

Научная статья
УДК 621.785. 532
DOI: 10.34759/vst-2022-2-237-245

РЕГУЛИРОВАНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА АЗОТИРОВАННОГО СЛОЯ В ЖЕЛЕЗЕ ПРИ ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ В УСЛОВИЯХ ТЕРМОЦИКЛИРОВАНИЯ

Ирина Станиславовна Белашова¹ ✉, Лариса Георгиевна Петрова²

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

¹irina455@inbox.ru ✉

²petrova_madi@mail.ru

Аннотация. Рассматривается способ термогазоциклического азотирования, заключающийся в чередовании стадий процесса с высоким и низким азотным потенциалом при температурах, соответственно, ниже и выше температуры эвтектоидного превращения в системе Fe-N. Изучены фазовый состав азотированного слоя после обработки на различных режимах и кинетика роста отдельных его участков. Показаны возможности интенсификации азотирования и регулирования фазового состава слоя путем рационального выбора параметров процесса: числа полуциклов и их длительности. На полуцикле с высокой насыщающей способностью атмосферы на поверхности формируется высокоазотистая нитридная зона, которая трансформируется в протяженную γ' -зону и зону внутреннего азотирования за счет внутренней диффузии при цикле с низкой способностью насыщающей атмосферы, что позволяет регулировать процесс и получать поверхностный слой заданного состава и свойств.

Ключевые слова: азотирование, термоциклирование, газоциклирование, микроструктура, фазовый состав, внутренняя диффузия

Для цитирования: Белашова И.С., Петрова Л.Г. Регулирование фазового состава азотированного слоя в железе при химико-термической обработке в условиях термоциклирования // Вестник Московского авиационного института. 2022. Т. 29. № 2. С. 237-245. DOI: 10.34759/vst-2022-2-237-245

Original article

REGULATION OF THE PHASE COMPOSITION OF THE NITRIDED LAYER IN IRON DURING CHEMICAL THERMAL TREATMENT UNDER THERMO-CYCLING CONDITIONS

Irina S. Belashova¹ ✉, Larisa G. Petrova²

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

¹irina455@inbox.ru ✉

²petrova_madi@mail.ru

© Белашова И.С., Петрова Л.Г., 2022

Abstract

The article considers the thermo-gas-cyclic nitration method, consisting in alternating the process stages with high and low nitrogen potential, being conducted at temperatures, respectively, below and above the temperature of the eutectoid transformation in the Fe-N system. At the half-cycle with high saturation capacity of the atmosphere at the low dissociation degree of ammonia, a high-nitrogen nitride zone is being formed on the surface. It transforms into an extended γ' -zone and an internal nitrating zone due to internal diffusion in a cycle with a low saturating capability of the atmosphere, or at a high degree of ammonia dissociation. The processes with alternate changing of the nitrogen potential contribute at certain stages to accelerated growth of the nitrated layer. Besides, this allows controlling the process and obtaining the required combination of phases, determining these or that product properties, necessary for various operation conditions, namely:

- The presence of a high-nitrogen nitride zone on the surface contributes to the running-in of friction units and, some cases, increases the corrosion resistance;
- Under wear-out condition at the increased specific pressures, the multi-layer structure from the surface nitride zone bearing on the internal nitriding zone, appears to be the most steadfast one;
- The extended zone of internal nitriding with minimal surface nitride layer should be formed for the parts operating in the dynamic wear-out mode and shock loading.

In some cases, such as corrosion-resistant steels nitriding, a diffusion layer based on an internal nitriding zone (solid solution) without a nitride zone is advantageous.

The control principle is based on maintaining the nitrogen potential at the level of values corresponding to the solubility of nitrogen in a given phase of the Fe-N system. Chemical-thermal treatment with alternate supply of ammonia and air (gas-cyclic process) allows fourfold duration reduction of the diffusion layer forming process of a specified thickness in alloyed steels. The phase composition of the surface layer after various nitriding process modes and kinetics of its individual sections growth were studied.

Possibilities of intensifying nitriding and controlling the phase composition of the layer by a rational choice of process parameters, namely the number of half-cycles and their duration are shown.

Keywords: thermo-cycling, gas cycling, microstructure, phase composition, internal diffusion

For citation: Belashova I.S., Petrova L.G. Regulation of the Phase Composition of the Nitrated Layer in Iron During Chemical Thermal Treatment under Thermo-Cycling Conditions. *Aerospace MAI Journal*, 2022, vol. 29, no. 2, pp. 237-245. DOI: 10.34759/vst-2022-2-237-245

Введение

В настоящее время для поверхностного упрочнения стальных деталей машин и инструмента применяется множество технологических вариантов азотирования. Эффективность этого метода химико-термической обработки (ХТО) во многом связана с возможностью регулирования в широких пределах фазового состава и строения диффузионного слоя для достижения требуемых свойств конкретного изделия: поверхностной твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, усталостной прочности и др.

