



ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) ОПИСАНИЕ ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ

(52) СПК

C23C 8/26 (2022.05); C23C 8/02 (2022.05); C23C 8/36 (2022.05)

(21)(22) Заявка: 2022102050, 30.01.2022

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
30.01.2022Дата регистрации:
01.08.2022

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 30.01.2022

(45) Опубликовано: 01.08.2022 Бюл. № 22

Адрес для переписки:

450005, г. Уфа ул. Пархоменко, 99 кв. 5,
Мингажев Аскар Джамилевич

(72) Автор(ы):

Мингажев Аскар Джамилевич (RU),
Криони Николай Константинович (RU),
Мингажева Алиса Аскаровна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

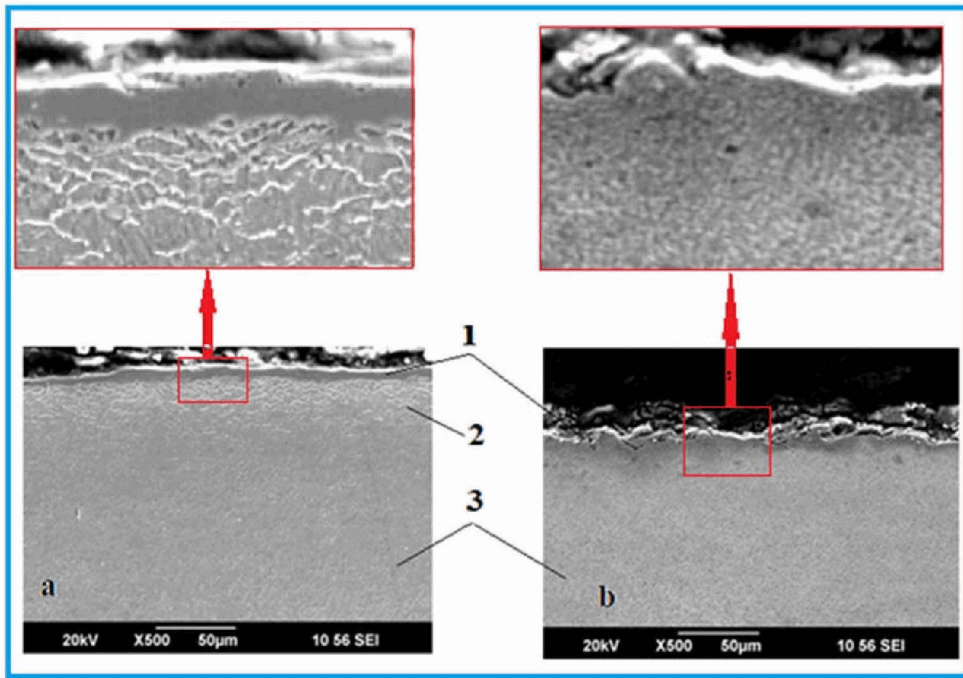
Мингажев Аскар Джамилевич (RU),
Криони Николай Константинович (RU),
Мингажева Алиса Аскаровна (RU)(56) Список документов, цитированных в отчете
о поиске: RU 2559606 C1, 10.08.2015. RU
2198954 C2, 20.02.2003. RU 2677908 C1,
22.01.2019. SU 1574679 A1, 30.06.1990. RU
2496910 C2, 27.10.2013. JP 2007191784 A,
02.08.2007. CN 106435457 B, 05.04.2019.

(54) СПОСОБ АЗОТИРОВАНИЯ ДЕТАЛИ ИЗ ЛЕГИРОВАННОЙ СТАЛИ

(57) Реферат:

Изобретение относится к способу азотирования детали из легированной стали. Способ включает размещение детали в рабочей камере, активацию поверхности детали перед азотированием, подачу в камеру рабочей насыщающей среды, нагрев детали до температуры азотирования и выдержку детали при этой температуре до формирования необходимой толщины азотированного слоя, при этом активацию поверхности детали перед азотированием проводят в два этапа, на первом этапе осуществляют поверхностное пластическое деформирование детали, обеспечивая от 1,1 до 1,2 раз превышение толщины измененного в результате поверхностного пластического деформирования слоя над толщиной формируемого азотированного слоя, а затем на втором этапе активации проводят высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку поверхности детали ионами азота, обеспечивающую формирование в поверхностном

