

УДК 621.785.532

DOI: 10.34759/vst-2021-2-206-215

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ АЗОТИРОВАНИЯ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ КОРРОЗИОННО-СТОЙКИХ СТАЛЕЙ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Бибиков П.С.^{1*}, Белашова И.С.^{2**}, Прокофьев М.В.^{1***}

¹ *Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ,
Волоколамское шоссе, 4, Москва, 125993, Россия*

² *Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
Ленинградский проспект, 64, Москва, 125319, Россия*

* e-mail: bpetrserg@gmail.com

** e-mail: irina455@inbox.ru

*** e-mail: mikepro1953@rambler.ru

Статья поступила в редакцию 29.03.2021

Статья посвящена новому методу газового азотирования, позволяющему получать качественные диффузионные слои, отвечающие требованиям эксплуатации изделий, работающих в жестких условиях резких изменений температур и больших знакопеременных нагрузок, в частности деталей авиационного назначения. Метод заключается в комбинации различных температурных режимов при изменении концентрации аммиака и воздуха в рабочей части печи. Преимуществом предлагаемого метода перед традиционным азотированием является отсутствие депассиваторов, возможность азотирования поверхностей со сложной геометрией, а также использование недорогого, но качественного отечественного оборудования для проведения процессов. Азотированные слои при этом имеют оптимальное распределение твердости по толщине, позволяющее избежать высокой хрупкости слоя и, как следствие, эксплуатационных трещин.

Ключевые слова: газовое азотирование, микроциклирование, депассивация, термоциклирование, азотный потенциал.

Введение

Среди технологий поверхностного упрочнения азотирование занимает достойное третье место по распространению после обычной печной закалки и цементации. Азотированию как альтернативному процессу цементации подвергается широкая номенклатура деталей авиационного производства

— ведущие шестерни, обоймы, ведомый и ведущий валы, валики, корончатые и венцовые колеса, шлицевые втулки, валы компрессора низкого давления (КНД), сферы, поршни, сухари, цапфы, оси, пальцы и др. Для таких и аналогичных деталей из сложнолегированных жаропрочных сталей традиционно применяли цементацию, но

при цементации до сих пор не разработаны управление и регулирование фазового состава и структуры поверхности. Не совершенна и сама структура термического производства цементации, выполняемого в многоцикловом режиме, требующем многократного поступления деталей в термический цех, что приводит к разрыву технологического маршрута и удлинению процесса. А жесткие условия эксплуатации деталей современной авиации требуют сочетания свойств поверхности с учетом механизмов износа, коррозионного, контактного и усталостного разрушения. Для этого необходимы процессы, позволяющие регулировать структуру и получать различный фазовый состав поверхности изделий. Такое регулирование структуры позволяют делать именно технологии азотирования [1]. Популярность азотирования обусловлена его неоспоримыми преимуществами перед цементацией и другими способами химико-термической обработки: низкие температуры процесса, возможность обработки широкого спектра материалов, а также возможность в широких пределах регулировать фазовый состав и строение диффузионного слоя, что обеспечивает достижение необходимого в каждом конкретном случае комплекса свойств — твердости, износостойкости, коррозионной стойкости, противозадирных свойств, усталостной прочности, хладноломкости и др., который нельзя получить ни при каких других видах химико-термической обработки [2—4].

В соответствии с мировой тенденцией на авиационных предприятиях проводятся работы по техническому переоснащению термического производства, предусматривающие применение современного термического оборудования для процессов ионно-плазменного азотирования, которое декларируется как наиболее прогрессивный и современный метод поверхностного упрочнения. Безусловно, данная технология имеет ряд достоинств и позволяет уверенно проводить азотирование наружных поверхностей деталей с заданной толщиной слоя, фазовым составом и твердостью [5]. Однако такой метод тоже не универсален: проблемой ионно-плазменного азотирования является сложность, а иногда и невозможность азотирования внутренних поверхностей деталей, тонких каналов плунжерных пар, распылителей и др. При этом оборудование для ионно-плазменного азотирования является дорогим и наиболее сложным конструктивно, требующим для обслуживания специалистов высокого уровня. Немаловажен и тот факт, что оборудование для ионно-плазмен-

ного азотирования в основном — иностранного производства.

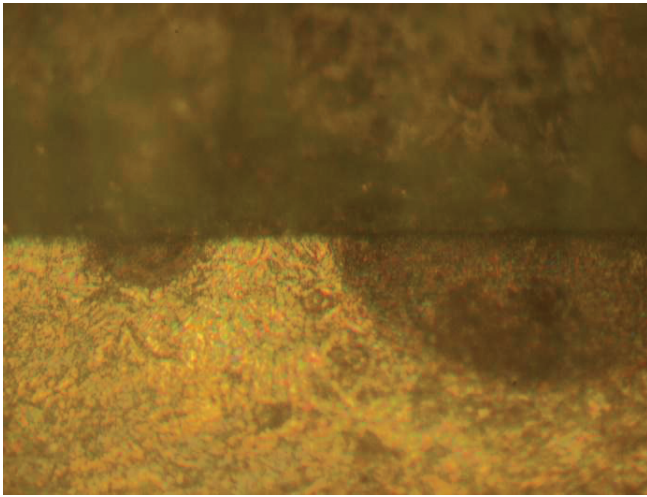
Поэтому в настоящее время широкое распространение получило *газовое азотирование в отечественных электрических шахтных печах сопротивления*. Совершенствование технологий газового печного азотирования позволило интенсифицировать процессы, и по скорости формирования азотированного слоя, по регулированию фазового состава и качеству получаемых диффузионных слоев они не уступают процессам ионно-плазменного азотирования. Это стало возможным за счет использования многокомпонентных атмосфер, катализаторов, термоциклирования и других технологических приемов [6—9]. Кроме того, стоимость самого оборудования для печного азотирования и его эксплуатация в два—три раза, а иногда и на порядок ниже импортного для ионно-плазменного азотирования.