Сочетание фаз в азотированном слое определяет свойства поверхности деталей, требуемые для различных условий эксплуатации [1–3]. Наличие на поверхности высокоазотистой нитридной зоны способствует приработке узлов трения и, в некоторых случаях, повышает сопротивле-

ние коррозии [4, 5]. В условиях изнашивания при повышенных давлениях наиболее стойкой оказывается многослойная структура из поверхностной нитридной зоны, опирающейся на зону внутреннего азотирования. Протяженную зону внутреннего азотирования с минимальным поверхностным нитридным слоем формируют для деталей, работающих в режиме динамического износа и ударных нагрузок. В некоторых случаях, например при азотировании коррозионно-стойких сталей, имеет преимущество диффузионный слой на базе зоны внутреннего азотирования (твердого раствора) без нитридной зоны [6–8].

Контроль азотного потенциала насыщающей атмосферы является основным способом регулирования фазового состава азотированного слоя

[9, 10]. Принцип контроля основан на поддержании азотного потенциала на уровне значений, соответствующих растворимости азота в данной фазе системы Fe-N. При традиционном печном газовом азотировании контроль осуществляется путем применения многокомпонентных сред при разбавлении аммиака азотом, воздухом, кислородом, углеродосодержащими газами, а также продуктами его крекинга [11–13].

В последние годы одним из основных направлений совершенствования процессов азотирования является изыскание способов интенсификации насыщения стали, поскольку процессы, как правило, отличаются большой длительностью. Наиболее очевидным фактором ускорения роста диффузионного слоя является температура процесса, так как ее повышение увеличивает диффузионную подвижность азота в металле. Однако высокотемпературные процессы азотирования эффективны лишь для отдельных групп сталей, например для трудноазотируемых сталей аустенитного класса [14, 15]. Широко используются приемы интенсификации, основанные на повышении активности газовой среды, например азотирование в плазме тлеющего разряда [16]. Исследуются процессы с использованием других видов энергетического воздействия: лазера [17], ультразвука [18], а также каталитических эффектов [19].

Установлено, что ускоренному росту азотированного слоя способствуют процессы с чередующимся изменением азотного потенциала на отдельных стадиях — так называемое газоциклическое азотирование [20]. Так, ХТО с попеременной подачей аммиака и воздуха позволяет до 4 раз сократить длительность процесса для формирования диффузионного слоя заданной толщины в легированных сталях [4]. Такие процессы обеспечивают дополнительные возможности для регулирования фазового состава за счет циклического изменения состава атмосферы. Они основаны на контроле формирования на поверхности слоя ϵ -нитрида, который препятствует проникновению азота в зону внутреннего азотирования вследствие низкой его диффузионной подвижности в этой фазе. Принцип газоциклического азотирования заключается в чередовании стадий процесса с высоким и низким азотным потенциалом. Образовавшаяся на начальной стадии процесса высокоазотистая ϵ -фаза становится источником азота на последующей стадии отжига, когда происходит ее рассасывание за счет внутренней диффузии. Таким образом, много-

кратное повторение стадий азотирования и внутренней диффузии обеспечивает прирост диффузионного слоя и его требуемый фазовый состав [14].

Дополнительные возможности для регулирования фазового состава диффузионных слоев создаются при изменении температуры на различных стадиях газоциклического процесса [13]. Повышение температуры на стадии отжига при активной внутренней диффузии является фактором ускорения процесса рассасывания высокоазотистых нитридных фаз и способствует повышению концентрации азота в твердом растворе [20]. Целью настоящей работы является определение параметров термоциклического процесса азотирования, влияющих на фазовый состав диффузионного слоя в железе и кинетику его формирования.

Методика проведения исследований

Лабораторный эксперимент по термоциклической ХТО проводили на установке для азотирования, включающей систему поддержания температуры в рабочем объеме печи, систему точной подачи газа с возможностью контроля расхода аммиака и прерывания его подачи.

Образцы армко-железа помещали в рабочий контейнер, герметизировали его и подключали к системе газообеспечения. Контейнер предварительно продували аммиаком в течение 5...10 мин, устанавливали рабочий расход аммиака, после чего помещали его печь, нагретую до выбранной температуры.

Термоциклический процесс заключался в чередовании стадий азотирования в чистом аммиаке при температуре 520 °С и последующего отжига при температуре 620 °С с отключением подачи аммиака, т. е. при близком к нулю азотном потенциале. При этом начинается процесс трансформации поверхностной структуры за счет внутренней объемной диффузии. Степень диссоциации аммиака на стадии азотирования поддерживали на уровне $\alpha = 25...30\%$; на стадии отжига степень диссоциации составляла 94–98%.

В течение нескольких циклов ($N = 1...6$) стадия азотирования в чистом аммиаке чередуется со стадией отжига. Таким образом, цикл «азотирование+отжиг» состоит из двух полуциклов, характеризующихся продолжительностью каждой стадии. Основными параметрами процесса являются длительность полуцикла $\tau_{\text{пц}}$ и количество полуциклов $n = 2N$.

Длительность полуциклов одинакова в каждом процессе: от 3 до 0,5 ч. При этом число полуциклов n составляло от 2 до 12, так что суммарная продолжительность базовых процессов равна 6 ч (2x3 ч; 4x1,5 ч; 6x1 ч; 12x0,5 ч). Помимо базовых процессов с четным числом полуциклов, при которых процесс заканчивался стадией отжига (режим А), проводили процессы с нечетным числом полуциклов $n = 2N+1$, завершающиеся дополнительной стадией азотирования в аммиаке продолжительностью 0,5 ч (режим В).