слое детали на глубину азотирования радиационных дефектов кристаллической структуры, обеспечивающих равновеликий процесс диффузии азота внутри зерен металла и по их границам, причем высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку поверхности детали проводят при энергии ионов от 20 до 24 кэВ, дозе облучения от $1,2 \cdot 10^{17}$ см⁻² до $1,3 \cdot 10^{17}$ см⁻², скорости набора дозы облучения от $0,7 \cdot 10^{15}$ с⁻¹ до $1,2 \cdot 10^{15}$ с⁻¹, а поверхностную пластическую деформацию проводят ультразвуковым инструментом при частоте $f=17-20$ кГц и амплитуде $\xi_m=4-16$ мкм акустических колебаний и усилием его прижима к детали 40-160 Н, а в качестве метода азотирования используют ионное азотирование. Техническим результатом является повышение производительности и качества процесса азотирования, а также повышение износостойкости азотированного слоя деталей из легированных сталей. 3 табл., 1 ил.





FEDERAL SERVICE
FOR INTELLECTUAL PROPERTY

(51) Int. Cl.
C23C 8/26 (2006.01)
C23C 8/02 (2006.01)
C23C 8/36 (2006.01)

(12) **ABSTRACT OF INVENTION**

(52) CPC

C23C 8/26 (2022.05); C23C 8/02 (2022.05); C23C 8/36 (2022.05)(21)(22) Application: **2022102050, 30.01.2022**(24) Effective date for property rights:
30.01.2022Registration date:
01.08.2022

Priority:

(22) Date of filing: **30.01.2022**(45) Date of publication: **01.08.2022** Bull. № 22

Mail address:

**450005, g. Ufa ul. Parkhomenko, 99 kv. 5,
Mingazhev Askar Dzhamilevich**

(72) Inventor(s):

**Mingazhev Askar Dzhamilevich (RU),
Krioni Nikolai Konstantinovich (RU),
Mingazheva Alisa Askarovna (RU)**

(73) Proprietor(s):

**Mingazhev Askar Dzhamilevich (RU),
Krioni Nikolai Konstantinovich (RU),
Mingazheva Alisa Askarovna (RU)**(54) **METHOD FOR NITRIDING PARTS FROM ALLOYED STEEL**

(57) Abstract:

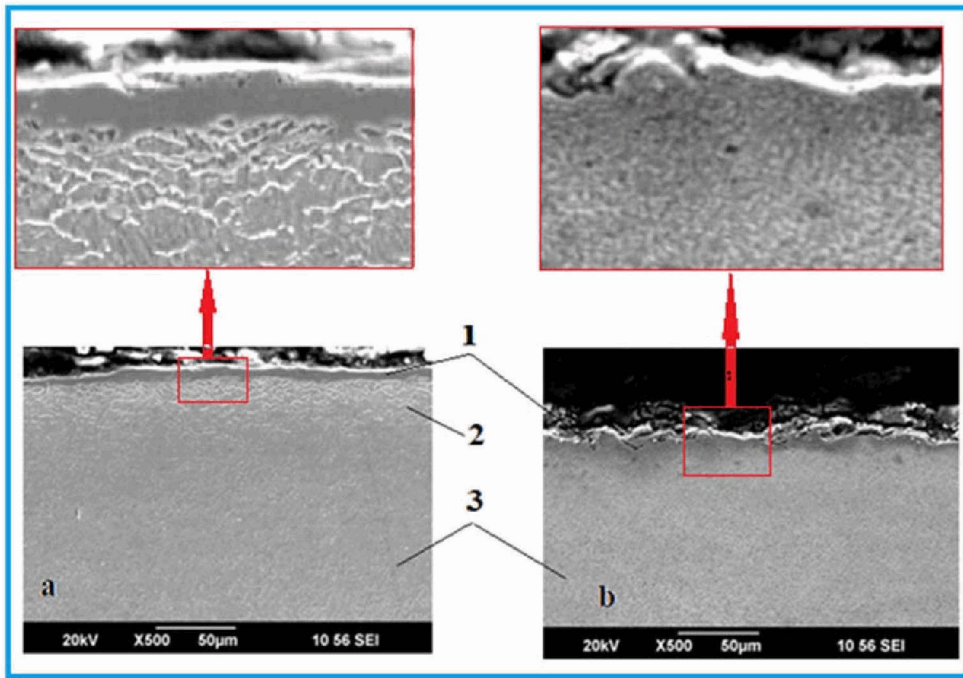
FIELD: metallurgy.

