

## СПОСОБ БЫСТРОГО АЗОТИРОВАНИЯ В ПЛАЗМЕ РАЗРЯДА С ПОЛЫМ АНОДОМ

А. В. Карелин, В. В. Хегай

*Предложен способ быстрого азотирования в плазме разряда с повышенной концентрацией химически активных частиц для ионного азотирования. Принцип действия основан на образовании электронного пучка в микроскопическом объеме разряда специальной геометрии. Проведена экспериментальная проверка его функциональных возможностей для ионного азотирования материалов. Показана возможность достижения параметров микротвердости до  $700 \text{ кгс/мм}^2$  с глубиной азотированного слоя до  $300 \text{ мкм}$  при суммарном воздействии плазмой в течение  $3 \div 5$  минут. Построена и исследована кинетическая модель азотирования в плазме на основе газовой смеси  $\text{He} - \text{N}_2 - \text{H}_2$ . Показано, что атомарные ионы азота являются основным компонентом среды, отвечающим за процесс азотирования.*

*Ключевые слова:* азотирование, электронный пучок, разряд, плазма, атомарные ионы, молекулярные ионы, диссоциативная рекомбинация, микротвердость, кинетическая модель.

### Введение

Азотирование представляет собой процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали и сплавов азотом N при нагревании в соответствующей среде. Азотированные материалы обладают высокой поверхностной прочностью, которая не изменяется при нагревании до  $400 \div 450 \text{ }^\circ\text{C}$ ; высокой прочностью при износе и низкой склонностью к задирам; высокой устойчивостью к кавитации и коррозии в атмосфере, воде и паре [1].

В зависимости от назначения существует много различных способов азотирования: в соляных ваннах; газовое азотирование; ионно-плазменное азотирование; азотирование из растворов электролитов [2].

Достаточно широко применяется также ионная имплантация металлов ионами азота и других химических элементов [3]. При ионной имплантации поверхностные свойства материалов модифицируются в результате внедрения высокоэнергетических ионов, вызывающих изменение элементного состава (легирование) и структурно-фазового состояния приповерхностных слоев. Правда, при достаточно высоких дозах имплантированных высокоэнергетических ионов (свыше  $10^{17}$  ионов/ $\text{см}^2$ ) существенным становится распыление поверхности облучаемого изделия.

Газовым азотированием называется насыщение атомами азота поверхности металла при температурах от  $400^\circ\text{C}$  (для некоторых сталей) до  $1200^\circ\text{C}$  (аустенитные стали и тугоплавкие металлы). Средой для насыщения является диссоциированный аммиак. Для управления структурой и механическими свойствами слоя при газовом азотировании сталей применяют:

- двух-, трехступенчатые температурные режимы насыщения;
- разбавление диссоциированного аммиака водородом, реже водородом H.

Под ионно-плазменным азотированием обычно понимают технологию насыщения металлических

изделий в азотсодержащем вакууме (примерно  $0,01 \text{ атм}$ ), в котором возбуждается тлеющий электрический разряд. Анодом служат стенки камеры нагрева, а катодом – обрабатываемые изделия. Для управления структурой слоя и механическими свойствами слоя применяют (в разные стадии процесса):

- изменение плотности тока;
- изменение расхода азота;
- изменение степени разрежения;
- добавки к азоту особо чистых технологических газов: водорода, аргона Ar, метана.

Применение тлеющего разряда в технологии азотирования позволило сократить продолжительность процесса азотирования и улучшить качество азотированного слоя [4].

### Принцип ионно-плазменного азотирования

Согласно [4], сущность метода традиционного ионно-плазменного азотирования состоит в следующем. В разреженной азотсодержащей атмосфере между катодом (деталью) и анодом возбуждается аномальный тлеющий разряд (напряжение разряда порядка  $1100 \text{ В}$ ), в этот момент азот в печи ионизируется и выделяет электроны, ионы азота двигаются в направлении катода, т. е. детали, и разгоняются до высоких скоростей катодным падением напряжения перед поверхностью катода и в конце бомбардируют деталь. Высокоскоростная кинетическая энергия преобразуется в тепловую энергию бомбардировки ионами. Эта энергия не только нагревает деталь, начиная с поверхности, но и частично вызывает катодное распыление, таким образом вызывая эмиссию электронов и таких элементов, как железо  $\text{Fe}^*$ , углерод C и кислород O с поверхности детали. Вытесненные атомы железа соединяются с атомарным азотом в плазме, полученной в результате тлеющего разряда, и образуют нитрид железа  $\text{Fe} - \text{N}$ , который поглощается на поверхности детали. Нитрид железа

Fe – N, поглощенный во внешнем слое, постепенно распадается на нитриды низших порядков по мере повышения температуры и бомбардировки ионами, а часть азота проникает и диффундирует в деталь. Ионы азота могут попадать непосредственно в результате ускорения на катодном падении потенциала.