Постановка задачи

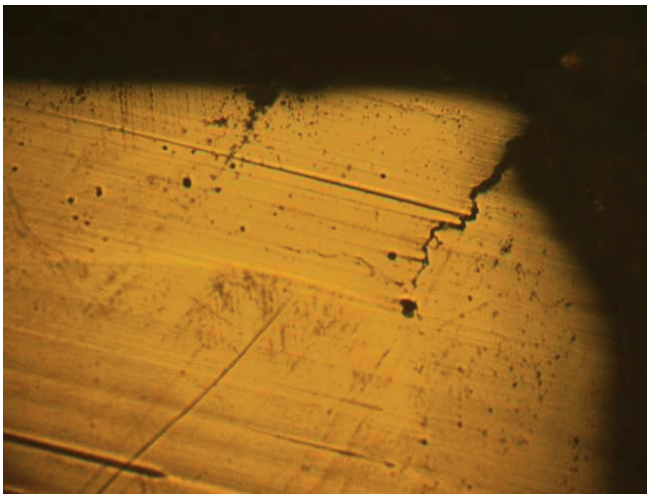
При проведении некоторых работ по заказу промышленных авиационных предприятий авторам часто приходилось сталкиваться с различными дефектами, получаемыми после классического азотирования в аммиаке: в одних случаях на поверхности детали формировался неравномерный диффузионный слой — «капельный» слой, являющийся браком в готовых деталях, при этом волнистость не исчезала даже с течением времени (рис. 1,а). В других случаях образовывалась трещина в подслое, видимо, из-за большого перепада твердости между азотированным слоем и основным металлом, приводящая к отслаиванию слоя при эксплуатации в условиях низких температур (рис. 1,б). В некоторых случаях отмечался так называемый «краевой эффект» — повышенная хрупкость поверхностного слоя из-за образования высокоазотистой нитридной зоны большой толщины, следствием которой являются многочисленные микротрещины (рис. 1,б,в).

Не меньшая проблема — воспроизводимость качественного, сплошного слоя при азотировании в условиях серийного промышленного производства, что является решающим фактором применения той или иной технологии.

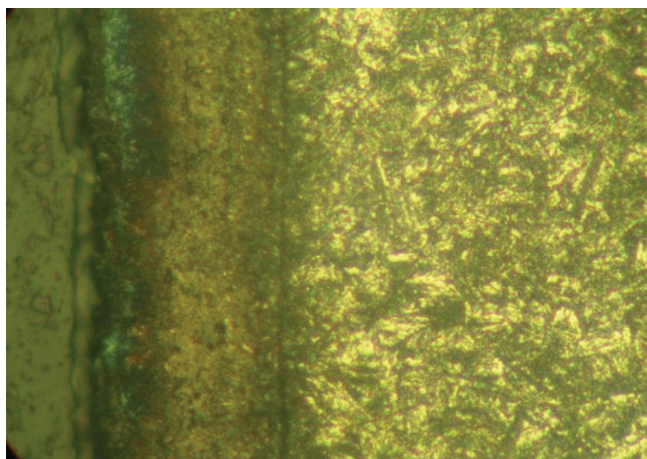
С учетом вышесказанного **целью** представленных исследований является разработка оптимального метода азотирования, позволяющего получать на высоколегированных сталях авиационного назначения качественные диффузионные слои, *отвечающие требованиям эксплуатации и заказчика*.



а)



б)



в)

Рис. 1. Вид капельного слоя на поверхности азотированного изделия (а); сформировавшаяся сплошная трещина в зоне перехода от азотированного слоя к матрице (б); микротрещины на границе раздела покрытие—основа (в)

Исследовалась высоколегированная сталь ВНС-17 (03X11H10M2T-ВД). Данная сталь может рассматриваться как типовая, часто применяемая в различных изделиях авиационного агрегатостроения. В частности, она используется в изготовлении деталей основного производства газотурбинных двигателей, таких как ведущие шестерни, обойма, ведомый и ведущий валы, корончатые и венцовые колеса и др.

Процессы газового азотирования проводили на шахтной печи, обустроенной установкой управления газонапуска Н1А (производитель ООО «НПП «Нитрид», РФ, г. Саратов). Все процессы химико-термической обработки, проводимые на данном оборудовании, регистрировались и архивировались на компьютер с помощью программы «Need for data» и выводились в виде диаграммы «температура-время». Для равномерного распределения температур в рабочем пространстве шахтные печи делают многозонными. Исследование проводилось в печи с двумя зонами. Контроль и управление температурой на нагревателях вели термомпарами на верхней и нижней зонах. Из-за подстуживания верхней зоны за счет теплоотвода через крышку муфеля температура на нагревателях верхней зоны поддерживалась выше, чем на нижней, на 20—25 °С. В этом случае колебания температуры по высоте муфеля не превышают ± 5 °С.

Температура процесса азотирования поддерживалась в диапазоне от 510 до 580 °С.

С целью интенсификации процесса диффузионного насыщения на различных этапах изменяли активность насыщающей атмосферы за счет подачи воздуха в рабочее пространство муфеля. Изменяя соотношение концентраций воздуха и аммиака, изменяли азотный потенциал атмосферы [10]. Исследуемые концентрации воздуха составляли 50 и 60% по объему.

Подача воздуха проходила циклически, вызывая тем самым микроциклирование температуры в печи. Резкий подъем температуры обусловлен связыванием водорода, находящегося в насыщающей атмосфере печи [11, 12].

Результаты

Для решения вышеперечисленных проблем, возникающих при традиционном азотировании данного класса сталей, была разработана и предложена технология 3-стадийного процесса насыщения (рис. 2).

