [12], а общее время процесса составляло 12 ч. Пассивная стадия деазотирования проводилась при 580 °C в диссоциированном аммиаке (степень диссоциации 70...90 %).

Исследования микроструктуры образцов выполняли в металлографическом микроскопе «Neophot», фазовый рентгеноструктурный анализ – на установке ДРОН-3.

Результаты и их обсуждение

Установлено, что газоциклирование существенно увеличивает толщину диффузионного слоя в железе по сравнению с традиционным азотированием в аммиаке. В наибольшей степени это происходит за счет роста зоны внутреннего азотирования. Так, толщина ЗВА, определяемая визуально по участку с характерными выделениями γ' -фазы игольчатой формы в твердом растворе $Fe_\alpha(N)$, увеличивается почти в два раза при одинаковой температуре процессов 520 °C (рис. 2). При проведении завершающей активной стадии в аммиаке (А-процесс, $\tau_a = 0,5$ ч) происходит дополнительный прирост зоны внутреннего азотирования на 25 %.

Наиболее ускоренный рост ЗВА в результате газоциклирования достигается при большом числе полуциклов малой длительности (0,5 ч). Это объясняется тем, что кинетика азотирования, как и деазотирования, подчиняется известному параболическому закону, т. е. скорость формирования слоя затухает при увеличении продолжительности процесса. Поэтому при многократно повторяющихся коротких процессах азотирования-деазотирования в максимальной степени реализуется эффект ускорения как насыщения азотом, так и рассасывания высокоазотистых фаз.



а)



б)

Рис. 2. Микроструктуры зон внутреннего азотирования в армко-железе после традиционного азотирования при 520 °C (а) и газоциклического азотирования (П-процесс) при 520 °C $\tau_{ин} = 0,5$ ч (б), $\times 100$

Fig. 2. Microstructures of internal nitriding zones in armco iron after conventional nitride hardening at 520 °C (a) and gas-cycling nitride hardening (P-process) at 520 °C $\tau_{pc} = 0,5$ h (b), $\times 100$

Газоциклирование в определенной степени влияет на строение нитридной зоны, состоящей из участков ϵ -фазы и γ' -фазы. Симметричные процессы с финальной стадией насыщения в аммиаке несколько изменяют соотношение толщины этих участков (рис. 3, а, б) по сравнению с процессом при той же температуре в аммиаке.

Повышение температуры азотирования до 620 °C закономерно увеличивает толщину диффузионного слоя, главным образом, за счет зоны внутреннего азотирования; под нитридной зоной формируется участок эвтектоида $\alpha + \gamma'$ (рис. 3, в). Газоциклические процессы при этой температуре с короткими полуциклами позволяют увеличить толщину нитридной зоны (рис. 3, г).