Тем не менее, в настоящее время отсутствует единая точка зрения на механизм процесса азотирования. В литературе отсутствуют сведения о систематическом исследовании плазмохимических процессов, протекающих в плазме активной фазы при ионно-плазменном азотировании. Дефицит сведений о кинетике процессов в процессе ионного азотирования был связан со сложной плазмохимией в активной среде.

### Свойства ионно-плазменного азотирования

1. Ионное азотирование в отличие от азотирования в соляной ванне и газового азотирования не является химической реакцией, оно не требует аммиака, можно использовать только азот или его смеси с водородом или инертными газами. По этой причине оно свободно от загрязнений, не требует специальных мер против загрязнения.

2. Азотированный слой может сформироваться за короткое время из-за большого азотного потенциала.

3. Нет необходимости в специальной нагревательной установке, так как нагревание происходит вследствие разряда.

4. Так как нагревается только деталь, нет необходимости нагрева всей печи, таким образом, не требуется большой мощности, повышения температуры и теплоизоляционного оборудования.

5. Предотвратить азотирование можно путем покрытия необходимого участка оболочкой мягкой стали. Нет необходимости в таких процедурах, как металлизация или нанесение на участок детали средства, предотвращающего азотирование.

6. Состояние внешнего азотируемого слоя может контролироваться.

7. Давление газа существенно ниже атмосферного, резко ограничивая расход газа.

8. Абсолютно отсутствует угроза пожара или взрыва.

9. Сокращение длительности диффузионных процессов в 2 – 5 раз и полного цикла обработки деталей в 10 раз.

10. Исключение процесса подготовки поверхности при азотировании высокохромистых нержавеющей сталей. Отсутствие потребности в предварительной депассивирующей обработке.

11. Точное регулирование состава газовой фазы. Универсальность метода – возможность использования установок ионного азотирования для проведения процессов борирования, цианирования, цементации,

силицирования, насыщения фосфором и другими элементами не только черных, но и цветных металлов.

12. Уменьшение шероховатости поверхности.

13. Деталь очень незначительно деформируется, наблюдается незначительное увеличение размеров, при этом погрешность геометрической формы образцов – овальность, конусность и т. д. – отсутствует. Как правило, эти изменения не превышают требуемых допусков и не требуют дополнительной обработки после азотирования.

### Азотирование в разряде с жесткой составляющей функции распределения электронов

В работах [5, 6] был предложен вариант создания установки для ионно-плазменного азотирования на основе разряда с жесткой составляющей (РЖС) функции распределения электронов по энергии (ФРЭЭ) взамен, ставшего уже традиционным, тлеющего разряда. Рассмотрим основные отличия предлагаемого способа азотирования в сравнении с установками на основе тлеющего разряда.

Азотирование стали в тлеющем разряде проводится при температуре поверхности  $400 \div 700$  °С, давлении  $0,3 \div 10$  торр, напряжении на электродах  $400 \div 1100$  В, плотности тока  $0,1$  А/см<sup>2</sup>, продолжительность процесса от нескольких минут до 25 ч. Азотирование в промышленных установках ведется в условиях аномального тлеющего разряда. Одной из наиболее сложных проблем здесь является обеспечение стабильности разряда. Дугообразование приводит к локальному перегреву поверхности, а переход в нормальный режим горения приводит к снижению эффективности обработки. В этих условиях затруднена регулировка параметрами процесса.

Использование разряда с жесткой составляющей позволяет избежать приведенных выше недостатков. Отличительной особенностью РЖС является наличие большой группы немаксвелловских электронов, способных эффективно ионизовать газ. Этот разряд пучкового типа с сетчатым электродом позволяет формировать пучки электронов в газе при средних давлениях. Применение таких пучков для накачки газовых лазеров позволило улучшить их энергетические характеристики.