SUBSTANCE: invention relates to a method for nitriding a part made of alloy steel. The method includes placing a part in a working chamber, activating the surface of the part before nitriding, supplying a working saturating medium to the chamber, heating the part to the nitriding temperature and holding the part at this temperature until the required thickness of the nitrated layer is formed, while activating the surface of the part before nitriding is carried out in two stages, at the first stage, surface plastic deformation of the part is carried out, providing from 1.1 to 1.2 times the excess of the thickness of the layer changed as a result of surface plastic deformation over the thickness of the formed nitrated layer, and then, at the second stage of activation, high-energy ion-implantation treatment of the surface of the part with nitrogen ions is carried out, which ensures the formation of radiation defects of the

crystal structure in the surface layer of the part to the depth of nitriding, providing an equal process of nitrogen diffusion inside the metal grains and along their boundaries, and high-energy ion-implantation treatment the surface of the part is carried out at an ion energy from 20 to 24 keV, an irradiation dose from $1,2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ to $1,3 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$, a rate of radiation dose increase from $0,7 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$ to $1,2 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$, and surface plastic deformation is carried out with an ultrasonic tool at a frequency $f=17-20 \text{ kHz}$ and an amplitude $\xi_m=4-16 \text{ mcm}$ of acoustic vibrations and a pressing force of 40-160 H to the part, and ion nitriding is used as a method for nitriding nitriding.

EFFECT: increasing the productivity and quality of the nitriding process, as well as increasing the wear resistance of the nitrated layer of alloy steel parts.

1 cl, 3 tbl, 1 dwg



Изобретение относится к металлургии, в частности к способам химико-термической обработки деталей из легированных сталей, и может быть использовано в машиностроении для поверхностного упрочнения деталей машин, в том числе деталей, работающих в парах трения, зубчатых колес и роторов винтовых насосов и двигателей.

5 Одними из ответственных деталей нефтяного и нефтедобывающего машиностроения являются роторы винтовых насосов и двигателей. Указанные роторы обычно изготавливаются из легированных сталей в виде стержня, на котором нарезаны наружные винтовые зубья. При работе роторы винтовых насосов и двигателей подвергается интенсивному изнашиванию. Например, ротор забойного двигателя подвергается
10 воздействию жидкой среды, содержащей механические примеси. Твердые частицы бурового раствора изнашивают поверхность ротора, что приводит к разрушению уплотнения между ротором и статором и ухудшают работу двигателя, резко снижая сроки его эксплуатации.

Для повышения стойкости поверхностного слоя материала указанных деталей
15 используют химико-термическую обработку (ХТО), в частности азотирование

Широко известны процессы упрочнения поверхности деталей методами ХТО. Известен, например способ химико-термической обработки стальных изделий, включающий диффузионное насыщение элементами внедрения и замещения и последующий нагрев поверхности изделия (А.С. СССР №1515772, МПК С23С 8/00.
20 Способ химико-термической обработки стальных изделий. Бюл. №36, 2013 г.).

Известен способ ХТО деталей, заключающий в высокотемпературном азотировании, закалке с последующим отпуском [Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение, 1976, с. 99-102]. В результате обработки получают высокоазотистый слой небольшой толщины. Такой слой хорошо противостоит коррозии в атмосфере,
25 но плохо работает при высоких изгибных, контактных напряжениях и в условиях повышенного износа.