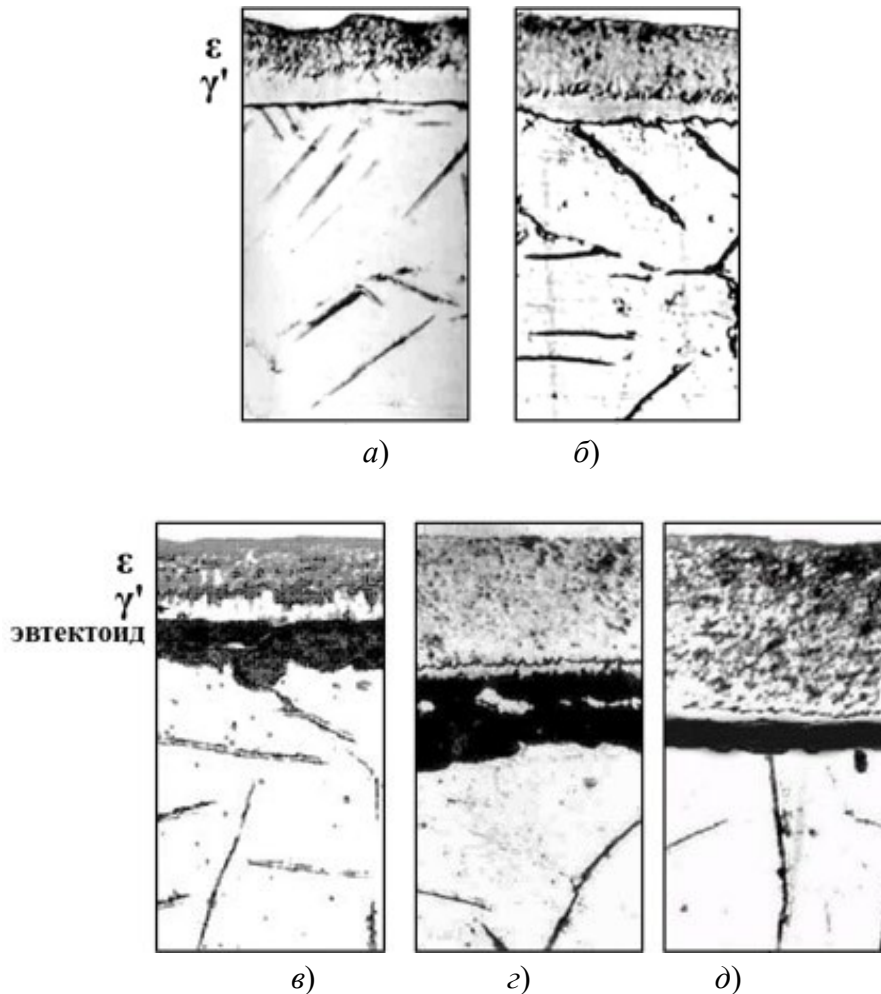


Рис. 3. Микроструктуры поверхностной зоны соединений в армко-железе:

a – азотирование в аммиаке при 520 °С; *б* – А-процесс ГЦ при 520 °С ($\tau_{\text{пс}} = 1$ ч); *в* – азотирование в аммиаке при 620 °С; *г* – А-процесс ГЦ при 620 °С ($\tau_{\text{пс}} = 0,5$ ч); *д* – А-процесс ТГЦ 520/620 ($\tau_{\text{пс}} = 0,5$ ч)

Fig. 3. Microstructure of the surface zone of compounds in armco-iron:

a – nitriding in ammonia at 520 °С; *b* – A-cycle per second process at 520 °С ($\tau_{\text{pc}} = 1$ h); *c* – nitriding in ammonia at 620 °С; *g* – A-cycle per second process at 620 °С ($\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h); *d* – A-process tetracycle 520/620 ($\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h)

Максимальный рост как зоны ВА, так и нитридной зоны, наблюдается после термогазоциклических процессов. Полученная в симметричном режиме ТГЦ 520/620 ($\tau_{\text{пс}} = 0,5$ ч) общая толщина азотированного слоя примерно в 3 раза превышает толщину слоя, формирующуюся после обычного азотирования при 520 °С, а толщина нитридной зоны возрастает до 30 мкм за счет уменьшения толщины участка эвтектоида (рис. 3, д).

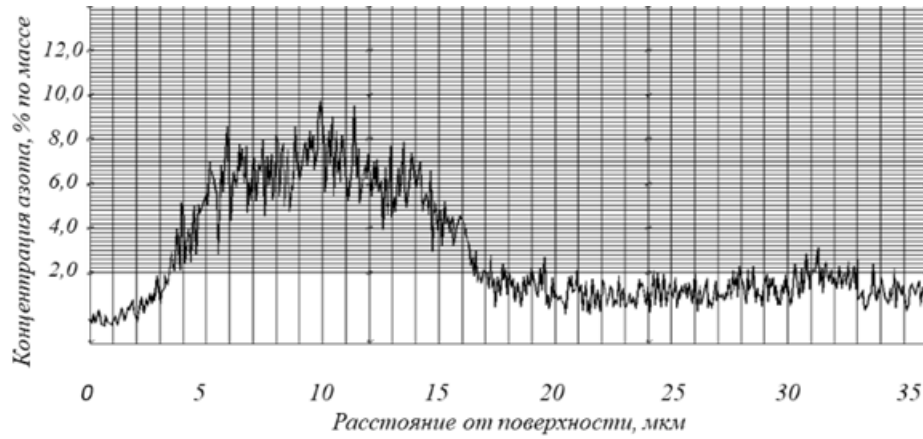
Механизм ускорения роста слоя при повышении температуры на стадии деазотирования связывают с изменением объема сплавов Fe-N при протекающих фазовых

превращениях [11]. Во время первой активной стадии при 520 °С на поверхности железа образуется слой с большим содержанием азота. При нагреве до 620 °С происходит образование аустенита, который после охлаждения ниже 591 °С превращается в азотистый эвтектоид ($\alpha + \gamma'$), что сопровождается увеличением объема. Этот фактор способствует оттоку азота из поверхностных участков, а многократное повторение таких циклов обеспечивает диффузионное «закачивание» азота вглубь металла.