Электрические схемы и специальный подбор материалов электродов позволяют формировать пучки электронов длительностью до 1 мкс, с энергией  $1 \div 16$  кэВ, частотой следования импульсов  $0,1 \div 10$  кГц, при плотности тока от  $0,5$  до  $8$  А/см<sup>2</sup>. Рабочий диапазон давлений  $5 \div 50$  торр. Данный разряд может работать и в стационарном режиме, в условиях прокачки газовой смеси и без прокачки.

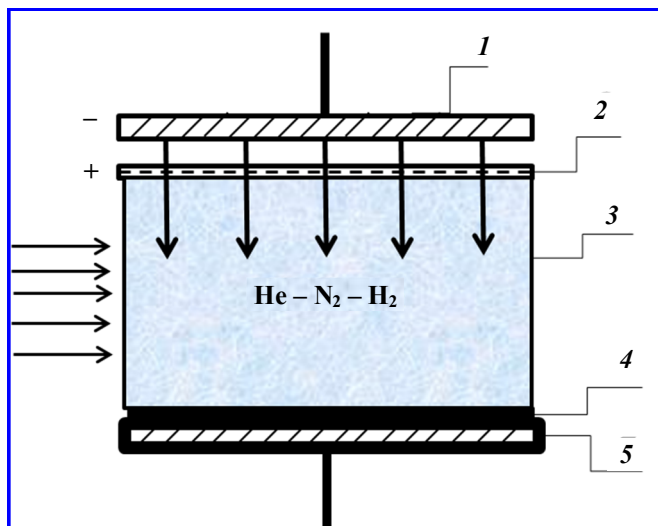


Рис. 1. Модель электронно-пучкового плазмохимического реактора: 1 – катод; 2 – сетчатый анод; 3 – плазма; 4 – образец; 5 – столик

В работах [5, 6] предложена следующая модель электронно-пучкового плазмохимического реактора для ионно-плазменного азотирования. Активная газовая среда на основе азотосодержащей смеси возбуждается пучком электронов (рис. 1), который формируется между плоским катодом 1 и сетчатым анодом 2, установленным с малым зазором 0,2 – 0,5 мм, и, пройдя сквозь сетку, в режиме «убегания» создает плазму 3. Энергия электронов пучка в зависимости от электрической схемы питания может варьироваться в диапазоне 0,1 ÷ 10 кэВ. Возможен импульсный, импульсно-периодический с высокой частотой повторения и квазинепрерывный режим возбуждения активной среды. Электронный пучок формирует плазму в широком диапазоне концентраций химически-активных частиц  $N^* = 1010 \div 1015 \text{ см}^{-3}$  с исключительно высокой однородностью в поперечном сечении, что позволяет осуществлять эффективную и равномерную обработку поверхности образца 4.

Электроны разгоняются в пространстве между анодом и катодом, проникают в активный объем, ионизуют активную среду. Ионы азота затем могут попасть на поверхность изделия в результате свободной диффузии или же они могут быть вытянуты и ускорены электрическим полем после приложения отрицательного потенциала к изделию. В этом случае изделие выполняет роль вспомогательного электрода.

Таким образом, энергия бомбардирующих ионов может меняться в очень широких пределах – от тепловой до сотен электронвольт, при этом

условия горения основного разряда не изменяются, процесс хорошо регулируется, разряд стабилен. Полярность электродов может при необходимости изменяться.

В условиях проведенного в [6] эксперимента разрядный узел 1 – 2 и образец со столиком 4 – 5 (см. рис. 1) были размещены в теплостойкой камере. Исследуемый образец вводился в рабочую камеру через вакуумный загрузочный шлюз и устанавливался на специальном столике с варьируемым расстоянием (0,5 ÷ 3 см) от поверхности сетки анода. Столик был снабжен малоинерционным нагревателем, обеспечивающим регулируемую температуру в диапазоне 200 ÷ 600 °С, которая контролировалась термопарой. Рабочая камера снабжена системой напуска, контроля и прокачки газа. Два выходных окна позволяли одновременно выводить излучение плазмы на два оптических канала регистрации – фотографический и фотоэлектрический. Рабочая камера вакуумировалась до  $10^{-3} \div 10^{-5}$  торр, наполнялась газовой смесью He – N<sub>2</sub> – H<sub>2</sub> до давлений 1 ÷ 30 торр. Использовался как стационарный режим заполнения при фиксированном давлении рабочей смеси, так и режим прокачки газа.