Известны также методы ионного азотирования в плазме тлеющего разряда постоянного или пульсирующего тока, которые включают в себя две стадии - очистку поверхности катодным распылением и собственно насыщение поверхности металла азотом [Теория и технология азотирования / Лохтин Ю.М., Коган Л.Д. и др. // М.,
30 Металлургия, 1990, с. 89].

Известен также способ азотирования металлов и сплавов, при котором на стадии очистки изделий тлеющий разряд периодически переводят в импульсную электрическую дугу. Это позволяет интенсифицировать процесс за счет быстрого разогрева
35 обрабатываемой поверхности в первые минуты до более высоких температур, чем температура процесса азотирования (А.С. СССР 1534092, МПК С23С 8/36, опубл. 07.01.90; ВГ 43787. МПК С23С 8/36. Method for chemico-thermic treatment in glowing discharge of gear transmissions. 1988).

Наиболее близким техническим решением, выбранным в качестве прототипа, является
40 способ азотирования детали из легированной стали, включающий размещение детали в рабочей камере установки, активацию поверхности детали перед азотированием, подачу в камеру рабочей насыщающей среды, нагрев детали до температур азотирования и выдержку при этих температурах до формирования необходимой толщины азотированного слоя (патент РФ № 2559606, МПК С23С 8/02, опубл. 10.08.2015).

45 Недостатками известных способов и прототипа являются невысокая износостойкость поверхности из-за неоднородности диффузионного слоя и образования в диффузионном слое хрупких фаз, а также формирования нитридной сетки, приводящей к выкрашиванию азотированных зерен в процессе эксплуатации деталей.

Азотирование с использованием известных способов приводит к следующим негативным явлениям: существует высокая вероятность образования неравномерного слоя с уменьшенной концентрацией насыщаемого вещества, неоднородной и пониженной твердостью материала поверхностного слоя, возникновением дефектных участков, особенно при образовании развитой нитридной сетки. Для удаления дефектных участков поверхностного слоя после азотирования проводится шлифование, однако, в основном из-за образования нитридной сетки происходит удаление наиболее насыщенного азотом слоя, который сохранялся бы при возможности подавления процессов образования нитридной сетки.

Причиной образования нитридной сетки в азотированном слое является различие в интенсивности диффузии азота в зернах металла и по его границам (поскольку интенсивность диффузии по границам зерен намного выше в объемах зерен, то это приводит к перенасыщению границ зерен азотом). Как известно [Иваненко А. О., Тулькова И. А., Уваров М. М. Технологические особенности азотирования резьбовых поверхностей ответственных деталей электромеханического привода. Изв. вузов. приборостроение. 2018. т. 61, № 4. с. 360 – 367.], наличие нитридной сетки в значительной степени снижает износостойкость азотированного слоя.

В то же время также известно [Гегузин Я.Е. Диффузионная зона. – М.: Наука, 1979. – 343 с.], что наличие плотных объемов дефектов кристаллической структуры приводит к интенсификации диффузионных процессов. При этом, возможно создание высокой плотности дефектов кристаллической структуры методами интенсивной пластической деформации (ИПД) [Тиняев В.Г., Назаренко В.Д., Лахник А.М. Особенности формирования диффузионных слоев на сплавах железа после предварительной пластической деформации // Металлофизика и новейшие технологии. – 1996. Т. 18. № 2. С. 45–51.] и методами высокоэнергетической ионной имплантации [Риссел Х. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. 358 с.]. В то же время, если использовать только методы ИПД, то образованный в этом случае поверхностный слой (ПС) материала будет иметь мелкокристаллическую структуру, которая, однако, при нагреве в процессе азотирования будет происходить процесс рекристаллизации с укрупнением зерен.

Известно также, что в процессе высокоэнергетической ионной имплантации (порядка 20 кЭВ и более), в ПС происходит формирование высокой плотности дефектов кристаллической структуры на глубине порядка от 200 до 300 мкм [Риссел Х. Ионная имплантация. М.: Наука, 1983. 358 с.]. Кроме того, на границах зерен возникают зоны, блокирующие диффузионные процессы, приводящие, например к резкому повышению коррозионной стойкости ПС [Повышение сопротивления высокотемпературной газовой коррозии лопаток компрессора путем комбинированного модифицирования их поверхности. Смыслов А.М. и др.