Первая стадия обеспечивает восстановление и создание сплошной азотированной поверхности,

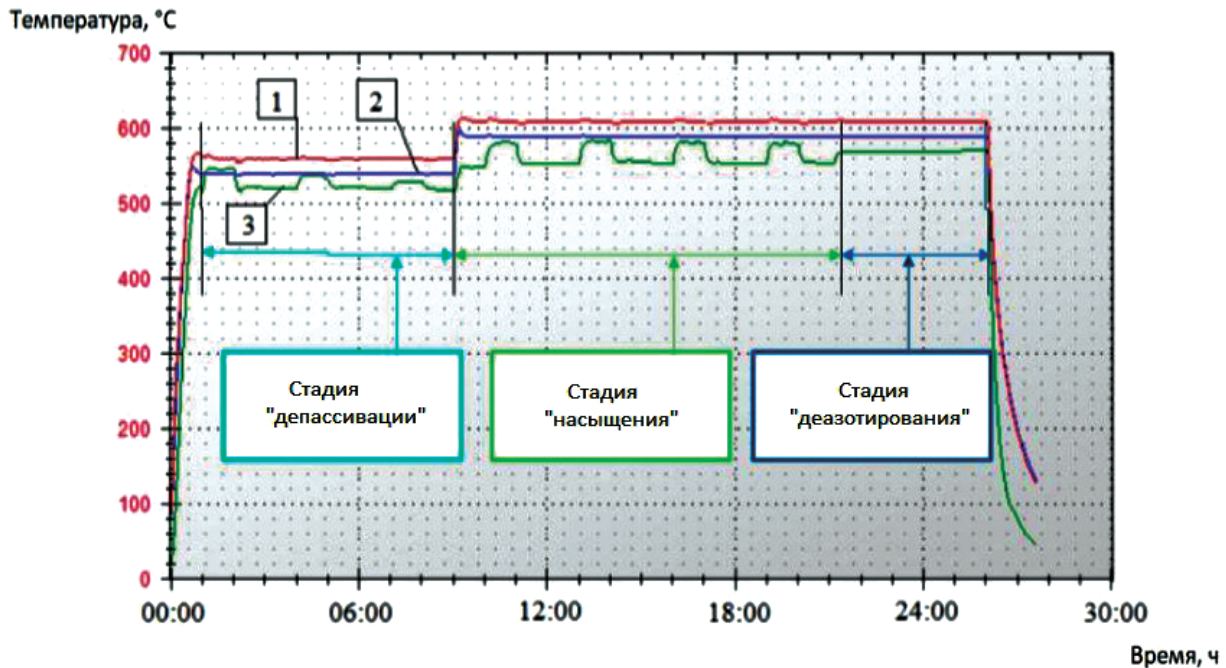


Рис 2. Диаграмма 3-стадийного процесса азотирования в аммиаке с добавками воздуха: 1 — температура в верхней зоне; 2 — температура в нижней зоне; 3 — температура в контейнере

через которую азот интенсивно поглощается металлом. Высокий азотный потенциал P_N атмосферы, выражающийся отношением парциальных давлений аммиака к водороду $P_{NH_3}/P^{1/2}_{H_2}$, получается, во-первых, за счёт снижения степени диссоциации аммиака при пониженной температуре, а также за счёт связывания кислорода воздуха с водородом, образующимся при распаде аммиака. Эти процессы обеспечивают формирование на поверхности сплошного азотированного слоя, дальнейший рост которого приводит к снижению скорости насыщения [13, 14].

Вторая стадия выдержки проводится при нагреве до температуры 550–600 °С. Продолжительность второй стадии определяется требуемой толщиной диффузионной зоны. Вторую выдержку проводят в потоке аммиака циклическими добавками воздуха не менее трех часов. На второй стадии за счёт повышения температуры увеличивается скорость диффузии азота в поверхность изделия. Конкретные температура и время процесса азотирования определяются исходя из заданных требований к толщине и фазовому составу азотированного слоя [14].

Резкий подъем температуры может быть связан с экзотермической реакцией связывания водорода и кислорода, находящегося в рабочей атмосфере. Диссоциация аммиака происходит ката-

литически на стальных поверхностях деталей и конструкции контейнера [15].

Как следствие предполагается, что температура в поверхностном слое является существенно большей, чем общий прогрев массивной садки, что обеспечивает увеличение концентрации азота в поверхностном слое.

Третья стадия азотирования проводилась также при температуре 550–600 °С, в атмосфере чистого аммиака, не менее двух часов, со степенью диссоциации на уровне 70–90%. Такая низкая активность насыщающей атмосферы не позволяет проходить процессу насыщения, но и препятствует диффузии азота с поверхности в рабочую часть печи, т.е. деазотированию, сохраняя концентрацию азота в поверхностном слое высокой. В этом случае сам поверхностный слой становится источником азота, за счёт градиента концентраций происходит отток азота вглубь металла и снижение его концентрации на поверхности [13, 15].

В рамках проведенного РФА-анализа (рис. 3 и 4) видна важность проведения процесса азотирования со стадией деазотирования в атмосфере чистого аммиака.

Как следует из рис. 4, при введении дополнительного деазотирования азотированного слоя образуется низкоазотистая зона, состоящая из Fe_3N , Fe_4N , с повышенной пластичностью и отсутствием склонности к трещинообразованию (рис. 5 и 7).