Возбуждение плазмы осуществлялось в импульсно-периодическом режиме с частотой следования импульсов до 5 кГц. Импульсы тока пучка формировались при разряде емкости, заряженной от высоковольтного выпрямителя до напряжения амплитудой 1 – 10 кВ через тиратрон ТГИ1-1000/25. Калиброванные импульсы тока и напряжения регистрировались двухлучевым осциллографом, который синхронно запускался от генератора импульсов. В зависимости от величины емкости длительность импульса тока варьировалась в диапазоне 0,5 – 2 мкс. Амплитуда импульса тока изменялась в пределах от 10 до 200 А. Электрическая схема питания позволяла обеспечить независимый положительный потенциал 100 – 600 В на азотируемый образец для вытягивания ионов из плазмы. Кроме того, предусматривался режим стационарного аномального тлеющего разряда при напряжении  $U = 500 \div 1400 \text{ В}$ , токе  $I = 20 \div 80 \text{ мА}$  для очистки поверхности образца.

Проведена обработка серии образцов стали марки ШХ15-4 по стандартной методике ионного азотирования с предварительной обработкой поверхности катодным распылением [4]. В зависимости от условий обработки контролировались два параметра – микротвердость  $H$  (кгс/мм<sup>2</sup>) и толщина азотированного слоя  $L$  (мкм).

Предварительно обработка образцов проводилась в режиме катодного распыления в стационарном тлеющем разряде между сеткой и образцом,

установленным на расстоянии 2 см. Использовалась смесь He – N<sub>2</sub> при суммарном давлении 0,5 ÷ 1 торр. Напряжение  $U = 1200$  В, время обработки 30 – 60 мин, конечная температура 220 ÷ 270 °С. Процесс азотирования осуществлялся в смеси He – N<sub>2</sub> – H<sub>2</sub> при давлении 10 ÷ 20 торр, соотношение компонент 10 : 2 : 1 (торр) и температуре образца 500°С.

Типичная зависимость микротвердости образца по глубине азотированного слоя представлена на рис. 2, а. Контроль микротвердости проводился также с обратной, неподверженной плазменной обработке стороне образца (правая часть рисунка). Для сравнения приведена также зависимость (рис. 2, б) микротвердости по глубине образца при аналогичной предварительной обработке катодным распылением, нагреве в течение 3 часов при  $T = 500^\circ\text{C}$  в той же газовой смеси, но без пучкового разряда.

Анализ серии образцов, обработанных при вариации условий в широком диапазоне, показал возможность достижения параметров микротвердости в интервале 600 ÷ 800 кгс/мм<sup>2</sup> с глубиной диффузионного слоя 0,3 ÷ 0,4 мм при общем воздействии пучковой плазмы в течение 3 ÷ 5 мин. Аналогичные параметры азотирования в тлеющем разряде достигаются в течение 4 ÷ 7 часов [4]. Реализация квазистационарного режима работы электронно-пучкового плазмохимического реактора представляет лишь инженерную задачу, вполне разрешимую на современном научно-техническом уровне.

Уже предварительные оценки на основе сравнения параметров тлеющего разряда и РЖС позволяли заключить, что в последнем случае концентрация ионов у поверхности азотируемого изделия будет по крайней мере на порядок выше, чем в случае тлеющего разряда. Это должно было приводить к существенному сокращению времени азотирования.

Многолетний опыт работы с тлеющим разрядом показал, что для различных марок сталей существуют свои оптимальные режимы обработки, особенно отличаются времена экспозиции, конкретная конструкция самой установки зависит от формы азотируемых изделий. Поэтому работа по созданию любой установки по азотированию должна, вестись в нескольких направлениях, которые можно характеризовать как научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы.

За долгую историю исследований азотирования в тлеющем разряде был достигнут значительный прогресс в понимании процессов, протекающих в

металле. Однако достаточно долго не было достаточно ясного понимания основных процессов, протекающих в плазме и отвечающих за эффективную подачу насыщающего элемента на поверхность обрабатываемого изделия.

В результате спектроскопических исследований плазмы [6] доказано, что распределение электронов в факеле плазмы имеет пучковые свойства. Высокая ионизирующая способность этих электронов обеспечивает достижение в объеме и доставку на поверхность образца активных частиц азота с концентрацией  $N = 10^{13} \div 10^{14} \text{ см}^{-3}$ , что на несколько порядков величины превышает параметры, достигаемые в установках на основе традиционных тлеющих и высокочастотных разрядов.