Температуры стадий азотирования и отжига выбирали из соображений протекания фазовых превращений при смене стадий в соответствии с диаграммой состояния Fe-N. Температура стадии азотирования ($t_{аз} = 520\text{ }^{\circ}\text{C}$) соответствует температуре традиционного азотирования. Температура отжига $t_{отж} = 620\text{ }^{\circ}\text{C}$ несколько выше эвтектидной температуры в системе Fe-N ($591\text{ }^{\circ}\text{C}$), что обеспечивает наиболее полную диссоциацию аммиака и не приводит к росту зерна.

Исследования микроструктуры азотированных слоев проводили в оптическом металлографическом микроскопе «Neophot», а также в растровом электронном микроскопе EVO MA10. Фазовый рентгеноструктурный анализ слоев проводили на дифрактометре ДРОН-3.

Результаты и их обсуждение

Для изучения эффекта термоциклирования проведено сравнение микроструктуры и фазового состава с результатами, полученными при изотермическом газоциклическом процессе (режим С: $t_{аз} = t_{отж} = 520\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч), а также при традиционном азотировании в аммиаке (режим D: $t_{аз} = 520\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч). Экспериментально показано, что при всех исследуемых режимах полученные диффузионные слои состоят из нитридной зоны и диффузионного подслоя зоны внутреннего азотирования (рис. 1), что соответствует закономерностям фазовых превращений в системе Fe-N. В зоне внутреннего азотирования наблюдаются выделения γ' -фазы характерной игольчатой формы в легированном азотом α -твердом растворе $\text{Fe}_\alpha(\text{N})$ (рис. 2).

Поверхностная зона соединений сформирована на основе высокоазотистой ϵ -фазы Fe_3N , под которой наблюдается подслоя γ' -нитрида Fe_4N (рис. 3). После термоциклического процесса под нитридной зоной формируется слой эвтектоида ($\alpha + \gamma'$) (рис. 1,а, рис. 3,б).

Как видно на рис. 1,б,в, изотермический газоциклический процесс формирует нитридную

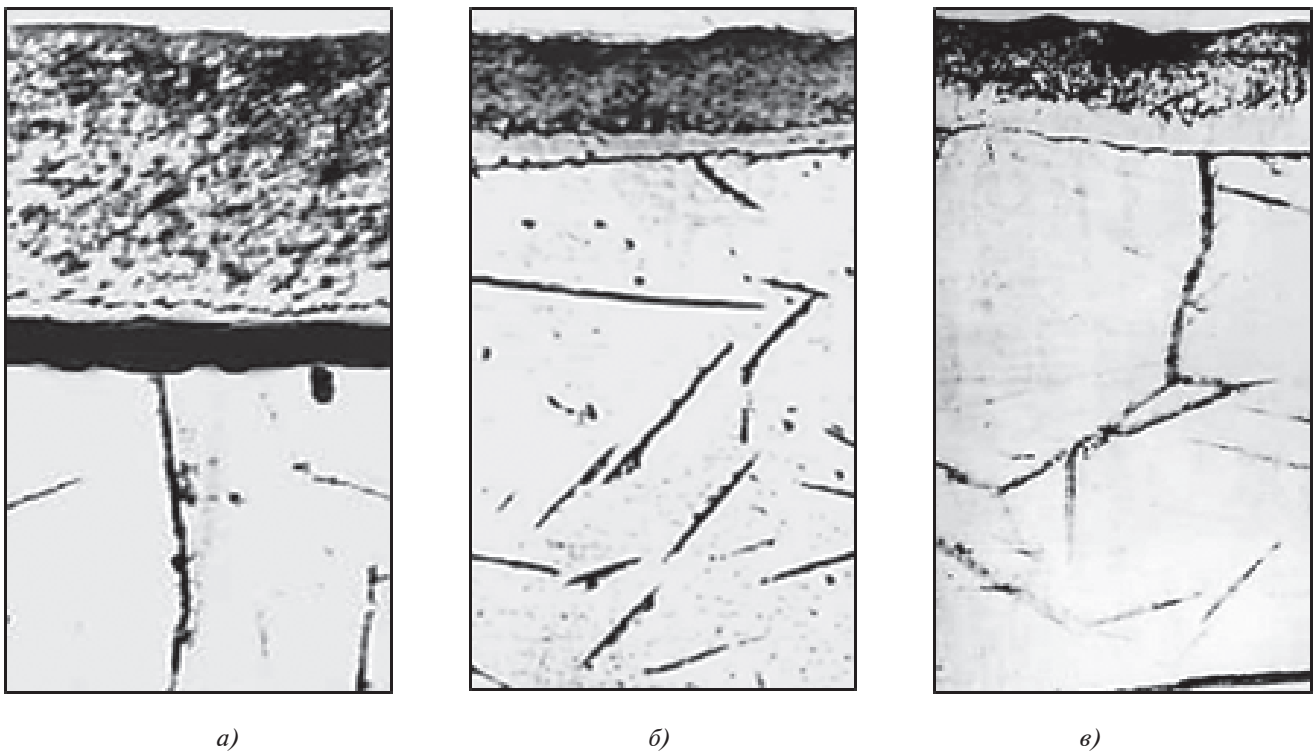


Рис. 1. Микроструктуры поверхностного слоя в армко-железе после азотирования: а — по режиму В — термоцикл $520\text{ }^{\circ}\text{C}/620\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 6+1$; б — по режиму С — газоцикл $520\text{ }^{\circ}\text{C}/520\text{ }^{\circ}\text{C}$, $n = 6$; в — по режиму D — $520\text{ }^{\circ}\text{C}$, 6 ч, NH_3 ; x1000