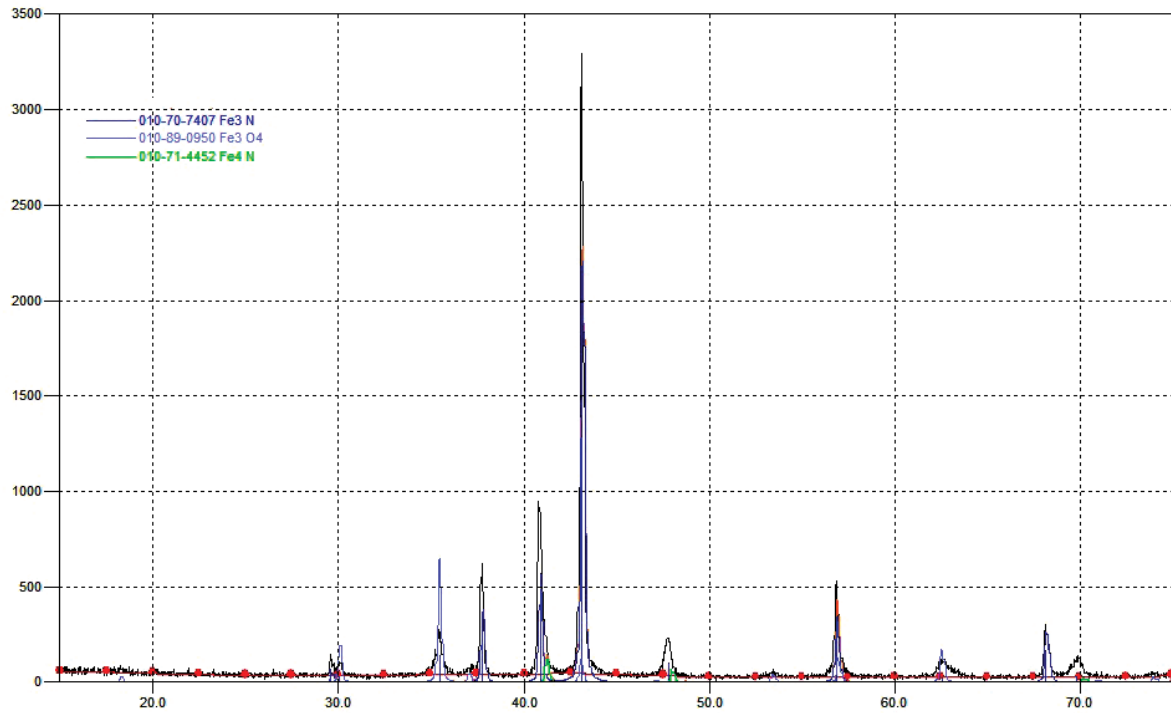


Рис. 3. Рентгенограмма стали марки ВНС-17 (03X11N10M2Т-ВД) при азотировании в атмосфере аммиака с добавками воздуха

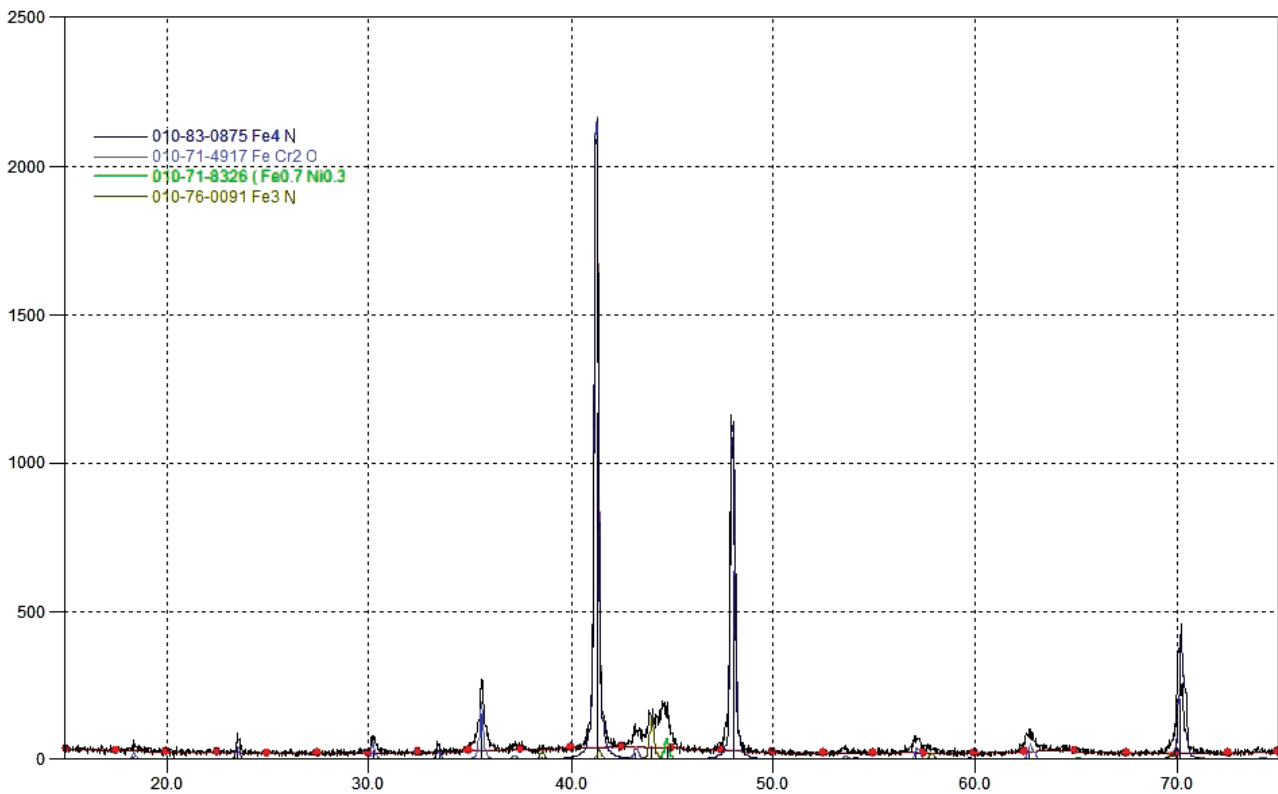


Рис. 4. Рентгенограмма стали марки ВНС-17 (03X11N10M2Т-ВД) в атмосфере аммиака с добавками воздуха, с заключительной стадией азотирования (деазотирования) в чистом аммиаке