Сб. докладов VI Всероссийской конференции по испытаниям и исследованиям свойств материалов "ТестМат". ФГУП ВИАМ. 2015. С. 24.].

Задачей предлагаемого изобретения является интенсификация процесса и повышение качества азотирования деталей из легированных сталей за счет активации поверхностного слоя и формирования в нем высокой плотности дефектов кристаллической структуры, обеспечивающих равновеликие диффузионные процессы внутри зерен металла и по их границам, и тем самым подавляющих образование нитридной сетки.

Техническим результатом заявляемого изобретения является повышение производительности и качества процесса азотирования, а также повышение износостойкости азотированного слоя деталей из легированных сталей.

Технический результат достигается тем, что в способе азотирования детали из легированной стали, включающий размещение детали в рабочей камере, активацию поверхности детали перед азотированием, подачу в камеру рабочей насыщающей среды, нагрев детали до температуры азотирования и выдержку при этой температуре до формирования необходимой толщины азотированного слоя ($N_{аз}$), в отличие от прототипа активацию поверхности детали перед азотированием проводят в два этапа, на первом этапе осуществляют поверхностное пластическое деформирование детали, обеспечивая от 1,1 до 1,2 раз превышение толщины измененного в результате поверхностного пластического деформирования слоя ($N_{деф}$) над толщиной формируемого азотированного слоя ($N_{аз}$), а затем на втором этапе активации проводят высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку поверхности детали ионами азота обеспечивающую формирование в поверхностном слое детали на глубину азотирования радиационных дефектов кристаллической структуры, обеспечивающих равновеликий процесс диффузии азота внутри зерен металла и по их границам.

Кроме того, возможно использование в способе следующих дополнительных приемов: высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку поверхности детали проводят при энергии ионов от 20 до 24 кэВ, дозе облучения от $1,2 \cdot 10^{17}$ см⁻² до $1,3 \cdot 10^{17}$ см⁻², скорости набора дозы облучения от $0,7 \cdot 10^{15}$ с⁻¹ до $1,2 \cdot 10^{15}$ с⁻¹; поверхностную пластическую деформацию проводят ультразвуковым инструментом при частоте $f=17-20$ кГц и амплитуде $\xi_m=4-16$ мкм акустических колебаний и усилием его прижима к детали 40-160 Н; в качестве метода азотирования используют ионное азотирование.

Повышение требований к качеству обработки деталей машин послужило поводом для совершенствования методов насыщения поверхности легирующими элементами и привело к созданию ряда новых способов обработки, таких как ионное азотирование [Теория и технология азотирования / Лохтин Ю.М., Коган Л.Д. и др. // М., Металлургия, 1990, с. 89] и ионная имплантация [например, патент РФ №2496910. МПК С23С 14/02. СПОСОБ ИОННО-ИМПЛАНТАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ ЛОПАТОК КОМПРЕССОРА ИЗ ВЫСОКОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ НА НИКЕЛЕВОЙ ОСНОВЕ. Бюл №30, 2013]. Ионная имплантация позволяет производить насыщение поверхностного слоя деталей практически любыми легирующим и элементами, а детали, упрочненные методом ионной имплантации, имеют гораздо более высокие эксплуатационные свойства, чем детали, подвергнутые обычной или ионной химико-термической обработке [Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками / Под ред. Д.М. Поута, Г. Фоти, Д.К. Джекобсона. М.: Мир, 1987, 424 с.; Модифицирование и легирование поверхности лазерными, ионными и электронными пучками. / под ред. Дж. М. Поута. М.: Машиностроение, 1987. - 424 с.]. При этом основными недостатками ионно-имплантационной обработки являются дороговизна метода и незначительная глубина проникновения легированных элементов в поверхностный слой материала.