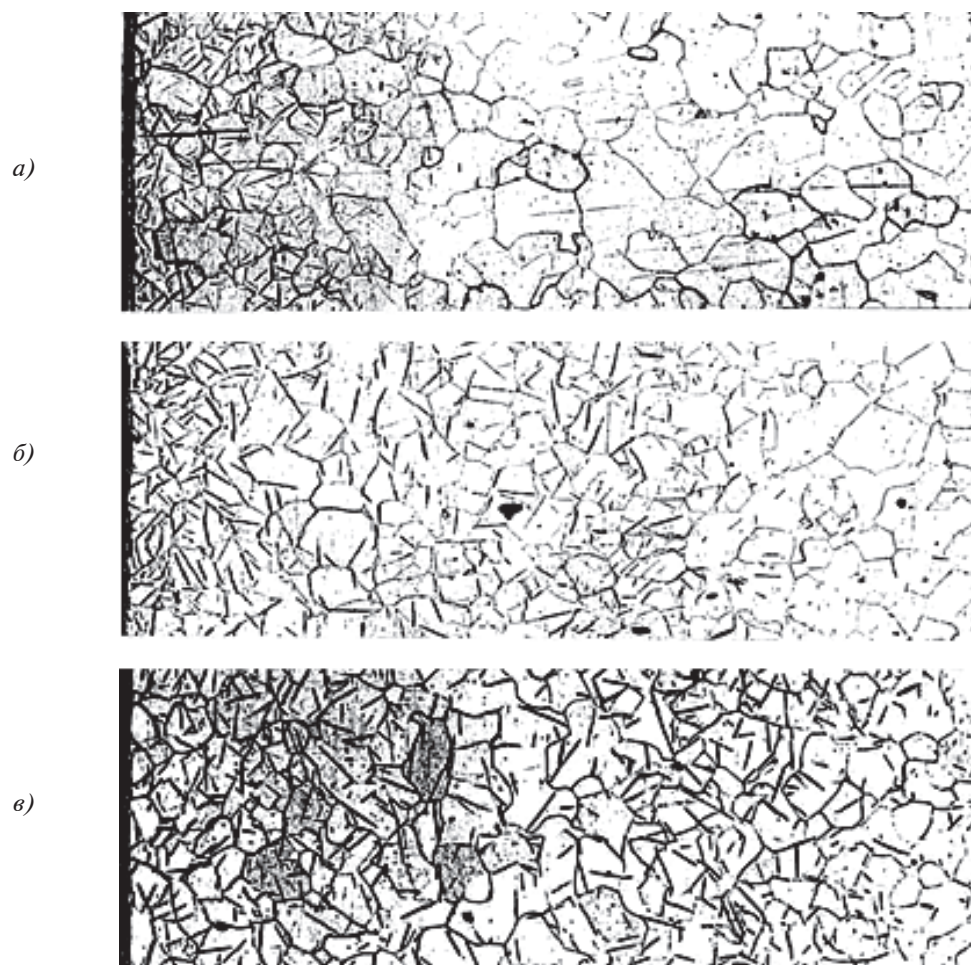


Рис. 2. Структура зон внутреннего азотирования в армко-железе после ХТО: *a* — традиционное азотирование по режиму D — 520 °C, 6 ч, NH₃; *b* — термоцикл по режиму А — 520 °C/620 °C, $n = 6$; *c* — термоцикл по режиму В — 520 °C/620 °C, $n = 6+1$; $\times 250$

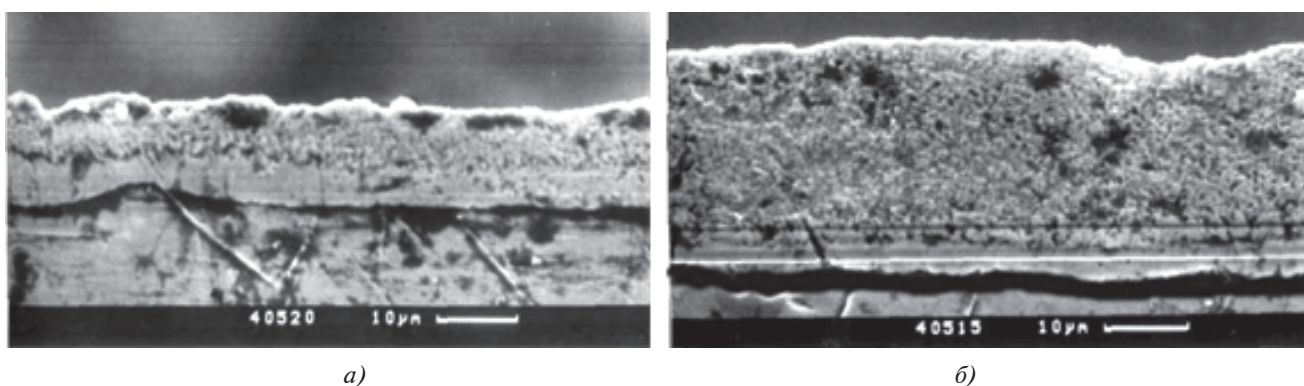


Рис. 3. Изображение в растровом электронном микроскопе (РЭМ-изображение) поверхностной зоны соединений в армко-железе после классического (*a*) и термоциклического (*b*) азотирования по режиму В ($n = 12+1$)