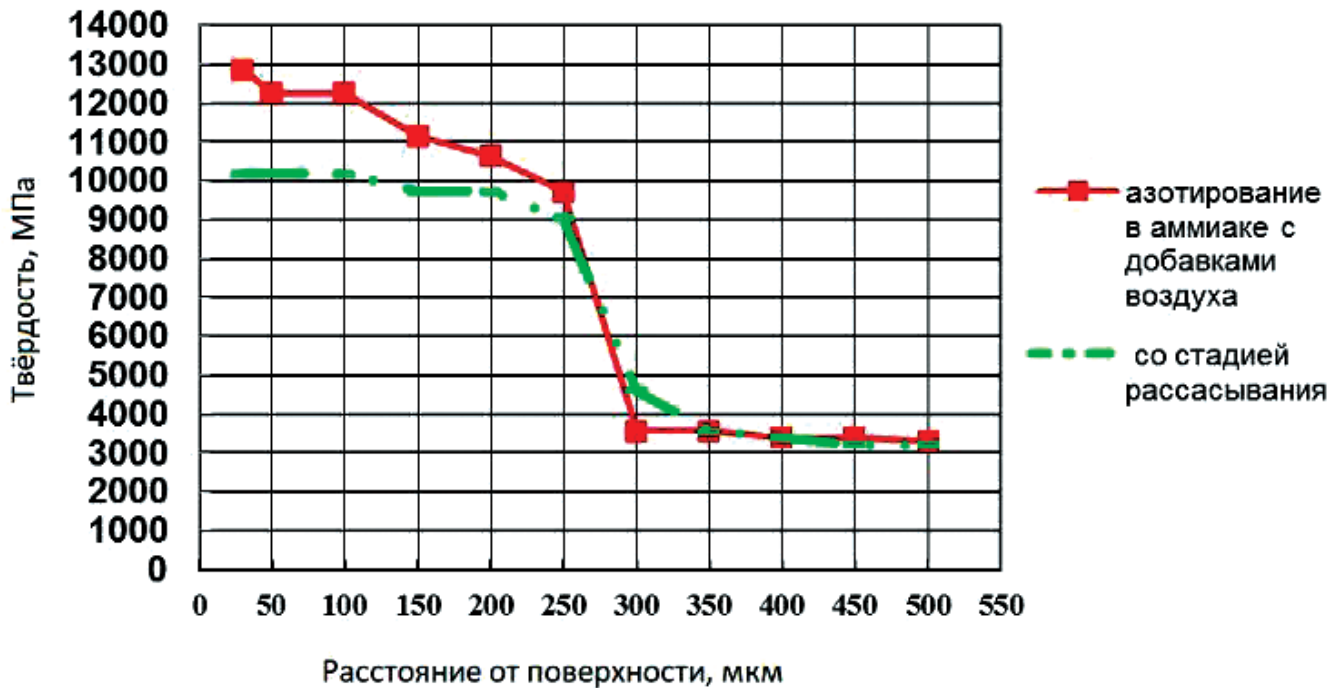


Рис. 5. Распределение микротвердости после азотирования стали ВНС-17 (03X11H10M2T-ВД)

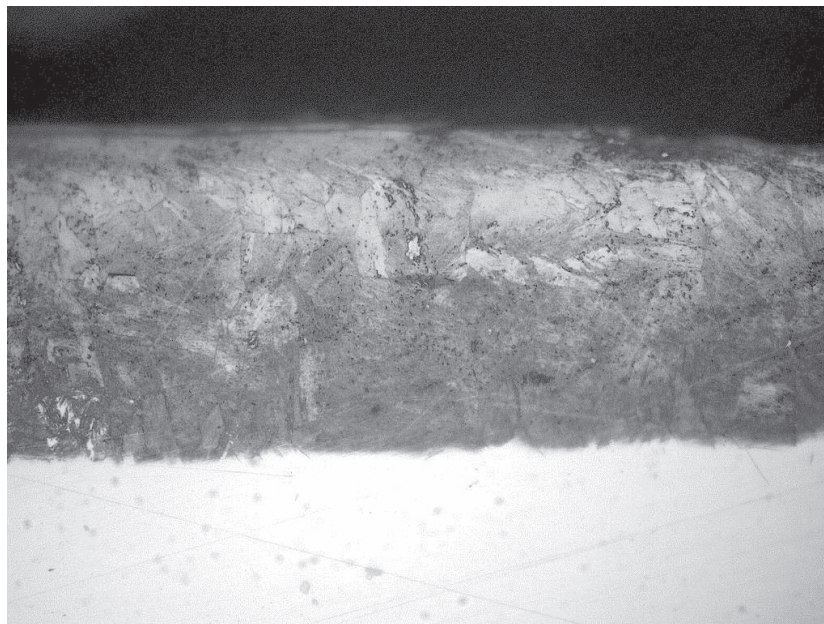


Рис. 6. Микроструктура стали марки ВНС-17 (03X11H10M2T-ВД) при азотировании в рамках 2-стадийного процесса (1 стадия – 3 ч, 2 стадия – 9 ч)

Основываясь на данных РФА-анализа, можно отметить, что на стали ВНС-17 при азотировании без стадии деазотирования (см. рис. 3) имеет место высокое содержание оксидов железа, что приводит к образованию слоистой нитридной зоны, состоящей из нитридов и оксидов железа, и как следствие к высокой твердости (см. рис. 5), хруп-

кости и дополнительному образованию микротрещин в слое (рис. 6) [16].

С целью исследования возможного изменения и, в частности, снижения коррозионной стойкости данной коррозионно-стойкой стали, которое крайне нежелательно, были проведены электрохимические измерения и получены вольт-ампер-