Толщина поверхностного участка высокоазотистой фазы после симметричного А-процесса ТГЦ 520/620 с короткими полуциклами

увеличивается вдвое по сравнению со стандартным азотированием, что видно из рис. 4. Концентрация азота в нитриде повышается от 7...8 % N до 10...11 % N и приближается к максимальной его растворимости в ϵ -фазе. Плато

максимальной концентрации азота на кривой распределения сдвигается вглубь слоя, что подтверждает механизм прироста диффузионного слоя при газоциклировании.



а)



б)

Рис. 4. Профили распределения концентрации азота по глубине (данные МРСА) в образцах армко-железа после азотирования в аммиаке при 520 °C (а) и после А-процесса ТГЦ 520/620, $\tau_{\text{цикл}} = 0,5$ ч (б)

Fig. 4. Profiles of the distribution of nitrogen concentration by depth (MRSA data) in armco-iron samples after nitriding in ammonia at 520 °C (a) and after the A-process tetracycle 520/620, $\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h (b)

К режимам, способствующим максимальной интенсификации роста азотированного слоя и формированию развитой нитридной зоны, относятся ГЦ и ТГЦ процессы с большим числом коротких полуциклов, заканчивающиеся активной стадией насыщения в аммиаке. Относительная мольная доля ϵ -фазы в поверхностном слое, выявляемая по результатам рентгеноструктурного анализа, растет при увеличении температуры изотермического

ГЦ процесса и достигает максимума при процессе ТГЦ 520/620 (рис. 5, а). Формирование поверхностных слоев в железе без ϵ -фазы происходит при ассиметричных режимах с заключительной пассивной стадией деазотирования (П-процессы). Оптимальными в этом случае являются процессы ГЦ 620 и ТГЦ 520/620, состоящие из двух полуциклов длительностью по 3 ч (рис. 5, б).

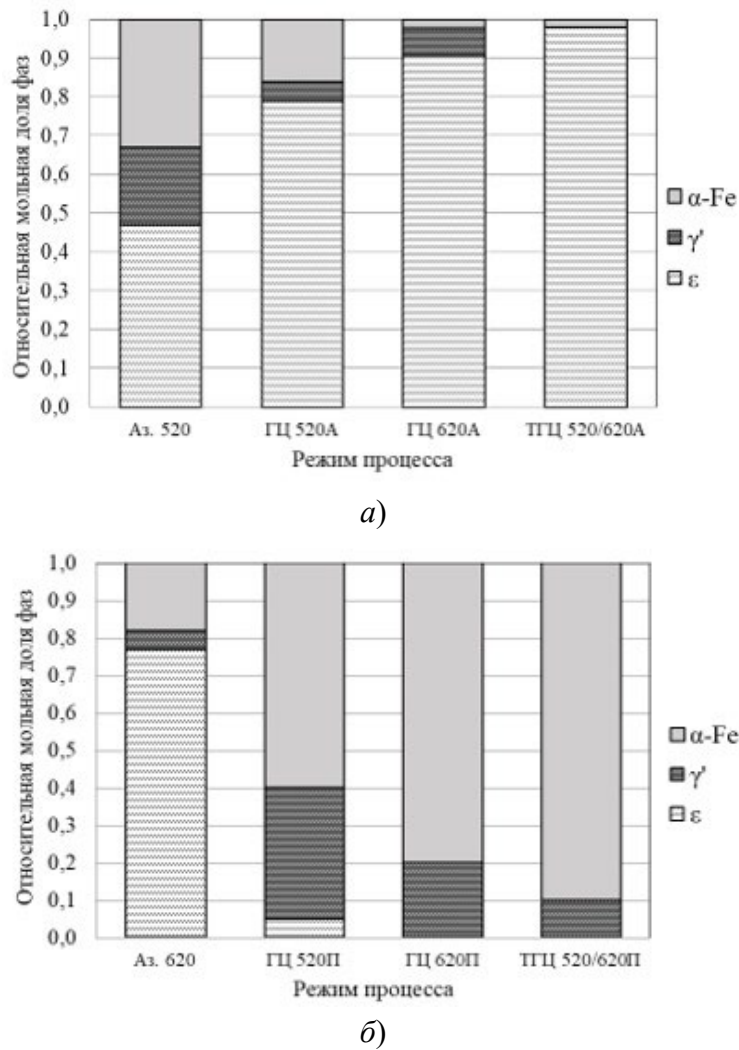


Рис. 5. Относительные мольные доли фаз (по данным РСА) в поверхностном слое армко-железа после традиционного азотирования и газоциклических процессов:

a – режимы с завершающей активной стадией и длительностью полуциклов $\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч; *б* – режимы с завершающей пассивной стадией и длительностью полуциклов $\tau_{\text{пц}} = 3$ ч