зону примерно такой же толщины, как и классическое печное азотирование при данной температуре, в то время как термоциклирование с завершающей стадией насыщения в аммиаке существенно увеличивает толщину зоны соеди-

нений (рис. 1, *a*, рис. 3, *b*), состоящую преимущественно из ϵ -фазы. На рис. 4 показано сравнение относительных долей фаз на поверхности, полученное на основе оценки интенсивности пиков при рентгеновском фазовом анализе, в

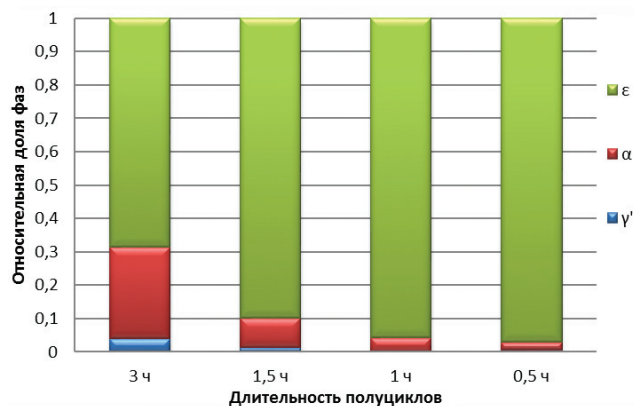


Рис. 4. Относительная доля фаз на поверхности армко-железа при термоциклическом азотировании в режиме В (с завершающей стадией азотирования) при различной длительности полуциклов

зависимости от длительности полуциклов. Видно, что термоциклический процесс, заканчивающийся азотированием (режим В), приводит к образованию практически сплошной ε-фазы при большом числе коротких полуциклов ($n = 6 + 1$, $\tau_{\text{пц}} = 1$ ч и $n = 12 + 1$, $\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч).

При этих параметрах достигается значительный дополнительный прирост толщины ε-фазы на завершающей стадии азотирования. Максимальная толщина зоны ε-фазы в режиме В наблюдается при $n = 12 + 1$ и $\tau_{\text{пц}} = 0,5$ ч: она в два раза больше, чем при обычном азотировании и при газоциклическом процессе (рис. 5). Тогда как процесс, содержащий по одной стадии азотирования и отжига ($n = 2$) по 3 ч с дополнительным азотированием 0,5 ч практически не изменяет толщину ε-фазы по сравнению с классическим азотированием (10...12 мкм).

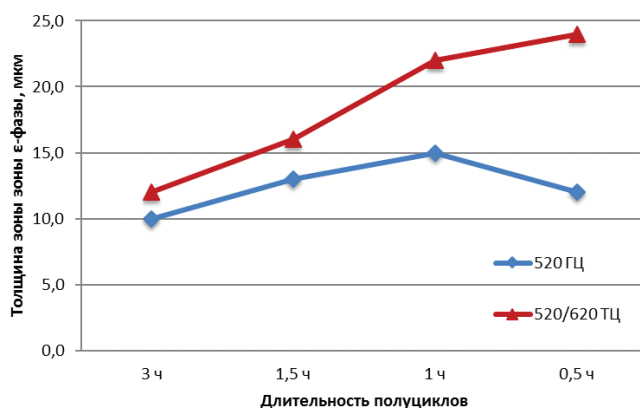


Рис. 5. Влияние длительности полуциклов на толщину зоны ε-фазы при термоциклическом (ТЦ) азотировании в режиме В и газоциклическом (ГЦ) азотировании в режиме С с завершающей стадией азотирования 0,5 ч

При четном числе полуциклов, когда процесс заканчивается стадией отжига (режим А), наблюдается совершенно другой фазовый состав поверхностного слоя (рис. 6). Судя по картине, полученной методом рентгено-фазового анализа (РФА), нитридная зона не является сплошной — это следствие ее рассасывания на стадии отжига в результате внутренней диффузии. Чем больше продолжительность стадии отжига, тем меньшее суммарное количество нитридных фаз остается на поверхности. При продолжительности полуциклов 3 ч ($n = 2$) ε-фаза полностью исчезает.

Установлено, что термоциклическое азотирование увеличивает толщину диффузионного слоя по сравнению с традиционным азотированием и с насыщением в условиях изотермического газоцикла. На рис. 2 видно, что рост азотированного слоя происходит за счет увеличения толщины зоны внутреннего азотирования. Режим циклического азотирования, при котором завершающей стадией является насыщение при повышенном азотном потенциале, обеспечивает наибольший прирост слоя. По сравнению с традиционным азотированием в аммиаке толщина зоны внутреннего азотирования в армко-железе при ХТО в режиме В увеличивается от 400 мкм до 1100 мкм в зависимости от длительности полуциклов (рис. 7).