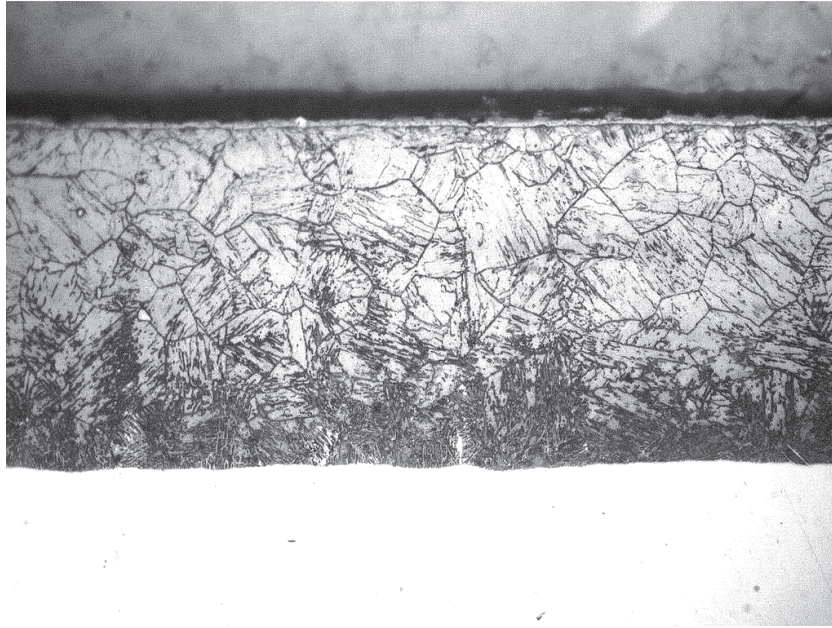


Рис. 7. Микроструктура стали марки ВНС-17 (03X11Н10М2Т-ВД) при азотировании в рамках 3-стадийного процесса (1 стадия – 3 ч, 2 стадия – 6 ч, 3 стадия – 3 ч)

ные характеристики (рис. 8). Работы проводились в электрохимической ячейке с помощью потенциостата ИРС-2000, интегрированного с персональным компьютером [17–18]. Вольт-амперные кривые снимались при одинаковой скорости развертки потенциала: 2 мВ/с. Площадь электрода: 1 см² (электроды круглые).

Образцы, обработанные по предлагаемому методу, сравнивались с образцами после традиционного, широко применяемого азотирования, после которого, как известно, коррозионная стойкость несколько снижается [19]. Из графиков тоже наблюдается снижение коррозионной стойкости в обоих случаях: происходит связывание хрома и

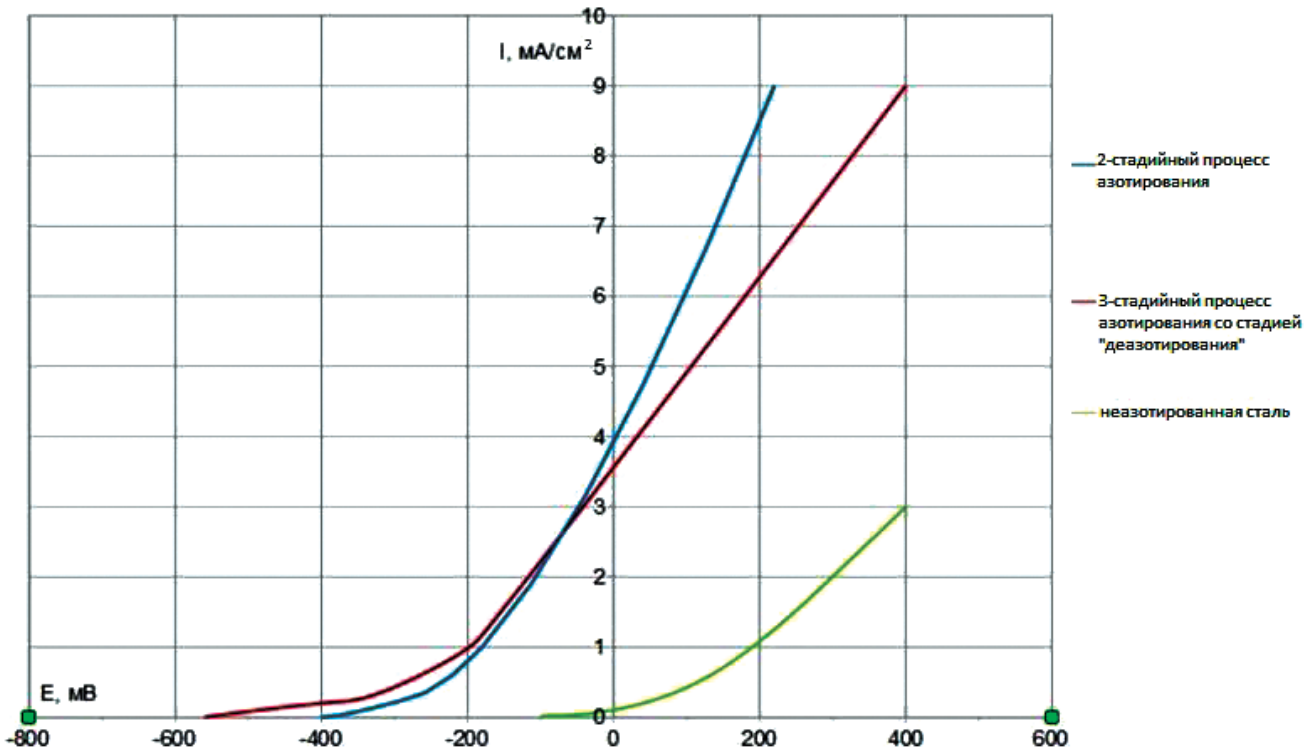


Рис. 8. Исследование коррозионной стойкости стали ВНС-17 электрохимическим методом

уменьшение его количества в твердом растворе, но при этом падение коррозионной стойкости различно. Так, в случае 2-стадийной технологии без заключительной стадии азотирования коррозионное разрушение начинается позже, но с течением времени скорость коррозии значительно увеличивается относительно 3-стадийного процесса. Так, при тех же значениях стационарного потенциала 200 мВ мы наблюдаем серьезную разницу изменений силы тока, что может быть связано с уменьшением концентрации азота в ϵ -фазе [20]. Исследования коррозионной стойкости показывают еще одно преимущество предлагаемой технологии азотирования перед традиционной.