Fig. 5. Relative molar fractions of phases (according to X-ray crystal analysis data) in the surface layer of armco-iron after traditional nitriding and gas-cycling processes:

a – modes with the final active stage and the duration of half cycles $\tau_{\text{pc}} = 0,5$ h; *b* – modes with the final passive stage and the duration of half cycles $\tau_{\text{pc}} = 3$ h

Как уже упоминалось, минимальная толщина хрупкой ϵ -фазы является благоприятным фактором для повышения стойкости азотированного режущего инструмента. Для изыскания наиболее рационального режима газоциклического азотирования инструментальной стали ХВГ были проведены исследования строения диффузионных слоев после симметричных П-процессов. Эксперименты подтвердили

закономерности влияния режимов термо- и газоциклирования на фазовый состав слоя, выявленные для армко-железа. Различие заключается в том, что в высокоуглеродистой стали ХВГ химические соединения (ϵ - и γ' -фаза) представляют собой карбонитриды.

Исследования кинетики роста отдельных участков диффузионного слоя в стали ХВГ позволили смоделировать его строение

в зависимости от режима процесса (рис. 6). Установлено, что ТГЦ процессы с завершающей стадией деазотирования приводят к существенному уменьшению доли ϵ -фазы и преобладанию γ' -фазы в нитридной зоне. Толщина зоны ϵ -фазы тем меньше, чем больше продолжительность полуциклов. При П-процессах с $\tau_{\text{пц}}=1,5$ ч происходит образование несплошного слоя низкоазотистой ϵ -фазы минимальной толщины. Изотермические ГЦ процессы хотя и повышают долю γ' -фазы в слое и в 2,5 раза увеличивают толщину ЗВА, но не позволяют снизить

толщину ϵ -фазы по сравнению с обычным азотированием (см. рис. 6). Полученные данные по строению азотированных слоев в стали ХВГ коррелируют с изменением износостойкости. Испытания показали, что минимальный относительный показатель глубины износа (0,38) достигается после ТГЦ режима при продолжительности полуциклов 1,5 ч. Этому режиму соответствует структура азотированного слоя с наименьшей толщиной ϵ -фазы, развитой γ' -фазой и достаточно протяженной зоной внутреннего азотирования (см. рис. 6).

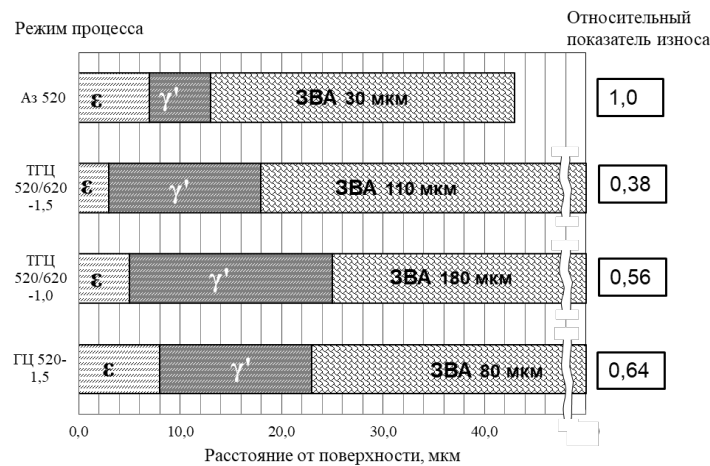


Рис. 6. Схемы строения азотированных слоев в стали ХВГ после азотирования в аммиаке при 520 °С и после газоциклических П-процессов ГЦ и ТГЦ с завершающей стадией деазотирования и временем полуциклов 1 ч и 1,5 ч в сравнении с относительным показателем износа

Fig. 6. Diagrams of the structure of nitride layers in ChWMn steel after nitriding in ammonia at 520 °C and after gas-cyclic P-processes cycle per second and tetracycle with the final stage of denitration and half-cycle time of 1 h and 1,5 h in comparison to the relative wear index