Механизм ускорения роста азотированного слоя при циклической смене температур выше и ниже эвтектоидной основан на протекании фазовых превращений. При переходе от стадии отжига с температурой 620 °С к стадии азотирования с температурой 520 °С в некоторых учас-

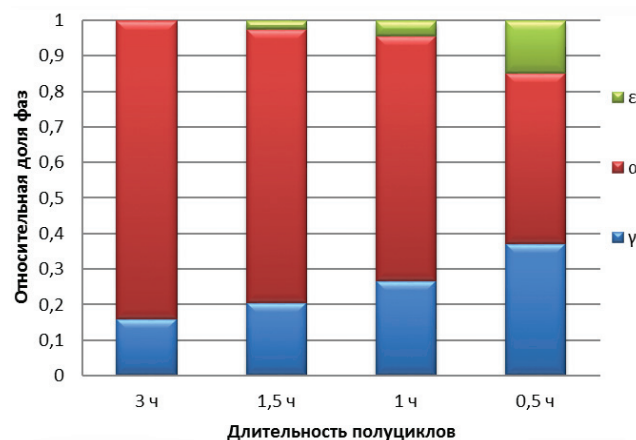


Рис. 6. Относительная доля фаз на поверхности армко-железа при термоциклическом азотировании в режиме А (с завершающей стадией отжига) при различной длительности полуциклов

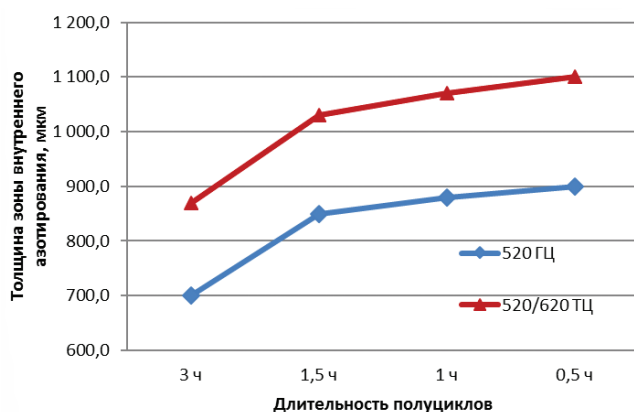
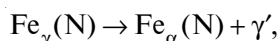


Рис. 7. Влияние длительности полуциклов на толщину зоны внутреннего азотирования при термоциклическом (ТЦ) азотировании в режиме В и газоциклическом (ГЦ) азотировании в режиме С с завершающей стадией азотирования 0,5 ч

тках слоя происходит эвтектоидное превращение азотистого аустенита в перлит:



которое сопровождается увеличением объема, что способствует интенсивному оттоку поступающего азота от поверхности. Кроме того, измельчение зерна активизирует диффузию азота по границам зерен. Анализ профилей концентрации азота по глубине показывает, что толщина участка с повышенной концентрацией азота значительно увеличивается по сравнению с толщиной этой зоны при азотировании в проточном аммиаке. После термоциклического азотирования максимальная концентрация азота, определяемая по интенсивности пиков характеристического излучения, составляет 12% N (по массе) по сравнению с 8,5% N (по массе) после традиционного процесса.

Количество полуциклов и их длительность являются основными факторами, определяющими степень интенсификации процесса азотирования. Как при газоциклических, так и при термоциклических процессах с увеличением числа коротких полуциклов толщина зоны внутреннего азотирования растет (см. рис. 7). В результате термоциклического процесса в режиме В с количеством полуциклов $n = 12+1$ и их продолжительностью по 0,5 часа общая толщина азотированного слоя увеличивается почти в три раза по сравнению с обычным азотированием в проточном аммиаке.

Увеличение толщины зоны внутреннего азотирования при большом числе циклов малой

длительности объясняется эффектом закачивания азота вглубь металла при многократном повторении процессов образования и рассасывания при внутренней диффузии ϵ -фазы. Наличие внутренней диффузии подтверждается тем, что проведение стадии отжига уменьшает толщину зоны ϵ -фазы. Диссоциация нитридов приводит к высвобождению активного азота, а создаваемый градиент концентраций азота на границе нитридной зоны и зоны внутреннего азотирования становится движущей силой для его продвижения в глубь металла.

Таким образом, исследования показали, что фазовый состав диффузионного слоя регулируется режимами проведения термоциклического процесса, а именно типом завершающей стадии.

Процессы, заканчивающиеся стадией отжига (режим А), благодаря внутренней диффузии позволяют получить азотированный слой, состоящий либо только из зоны внутреннего азотирования, либо из зоны внутреннего азотирования и поверхностной нитридной зоны на базе γ' -нитридов.