Выводы

Предложен метод газового азотирования, позволивший решить задачу устранения брака авиационных деталей в виде неравномерного слоя, сколов, трещин и микротрещин поверхности, состоящий из трех стадий, первые две из которых являются процессами насыщения поверхности азотом до получения высокоазотистой нитридной зоны с высокой твердостью, а последняя является стадией, при которой происходит *перераспределение азота и отток* его вглубь металла, при этом, как известно [1, 2], идет фазовое превращение $\epsilon \rightarrow \gamma'$ (стадия деазотирования) и образование менее твердой и более пластичной γ' -фазы. Разработаны режимы азотирования третьей стадии, заключающиеся в том, что процесс следует проводить в атмосфере чистого аммиака при низкой активности насыщающей атмосферы в течение трех-шести часов. Такой режим определяет высокий азотный потенциал насыщающей атмосферы и ее низкую насыщающую способность, что практически прекращает диффузию азота из внешней среды, «заставляя» азот перераспределяться в толщине поверхности. Установлено, что при проведении трехстадийного азотирования по сравнению с двухстадийным, без стадии деазотирования: снижается износ образцов при испытании в условиях трения скольжения незначительно, но повышается коррозионная стойкость обрабатываемой стали.

Библиографический список

1. *Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шнис Г.И., Бёмер З.* Теория и технология азотирования. — М.: Металлургия; Лейпциг: Deutscher Verl. für Grundstoffindustrie, 1991. — 318 с.
2. *Лахтин Ю.М., Коган Я.Д.* Азотирование стали. — М.: Машиностроение, 1976. — 256 с.
3. *Арзамасов Б.Н.* Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. — М.: Машиностроение, 1979. — 224 с.
4. *Lakhtin Yu.M.* Diffusion fundamentals of nitriding // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 1995. № 7. С.14-17.
5. *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.
6. *Belashova I.S., Bibikov P.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S.* New nitriding process of high-alloyed maraging steel for cryogenic operation // *International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (17th September 2020, Novosibirsk, Russian Federation).* Vol. 1064, 012004.
7. *Гурьев А.М., Ворошнин Л.Г., Хараев Ю.П.* и др. Термоциклическое и химико-термоциклическое упрочнение сталей // *Ползуновский вестник.* 2005. № 2-2. С. 36-43.
8. *Петрова Л.Г., Белашова И.С., Александров В.А., Демин П.Е., Брежнев А.А.* О возможности получения наноструктурированных покрытий на стальных изделиях модифицированием поверхности // *Вестник Московского авиационного института.* 2014. Т. 21. № 2. С. 75-82.
9. *Шашков Д.П., Горячев А.Б.* Газоциклическое азотирование конструкционных сталей // *Технология металлов.* 1998. №3. С. 11-13.
10. *Belashova I.S., Petrova L.G., Aleksandrov V.D., Demin P.E.* Improving the Properties of Low-Alloy and Carbon Steel Tools by Cyclic Nitriding // *Russian Engineering Research.* 2018. Vol. 38. No. 1, pp. 53–56. DOI: 10.3103/S1068798X18010057
11. *Petrova L., Belashova I., Sergeeva A.* Regulation of Phase Composition of Nitrided Layers in Iron and Steel during Thermo-Gas Cyclic Nitriding // *24th IFHTSE CONGRESS 2017 — European Conference on Heat Treatment and Surface Engineering — A3TS Congress (26-29 June 2017; Nice, France),* p. 70.
12. *Анвар Ахмед Ибрагим Халиль.* Азотирование в условиях термогазоциклических воздействий: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАДИ, 1996. — 142 с.
13. *Лахтин Ю.М., Булгач А.А.* Теория химико-термической обработки стали: Учеб. пособие. — М.: Машиностроение, 1982. — 54 с.
14. *Межонов А.Е.* Кинетические закономерности регулируемых процессов азотирования. Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: МАДИ, 1986. — 140 с.
15. *Александров В.А., Грачев А.В., Барабанов С.И.* Совершенствование длительности процесса азотирования коррозионно-стойких сталей // *Металловедение и термическая обработка металлов.* 2011. № 7(673). С. 37-39.
16. *Лесин С.В.* Влияние качества поверхностного слоя деталей после механической обработки на процесс

- формирования заданных свойств при азотировании высоколегированных коррозионно-стойких сталей. Дисс... канд. техн. наук. — Саратов: СГАУ, 2006. — 177 с.
17. *Россина Н.Г., Попов Н.А., Жиликова М.А., Корелин А.В.* Коррозия и защита металлов: В 2 ч. Ч. 1. Методы исследований коррозионных процессов: Учебно-методическое пособие. — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. — 108 с.
 18. *Березовская В.В., Березовский А.В.* Коррозионно-стойкие стали и сплавы: Учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2019. — 244 с.
 19. *Куксенова Л.И., Лантева В.Г., Березина Е.В.* и др. Структура и износостойкость азотированной стали // *Материаловедение и термическая обработка металлов*. 2004. № 1(583). С. 31-35.
 20. *Березина Е.В.* Разработка технологии формирования наноструктурированного азотированного слоя конструкционных сталей для повышения их износостойкости: Дисс. ... канд. техн. наук. — М.: Моск. гос. техн. ун-т им. Н.Э. Баумана, 2007. — 210 с.

NITRIDATION TECHNOLOGY SPECIFICS OF HIGH-ALLOY CORROSION-RESISTANT STEELS OF AVIATION PURPOSES

Bibikov P.S.^{1*}, Belashova I.S.^{2}, Prokof'ev M.V.^{1***}**

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University), MAI,
4, Volokolamskoe shosse, Moscow, 125993, Russia*

² *Moscow State Automobile and Road Technical University (MADI),
64, Leningradsky prospect, Moscow, 125319, Russia*

* e-mail: bpetrserg@gmail.com

** e-mail: irina455@inbox.ru

*** e-mail: mikepro1953@rambler.ru

Abstract

The article is devoted to a new gas nitridation method, which allows obtaining high-quality diffusion layers, meeting the requirements for operation of the products that running under severe conditions of sharp temperature changes and large sign-changing loads, particularly, for aircraft parts. The method consists in a combination of various temperature regimes at the ammonia and air concentration change in the furnace working part.