Структура азотированного слоя, не содержащая хрупкой ϵ -фазы, оптимальна также для высоколегированных низкоуглеродистых сталей, в том числе коррозионностойких и жаростойких. Установлено, что проведение азотирования стали 03X11H10M2T в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси с повышением температуры на второй стадии процесса с 530 °С до 580 °С (ТЦ А-процесс) увеличивает толщину диффузионного слоя с 80 до 110 мкм по сравнению с изотермическим

процессом при 530 °С (рис. 7, а, б). Но данный режим не позволяет избавиться от ϵ -фазы и вызывает выделение нежелательных нитридов хрома (рис. 8), что понижает коррозионную стойкость сталей. При частичной замене второй высокотемпературной стадии на режим деазотирования, осуществляемый в практически полностью диссоциированном аммиаке (ТГЦ П-процесс), происходят существенные изменения в фазовом составе азотированного слоя. В нитридной зоне ϵ -фаза практически

полностью заменяется на низкоазотистую γ' -фазу, отсутствуют нитриды хрома и резко снижается доля оксидной фазы (см. рис. 8). Общая толщина диффузионного слоя увеличивается до 120 мкм (см. рис. 7, в). Полученная структура не только способствует повышению

износостойкости стали, но и обеспечивает снижение напряжений на границе диффузионного слоя с матричным металлом, поскольку на стадии деазотирования происходит внутренняя выравнивающая диффузия азота, сглаживающая перепад концентраций.

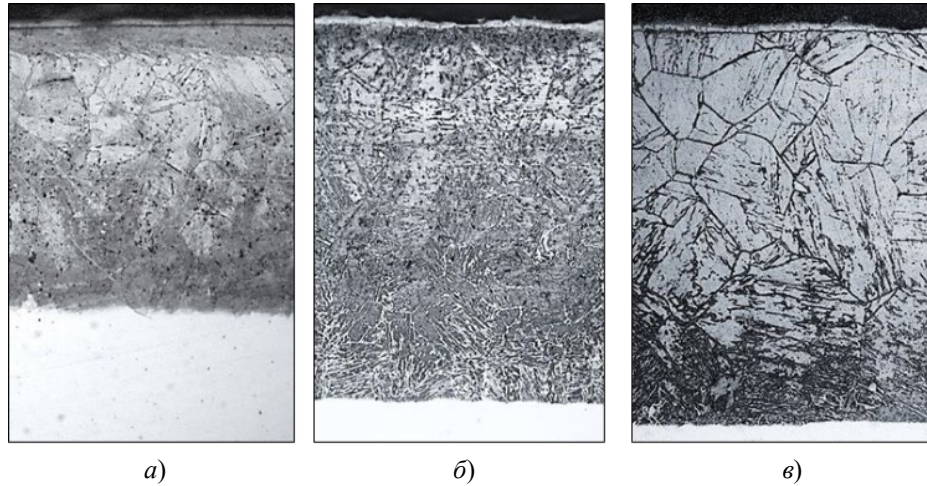


Рис. 7. Микроструктуры стали 03X11Ni10Mo2Ti после азотирования в пульсирующей аммиачно-воздушной смеси: а – изотермический процесс при 530 °С; б – А-процесс ТЦ 530/580; в – П-процесс ТГЦ 530/580/580 с завершающей стадией деазотирования

Fig. 7. Microstructure of steel 03Ch11Ni10Mo2Ti after nitride hardening in a pulsating ammonia-air mixture: a – isothermal process at 530 °C; b – A-process TC 530/580; c – P-process tetracycle 530/580/580 with the final stage of denitration

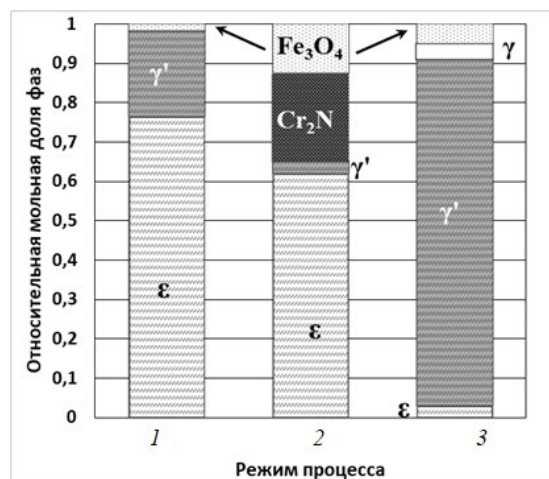


Рис. 8. Относительные мольные доли фаз (по данным RSA) в поверхностном слое стали 03X11Ni10Mo2Ti после: 1 – изотермического процесса при 530 °С; 2 – А-процесса ТЦ 530/580; 3 – П-процесса ТГЦ 530/580/580 с завершающей стадией деазотирования