Проведение последующей стадии азотирования вновь приводит к формированию ϵ -фазы, причем чем выше степень рассасывания нитридной зоны на стадии внутренней диффузии, тем интенсивнее рост нитридной зоны на завершающей стадии в режиме В. Для ускоренного формирования слоев с развитой зоной ϵ -фазы наиболее эффективными являются процессы с большим числом полуциклов малой длительности (0,5...1 ч), завершающиеся азотированием в течение 0,5 ч.

Результаты исследований на модельном материале (армко-железе) позволяют сделать рациональный выбор типа циклического процесса и его параметров при азотировании конкретных деталей для формирования требуемого сочетания фаз с целью получения заданных свойств стальной поверхности.

Выводы

1. Варианты термоциклической химико-термической обработки с чередованием процессов азотирования и отжига при температурах ниже и выше эвтектоидной в системе Fe-N могут быть применены для регулирования фазового состава азотированных слоев в железе и сталях. Процессы, различающиеся типом завершающей стадии термоцикла (азотирование или отжиг), позволяют получать диффузионные слои различного

фазового состава: либо с развитой нитридной зоной, либо на базе зоны внутреннего азотирования.

2. Эффект интенсификации насыщения железа азотом при термоциклическом азотировании проявляется в значительном увеличении толщины зоны внутреннего азотирования по сравнению с ее толщиной, достигающей при традиционном азотировании в аммиаке. Толщина диффузионного слоя увеличивается в наибольшей степени при большом количестве циклов малой длительности.

Список источников

1. *Лахтин Ю.М., Коган Я.Д.* Структура и прочность азотированных сплавов / Сер. под общ. ред. М.Л. Бернштейна, И.И. Новикова. – М.: Металлургия, 1982. – 175 с.
2. *Сыропятов В.Я., Зинченко В.М., Перекаатов Ю.А.* Современная концепция азотного потенциала // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 1(583). С. 7-12.
3. *Ergun M., Balbasi M.* Mathematical model for pitting potential of Fe 16% chromium steel // *Corrosion Science*. 1994. Vol. 36. No. 9, pp. 1569-1574. DOI: 10.1016/0010-938X(94)90053-1
4. *Белашова И.С., Шашков А.О.* Кинетика роста диффузионного слоя при термогазоциклическом способе азотирования // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2012. № 6(684). С. 46-50.
5. *Прокофьев М.В., Петрова Л.Г., Белашова И.С., Бибиков П.С.* Влияние стадийного азотирования на строение и свойства мартенситной стали 13X11H2B2MФ // *Научные технологии в машиностроении*. 2021. № 12(126). С. 12-19. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-12-12-19
6. *Зинченко В.М.* Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 303 с.
7. *Lerche W., Spengler A., Böhmer S.* Kurzzeitgasnitrieren, Verfahren und Ergebnisse. – Leipzig: Dt. Verl. fuer Grundstoffindustrie, 1976. – 116 s.
8. *Site Shen, Changyao Tan.* The development of new process for PS-P fast gas nitriding // 7th International Congress on Heat Treatment and Technology of Surface Coatings (11–14 December 1990; Moscow, Russia). 1990. Vol. 1, pp. 162 – 168.
9. *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. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10
10. *Лесин С.В.* Кинетика формирования диффузионного слоя на стали ВНС-40 (05X12H2K3M2AФ) при газоциклическом азотировании в многокомпонентной газовой атмосфере // *Вестник Саратовского госагроуниверситета им. Н.И. Вавилова*. 2006. № 4-2. С. 39-42.
11. *Шестопалова Л.П., Александров В.А.* Влияние циклического оксиазотирования на технические характеристики конструкционных легированных сталей // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2018. Т. 14. № 5(161). С. 220-224.
12. *Петрова Л.Г., Александров В.А., Сергеева А.С.* Электрический разряд как технологический фактор интенсификации процессов химико-термической обработки изделий машиностроения // *Научные технологии в машиностроении*. 2019. № 12 (102). С. 36-43. DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-36-43
13. *Belashova I.S., Bibikov P.S., Orekhov A.A., Starovoitov E.I.* Controlled thermogasocyclic nitriding processes // *INCAS BULLETIN*. 2021. Vol. 13, Special Issue, pp. 13–20. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.2
14. *Белашова И.С., Бибиков П.С., Прокофьев М.В.* Особенности технологии азотирования высоколегированных коррозионноустойчивых сталей авиационного назначения // *Вестник Московского авиационного института*. 2021. Т. 28. № 2. С. 206-215. DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215
15. *Петрова Л.Г., Сергеева А.С.* Контроль фазового состава аустенитных сталей при поверхностном упрочнении методом высокотемпературного азотирования // *Научные технологии в машиностроении*. 2020. № 6(108). С. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-6-3-11
16. *Будилов В.В., Агзамов Р.Д., Рамазанов К.Н.* Ионное азотирование в тлеющем разряде с эффектом полого катода // *Металловедение и термическая обработка металлов*. 2007. № 7 (625). С. 33-36.
17. *Чудина О.В.* Создание модифицированных упрочненных слоев на поверхности сталей методами лазерной и химико-термической обработки // *Главный механик*. 2019. № 6. С. 46-54.
18. *Александров В.А., Казанцев В.Ф., Фатюхин Д.С.* Формирование поверхностного слоя методом комплексного ультразвукового воздействия и азотирования // *Научные технологии в машиностроении*. 2013. № 3 (21). С. 33-36.
19. *Перекрестов А.Е., Малахов А.Ю., Александров В.А.* Каталитический эффект предварительно нанесенной окисленной пленки медь-полимера на процесс низкотемпературного азотирования стали 38X2MЮА // *Modern Science*. 2020. № 2-2. С. 334-341.
20. *Гурьев А.М., Ворошин Л.Г., Хараев Ю.П. и др.* Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей // *Ползуновский вестник*. 2005. № 2-2. С. 36-43.