The authors propose the three-stage technology for the 03Cr11Ni10Mo2Ti steel nitridation. The first state ensures the surface restoration, oxides destruction, and guaranteed nitrided layer creation.

The high activity of the saturating atmosphere is being achieved by reducing the ammonia dissociation degree, as well as air oxygen binding with hydrogen while the ammonia decomposition. These processes ensure forming continuous nitrided layer on the surface. The second stage ensures the passage of intense diffusion processes at a temperature of 550-600°C due to additional thermal cycling when concentration of the working mixture changing.

The second stage duration is being determined by the required thickness of the diffusion zone. In the atmosphere of the pure ammonia, the third stage

allows resolving to a certain extent the hard and brittle high-nitrogen surface layer, which itself becomes the source of nitrogen at the low activity of the saturating atmosphere. Nitrogen reflux inward the metal and reduction of its content on the surface begins herewith. The stage of diffusion allows the phase content changing of the surface, and reduce its brittleness due to the certain hardness decrease and plasticity increase, which excludes micro-cracks appearing on the ready parts, i.e. fulfill the task set by the industry.

Keywords: gas nitridation, micro-cycling, depassivation, thermal cycling, nitrogen potential.

References

1. *Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D., Shpis G.I., Bemmer Z.* *Teoriya i tekhnologiya azotirovaniya* (Theory and technology of nitridation), Moscow - Metallurgiya; Leiptsig - Deutscher Verl. fur Grundstoffindustrie, 1991, 318 p.
2. *Lakhtin Yu.M., Kogan Ya.D.* *Azotirovanie stali* (Nitridation of Steel), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 256 p.
3. *Arzamasov B.N.* *Khimiko-termicheskaya obrabotka metallov v aktivizirovannykh gazovykh sredakh* (Chemical and thermal treatment of metals in activated gas environments), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 224 p.

4. Lakhtin Yu.M. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 1995, no. 7, pp. 14-17.
5. Belashova I.S., Shashkov A.O. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 6(684), pp. 46-50.
6. Belashova I.S., Bibikov P.S., Petrova L.G., Sergeeva A.S. *New nitriding process of high-alloyed maraging steel for cryogenic operation. International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (17 September 2020, Novosibirsk, Russia)*, vol. 1064, 012004.
7. Gur'ev A.M., Voroshnin L.G., Kharaev Yu.P. et al. *Polzunovskii vestnik*, 2005, no. 2-2, pp. 36-43.
8. Petrova L.G., Belashova I.S., Alexandrov V.A., Demin P.E., Brezhnev A.A. The possibility of obtaining of nano-modified layers and coatings on steel products by surface engineering methods. *Aerospace MAI Journal*, 2014, vol. 21, no. 2, pp. 75-82.
9. Shashkov D.P., Goryachev A.B. *Tekhnologiya metallov*, 1998, no. 3, pp. 11-13.
10. Belashova I.S., Petrova L.G., Aleksandrov V.D., Demin P.E. Improving the Properties of Low-Alloy and Carbon Steel Tools by Cyclic Nitriding. *Russian Engineering Research*, 2018, vol. 38, no. 1, pp. 53-56. DOI: 10.3103/S1068798X18010057
11. Petrova L., Belashova I., Sergeeva A. Regulation of Phase Composition of Nitrided Layers in Iron and Steel during Thermo-Gas Cyclic Nitriding. *24th IFHTSE CONGRESS 2017 - European Conference on Heat Treatment and Surface Engineering - A3TS Congress (26-29 June 2017; Nice, France)*, p. 70.
12. Anvar A.I.K. *Azotirovanie v usloviyakh termogazotsiklicheskikh vozdeistvii* (Nitridation under conditions of thermo-gas-cyclic effects). Doctor's thesis, Moscow, MADI, 1996, 142 p.
13. Lakhtin Yu.M., Bulgach A.A. *Teoriya khimiko-termicheskoi obrabotki stali* (Theory of steel chemical heat treatment), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 54 p.
14. Mezhonov A.E. *Kineticheskie zakonomernosti reguliruemyykh protsessov azotirovaniya* (Kinetic patterns of regulated nitriding processes). Doctor's thesis, Moscow, MADI, 1986, 140 p.
15. Aleksandrov V.A., Grachev A.V., Barabanov S.I. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2011, no. 7(673), pp. 37-39.
16. Lesin S.V. *Vliyaniye kachestva poverkhnostnogo sloya detalei posle mekhanicheskoi obrabotki na protsess formirovaniya zadannykh svoystv pri azotirovanii vysokolegirovannykh korroziionno-stoikikh staley* (The surface layer quality impact of the parts after machining on the desired properties forming while nitriding the high-alloy corrosion-resistant steels), Doctor's thesis, Saratov, SGAU, 2006, 177 p.
17. Rossina N.G., Popov N.A., Zhilyakova M.A., Korelin A.V. *Korroziya i zashchita metallov. V 2 ch. Ch. 1. Metody issledovaniya korroziionnykh protsessov* (Corrosion and protection of metals. In two parts. Part One. Methods of corrosion processes studying), Ekaterinburg, Ural'skii universitet, 2019, 108 p.
18. Berezovskaya V.V., Berezovskii A.V. *Korroziionno stoikie stali i splavy* (Corrosion resistant steels and alloys), Ekaterinburg, Ural'skii universitet, 2019, 244 p.
19. Kuksenova L.I., Lapteva V.G., Berezina E.V. et al. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2004, no. 1(583), pp. 31-35.
20. Berezina E.V. *Razrabotka tekhnologii formirovaniya nanostrukturirovannogo azotirovannogo sloya konstruktsionnykh staley dlya povysheniya ikh iznosostoikosti* (*Technology development for the structural steels' nanostructured nitrided layer formation to increase their wear resistance*). Doctor's thesis, Moscow, Bauman Moscow State Technical University, 2007, 210 p.