Fig. 8. Relative molar fractions of phases (according to RSA data) in the surface layer of steel 03Ch11Ni10Mo2Ti after: 1 – isothermal process at 530 °C; 2 – A-process TC 530/580; 3 – P-process tetracycle 530/580/580 with the final stage of denitration

Заключение

Исследования процессов газоциклического азотирования на модельном материале – армко-железе показали, что наиболее широкие возможности регулирования фазового состава азотированного слоя реализуются в режиме термогазоциклирования с изменением температуры на отдельных циклах ниже и выше эвтектоидной в системе железо-азот. Для формирования нитридной зоны на базе ϵ -фазы является рациональным процесс с большим числом коротких полуциклов, завершающийся активной стадией. Для образования поверхностной зоны без ϵ -фазы рекомендуется двухстадийный процесс с большой длительностью полуциклов с конечной стадией деазотирования. Оба режима позволяют увеличить общую толщину азотированного слоя за счет прироста зоны внутреннего азотирования при разложении высокоазотистых нитридов на пассивной стадии процесса.

Определены режимы термогазоциклического процесса азотирования инструментальной стали ХВГ для получения оптимальной структуры азотированного слоя, состоящего из карбонитридной зоны с минимальной долей ϵ -фазы и развитой зоны внутреннего азотирования, что обеспечивает повышение износостойкости.

Процесс термогазоциклического азотирования с завершающей пассивной стадией применен для формирования зоны соединений на базе γ' -фазы в коррозионностойкой стали 03X11H10M2T. Данный режим также способствует интенсификации процесса и снижению напряжений на границе диффузионного слоя с основной стали благодаря протеканию выравнивающей диффузии на стадии деазотирования.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-Й., Бемер З. Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
2. Александров В. А., Богданов К.В. Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 5. С. 14–20.

3. Демин П.Е., Барабанов С.И., Малахов А.Ю., Александров В.А. Упрочнение штамповых сталей металлокерамическими покрытиями, получаемыми способом газового азотирования // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 2 (128). С. 17–21.

4. Петрова Л.Г., Александров В.А., Вдовин В.М., Демин П.Е. Повышение стойкости инструмента из быстрорежущей стали при азотировании с регулируемым азотным потенциалом // Научные технологии в машиностроении. 2022. № 1 (127). С. 3–10.

5. Бибииков П.С., Белашова И.С., Прокофьев М.В. Особенности технологии азотирования высоколегированных коррозионностойких сталей авиационного назначения // Вестник Московского авиационного института. 2021. Т. 28. № 2. С. 206–215.

6. Петрова Л.Г. Научные технологии в материаловедении: высокотемпературное сквозное азотирование жаростойкой стали // Научные технологии в машиностроении. 2023. № 9 (147). С. 3–15.

7. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L., et al. High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance // Appl. Surf. Sci. 2018. Vol. 431. P. 24–31.

8. Шестопалова Л.П., Александров В.А. Влияние циклического оксизазотирования на технические характеристики конструкционных легированных сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 5 (161). С. 220–224.

9. Бойназаров У.Р., Петрова Л.Г., Брежнев А.А., Бибииков П.С. Свойства оксинитридных покрытий на стали, полученных при трехстадийных процессах азотирования с оксидированием // Металлург. 2021. № 8. С. 64–68.

10. Эшкабилов Х.К. Изменение фазового состава нитридного слоя при последующем пароксидировании // Актуальные исследования. 2023. № 7-1 (137). С. 22–24.

11. Шашков Д.П., Горячев А.Б. Газоциклическое азотирование конструкционных сталей // Технология металлов. 1998. №3. С. 11–13.

12. Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибииков П.С. Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MF // Научные технологии в машиностроении. 2021. № 12 (126). С. 12–19.