На фиг. представлены микрофотографии азотированных слоев легированной стали. (Фигура содержит: а – азотированный слой при традиционном ионном азотировании; б – при азотировании, с предварительной активацией пор схеме: ППД + высокоэнергетической ионной имплантацией. 1 – поверхность образца, 2 – область образования нитридной сетки, 3 – азотированный слой).

Для оценки эксплуатационных свойств деталей, обработанных по предлагаемому

способу, были проведены следующие испытания. Образцы из высоколегированных сталей 20X13, 40X, 40XH были подвергнуты обработке как по способам-прототипам (А.С. СССР №1574679, патент РФ №2144095), согласно приведенным в способе-прототипе условиям и режимам обработки, так и по вариантам предлагаемого способа.

5 Режимы обработки образцов по предлагаемому способу

Ионная имплантация при обработке деталей из легированных сталей перед азотированием проводилась по следующим режимам: имплантируемые ионы азота N; доза - $1,0 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ - неудовлетворительный результат (Н.Р.); $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ -
 10 удовлетворительный результат (У.Р.); $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (У.Р.); $1,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ (Н.Р.); скорость набора дозы облучения - $0,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ (Н.Р.); $0,7 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ (У.Р.); $1 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ (У.Р.); $1,3 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ (У.Р.); $1,5 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ (Н.Р.), энергия: 18 кэВ (Н.Р.); 20 кэВ (У.Р.); 22 кэВ (У.Р.); 24 кэВ (У.Р.); 27 кэВ (Н.Р.).

15 Глубина поверхностного пластического деформирования (ППД) детали ($H_{\text{деф}}$): 0,9 $H_{\text{аз}}$ -(Н.Р.); 1,1 $H_{\text{аз}}$ -(У.Р.); 1,2 $H_{\text{аз}}$ -(У.Р.); 1,4 $H_{\text{аз}}$ -(Н.Р.).

Проведение ППД: ультразвуковым инструментом; частота, (f) : 15 кГц -(Н.Р.); 17 кГц -(У.Р.); 20кГц -(У.Р.); 23 кГц -(Н.Р.); амплитуда акустических колебаний, (ξ_m): 2 мкм - (Н.Р.); 4 мкм -(У.Р.); 8 мкм -(У.Р.); 12 мкм -(У.Р.); 16 мкм -(У.Р.); 18 мкм -(Н.Р.); усилие прижима инструмента к детали: 30 Н -(Н.Р.); 40 Н -(У.Р.); 80 Н -(У.Р.); 120 Н -(У.Р.); 160 Н -(У.Р.); 200 Н -(Н.Р.).

Азотирование деталей проводили газовым и ионно-плазменным методами (отличие предлагаемого способа от существующих состояло в предварительной активации
 25 поверхности поверхностным пластическим деформированием и ионно-имплантационной обработкой). В качестве одного из методов азотирования применяли ионное азотирование.

Испытания показали на повышение износостойкости образцов по сравнению с прототипом от 3,5 до 3,8 раз. (Таблицы 1-3) (т.е. в результате использования
 30 активирования поверхности перед азотированием). Скорость азотирования за счет увеличения скорости диффузии возросла приблизительно в 1,3...1,6 раза. Исследование образцов показало на повышение однородности структуры диффузионной зоны материалов и отсутствие нитридной сетки при азотировании по предложенному способу.

Таким образом, проведенные сравнительные испытания показали, что применение
 35 в способе азотирования детали из легированной стали следующих существенных признаков: размещение детали в рабочей камере; активация поверхности детали перед азотированием; подачу в камеру рабочей насыщающей среды; нагрев детали до температуры азотирования и выдержку при этой температуре до формирования необходимой толщины азотированного слоя; проведение активации поверхности детали
 40 перед азотированием в два этапа, на первом этапе осуществляют поверхностное пластическое деформирование детали, обеспечивая от 1,1 до 1,2 раз превышение толщины измененного в результате поверхностного пластического деформирования слоя над толщиной формируемого азотированного слоя, а затем на втором этапе активации проводят высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку
 45 поверхности детали ионами азота, обеспечивающую формирование в поверхностном слое детали на глубину азотирования радиационных дефектов кристаллической структуры, обеспечивающих равновеликий процесс диффузии азота внутри зерен металла и по их границам; проведение высокоэнергетической ионно-имплантационной