References

1. Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D. *Struktura i prochnost' azotirovannykh splavov* (Structure and strength of nitrated alloys), Moscow, Metallurgiya, 1982, 175 p.
2. Syropyatov V.Ya., Zinchenko V.M., Perekatov Yu.A. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 1(583), pp. 7-12.
3. Ergun M., Balbasi M. Mathematical model for pitting potential of Fe 16% chromium steel. *Corrosion Science*, 1994, vol. 36, no. 9, pp. 1569-1574. DOI: 10.1016/0010-938X(94)90053-1
4. Belashova I.S., Shashkov A.O. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 6(684), pp. 46-50.
5. Prokofev M., Petrova L., Belashova I., Bibikov P. The effect of stadial nitrogenization on the structure and properties of martensitic steel 13X11N2V2MF. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2021, vol. 2021, no. 12(126), pp. 12-19. DOI: 10.30987/2223-4608-2021-12-12-19
6. Zinchenko V.M. *Inzheneriya poverkhnosti zubchatykh koles metodami khimiko-termicheskoi obrabotki* (Surface engineering of gears by chemical-thermal treatment methods), Moscow, MGTU im. N.E. Baumana, 2001, 303 p.
7. Lerche W., Spengler A., Böhmer S. *Kurzzeitgasnitrieren, Verfahren und Ergebnisse*. Leipzig, Dt. Verl. fuer Grundstoffindustrie, 1976, 116 s.
8. Site Shen, Changyao Tan. The development of new process for PS-P fast gas nitriding. *7th International Congress on Heat Treatment and Technology of Surface Coatings (11–14 December 1990; Moscow, Russia)*, 1990, vol. 1, pp. 162 – 168.
9. Belashova I., Petrova L., Brezhnev A. Structure and properties of composite layers by means of cvd coating annealing on tool steel. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2022, vol. 2022, no. 2(128), pp. 3-10. DOI: 10.30987/2223-4608-2022-1-3-10
10. Lesin S.V. *Vestnik Saratovskogo gosagrouniversiteta im. N.I. Vavilova*, 2006, no. 4-2, pp. 39-42.
11. Shestopalova L.P., Aleksandrov V.A. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*, 2018, vol. 14, no. 5(161), pp. 220-224.
12. Petrova L., Alexandrov V., Sergeeva A. Electric discharge as technological factor of intensification of chemical-thermal treatment of engineering products. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2019, vol. 2019, no. 12(102), pp. 36-43. DOI: 10.30987/2223-4608-2019-2019-12-36-43
13. Belashova I.S., Bibikov P.S., Orekhov A.A., Starovoitov E.I. Controlled thermogasocyclic nitriding processes. *INCAS BULLETIN*, 2021, vol. 13, Special Issue, pp. 13–20. DOI: 10.13111/2066-8201.2021.13.S.2
14. Bibikov P.S., Belashova I.S., Prokofev M.V. Nitridation technology specifics of high-alloy corrosion-resistant steels of aviation purposes. *Aerospace MAI Journal*, 2021, vol. 28, no. 2, pp. 206-215. DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215
15. Petrova L., Sergeeva A. Phase structure control in austenite steels during surface strengthening by high-temperature nitride hardening. *Science intensive technologies in mechanical engineering*, 2020, no. 6(108), pp. 3-11. DOI: 10.30987/2223-4608-2020-6-3-11
16. Budilov V.V., Agzamov R.D., Ramazanov K.N. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2007, no. 7 (625), pp. 33-36.
17. Chudina O.V. *Glavnyi mekhanik*, 2019, no. 6, pp. 46-54.
18. Aleksandrov V.A., Kazantsev V.F., Fatyukhin D.S. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii*, 2013, no. 3(21), pp. 33-36.
19. Perekrestov A.E., Malakhov A.Yu., Aleksandrov V.A. *Modern Science*, 2020, no. 2-2, pp. 334-341.
20. Gur'ev A.M., Voroshnin L.G., Kharaev Yu.P. et al. *Polzunovskii vestnik*, 2005, no. 2-2, pp. 36-43.

Статья поступила в редакцию 12.03.2022; одобрена после рецензирования 26.03.2022; принята к публикации 26.03.2022.

The article was submitted on 12.03.2022; approved after reviewing on 26.03.2022; accepted for publication on 26.03.2022.

Редакторы *М.С. Винниченко, Е.Л. Мочина*
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 07.04.2022. Подписано в печать 17.06.2022.
Бумага писчая. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.
Усл. печ. л. 28,60. Уч.-изд. л. 30,75. Тираж 105 экз. Заказ 195/1052.
Цена договорная.

Издательство МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993
Типография Издательства МАИ
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993