13. Белашова И.С., Петрова Л.Г., Сергеева А.С. Интенсификация процесса насыщения железа азотом методом термогазоциклического азотирования // Все материалы. Энциклопедический справочник. 2017. № 9. С. 2–9

14. Кольцов В.Е., Сысоев М.И. Влияние технологических параметров процесса деазотирования на фазовый состав нитридного слоя // Металловедение и термическая обработка металлов. 2002. № 10. С. 21–22.

15. Белашова И. С., Петрова Л.Г., Бибииков С.П. Повышение качества диффузионного слоя в высоколегированных сталях после газоциклических процессов азотирования // Технология металлов. 2023. № 12. С. 2–8.

16. Петрова Л.Г., Белашова И.С., Лисовская О.Б., Маринин Е.А. Формирование азотированных слоев в железе в условиях термоциклирования // Черные металлы. 2023. № 7. С. 42–46.

REFERENCES

1. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.-Y., Boehmer Z. Theory and technology of nitriding. Moscow, Metallurgiya Publ., 1991. 320 p.
2. Alexandrov V. A., Bogdanov K.V. Nitriding of tools made of high-chromium and high-speed steel // Strengthening technologies and coatings. 2005, no. 5, pp. 14–20.
3. Demin P.E., Barabanov S.I., Malakhov A.Yu., Alexandrov V.A. Hardening of stamped steels with metal-ceramic coatings obtained by the method of gas nitriding // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 2 (128), pp. 17–21.
4. Petrova L.G., Alexandrov V.A., Vdovin V.M., Demin P.E. Increasing the durability of high-speed steel tools during nitriding with controlled nitrogen potential // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2022, no. 1 (127), pp. 3–10.
5. Bibikov P.S., Belashova I.S., Prokofiev M.V. Features of nitriding technology of high-alloy corrosion-resistant steels for aviation purposes // Bulletin of the Moscow Aviation Institute. 2021, vol. 28, no. 2, pp. 206–215.
6. Petrova L.G. High-techs in materials science: through-the-thickness austenitic nitriding of heat-resistant steel // Science intensive technologies in mechanical engineering. 2023, no. 9 (147), pp. 3–15.
7. Bottoli F., Jellesen M.S., Christiansen T.L., et. al. High temperature solution-nitriding and low-temperature nitriding of AISI 316: Effect on pitting potential and crevice corrosion performance // Appl. Surf. Sci. 2018. Vol. 431. P. 24–31.
8. Shestopalova L.P., Alexandrov V.A. Influence of cyclic oxynitriding on the technical characteristics of structural alloy steels // Hardening technologies and coatings. 2018, vol. 14, no. 5 (161), pp. 220–224.
9. Baynazarov U.R., Petrova L.G., Brezhnev A.A., Bibikov P.S. Properties of oxynitride steel coatings obtained through three-stage processes of nitriding combined with oxidation // Metallurgist. 2021, no. 8, pp. 64–68.
10. Ishkobilov H.K. Change in the phase composition of the nitride layer under subsequent steam oxidation. 2023, no. 7-1 (137), pp. 22–24.
11. Shashkov D.P., Goryachev A.B. Gas-cyclic nitriding of structural steels // Technology of metals. 1998, no. 3, pp. 11–13.
12. Prokofiev M.V., Petrova L.G., Belashova I.S., Bibikov P.S. The effect of stadial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF // Science-intensive technologies in mechanical engineering. 2021. No. 12 (126). pp. 12–19.
13. Belashova I.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S. Intensification of the process of iron saturation with nitrogen by the thermogas cyclic nitriding method // Proceedings. An encyclopedic reference book. 2017, no. 9, pp. 2–9
14. Koltsov V.E., Sysoev M.I. Influence of technological parameters of the diazotization process on the phase composition of the nitride layer // Metallurgy and heat treatment of metals. 2002, no. 10, pp. 21–22.
15. Belashova I. S., Petrova L.G., Bibikov S.P. Improving the quality of the diffusion layer in high-alloy steels after gas-cyclic nitriding processes // Technology of metals. 2023, no. 12, pp. 2–8.
16. Petrova L.G., Belashova I.S., Lisovskaya O.B., Marinin E.A. Formation of nitrided layers in iron under thermal cycling conditions // Ferrous metals. 2023, no. 7, pp. 42–46.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.
The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 03.04.2024; одобрена после рецензирования 22.04.2024; принята к публикации 26.04.2024.

The article was submitted 03.04.2024; approved after reviewing 22.04.2024; assepted for publication 26.04.2024.