обработки поверхности детали при энергии ионов от 20 до 24 кэВ, дозе облучения от $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, скорости набора дозы облучения от $0,7 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ до $1,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$; проведение поверхностной пластической деформации ультразвуковым инструментом при частоте $f=17-20 \text{ кГц}$ и амплитуде $\xi_m=4-16 \text{ мкм}$ акустических колебаний и усилием его прижима к детали 40-160 Н; использование в качестве метода азотирования ионного азотирования позволяет обеспечить заявленный технический результат предлагаемого изобретения - повышение производительности и качества процесса азотирования, а также повышение износостойкости азотированного слоя деталей из легированных сталей.

Таблица 1

Износостойкость образцов из легированных сталей 20X13 после ХТО

№ партии образцов	Материал	Вид обработки	Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^{-4} \text{ г}$	Коэффициент трения (без смазки)
0	20X13	ИС	368	0,19- 0,18
1		ВЭИИА	154	0,16- 0,15
2		ГА	78	0,17- 0,16
3		ИА	64	0,16- 0,15
4		ППД+ВЭИИА +ГА	22	0,16- 0,15
5		ППД+ВЭИИА + ГА	16	0,15- 0,16

Таблица 2

Износостойкость образцов из легированных сталей 40X после ХТО

№ партии образцов	Материал	Вид обработки	Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^{-4} \text{ г}$	Коэффициент трения (без смазки)
0	40X	ИС	324	0,20- 0,19
1		ВЭИИА	108	0,17- 0,16
2		ГА	65	0,18- 0,17
3		ИА	53	0,17- 0,16
4		ППД+ ВЭИИА +ГА	19	0,17- 0,16
5		ППД+ВЭИИА + ГА	12	0,16- 0,15

Таблица 3

Износостойкость образцов из легированных сталей 40XH после ХТО

№ партии образцов	Материал	Вид обработки	Потеря массы, $\Delta m \cdot 10^{-4} \text{ г}$	Коэффициент трения (без смазки)
0	40XH	ИС	334	0,20- 0,19
1		ВЭИИА	117	0,16- 0,15
2		ГА	69	0,17- 0,16
3		ИА	58	0,16- 0,15
4		ППД+ ВЭИИА +ГА	21	0,16- 0,15
5		ППД+ВЭИИА + ГА	15	0,15- 0,16

(57) Формула изобретения

Способ азотирования детали из легированной стали, включающий размещение детали в рабочей камере, активацию поверхности детали перед азотированием, подачу в камеру рабочей насыщающей среды, нагрев детали до температуры азотирования и выдержку детали при этой температуре до формирования необходимой толщины азотированного слоя, отличающийся тем, что активацию поверхности детали перед азотированием проводят в два этапа, на первом этапе осуществляют поверхностное пластическое деформирование детали, обеспечивая от 1,1 до 1,2 раз превышение толщины измененного

в результате поверхностного пластического деформирования слоя над толщиной формируемого азотированного слоя, а затем на втором этапе активации проводят высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку поверхности детали ионами азота, обеспечивающую формирование в поверхностном слое детали на глубину азотирования радиационных дефектов кристаллической структуры, обеспечивающих равновеликий процесс диффузии азота внутри зерен металла и по их границам, причем высокоэнергетическую ионно-имплантационную обработку поверхности детали проводят при энергии ионов от 20 до 24 кэВ, дозе облучения от $1,2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ до $1,3 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$, скорости набора дозы облучения от $0,7 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$ до $1,2 \cdot 10^{15} \text{ с}^{-1}$, а поверхностную пластическую деформацию проводят ультразвуковым инструментом при частоте $f=17-20 \text{ кГц}$ и амплитуде $\xi_m=4-16 \text{ мкм}$ акустических колебаний и усилием его прижима к детали 40-160 Н, а в качестве метода азотирования используют ионное азотирование.

15

20

25

30

35

40

45