Для более глубокого понимания процесса ионно-плазменного азотирования предложенным в [5, 6] способом в настоящей работе мы подробно рассмотрели химическую кинетику плазмы разряда электронно-пучкового типа с полым анодом и жесткой составляющей функции распределения электронов по энергии в смеси гелия с азотом и водородом.

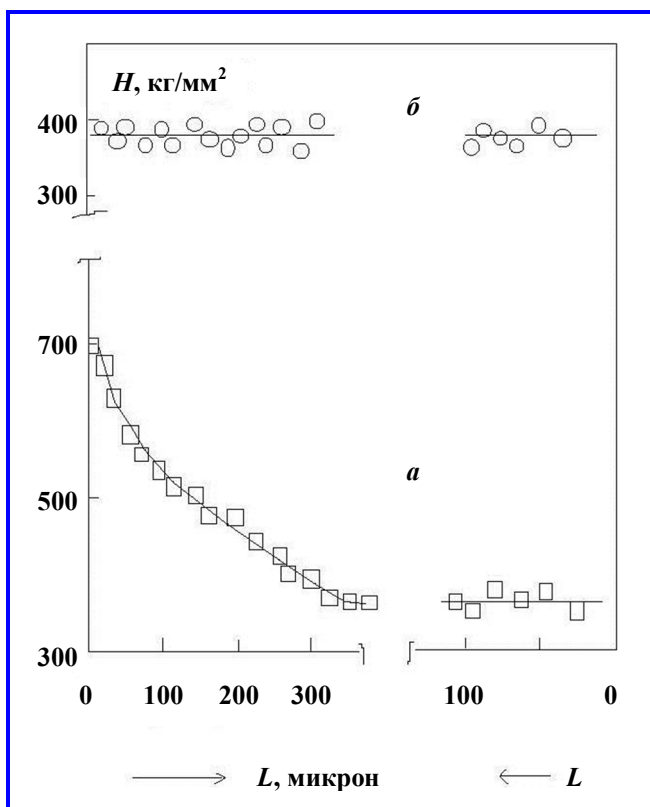


Рис. 2. Распределение микротвердости по глубине образца с лицевой (слева) и тыльной сторон при азотировании: а – при наличии пучкового разряда, длительность процесса 5 мин; б – те же условия, но без разряда, нагрев при  $T = 500^\circ\text{C}$  в течение 3 часов



В кинетической модели смеси He – N<sub>2</sub> – H<sub>2</sub> учитывались атомы, молекулы и ионы в различных состояниях He, N, H, He\*(2<sup>1,3</sup>S), He\*(1<sup>3</sup>Σ), N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>(v), H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>(v), N<sub>2</sub>(A), N<sub>2</sub>(B), NH, N\*(2p<sup>2</sup>2p, 3s, 3p, 2d), He<sup>+</sup>, N<sup>+</sup>, H<sup>+</sup>, He<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub><sup>+</sup>(C), H<sub>2</sub><sup>+</sup>, He<sub>3</sub><sup>+</sup>, H<sub>3</sub><sup>+</sup>, N<sub>3</sub><sup>+</sup>, N<sub>4</sub><sup>+</sup>, H<sub>5</sub><sup>+</sup>, HeN<sup>+</sup>, NH<sup>+</sup>, HeH<sup>+</sup>, He<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, HeH<sub>2</sub><sup>+</sup>, N<sub>2</sub>H<sup>+</sup>, NH<sub>2</sub><sup>+</sup>, NH<sub>3</sub><sup>+</sup>. Количество плазмохимических реакций с учетом поуровневой кинетики атомов азота достигало 250. Для численного моделирования системы из 38 жестких дифференциальных уравнений совместно с уравнением квазинейтральности плазмы использовался специализированный комплекс программ «ПЛАЗЕР» [7].

Построенная кинетическая модель процесса ионного азотирования в плазме разряда с жесткой составляющей в смеси He – N<sub>2</sub> – H<sub>2</sub> удовлетворительно описывает основные закономерности, наблюдаемые в эксперименте. Основной активной компонентой, ответственной за процесс азотирования в разряде с жесткой составляющей, являются атомарные ионы азота. Поэтому наиболее эффективно процесс идет в смеси гелия с азотом, где наработка атомарных ионов азота идет в реакции перезарядки атомарных ионов гелия на молекулярном азоте. Использование других инертных газов (Ne и Ar) не будет приводить к столь эффективной наработке атомарных ионов азота. Наличие максимума эффективности процесса азотирования в зависимости от парциального давления азота обусловлено конкуренцией нескольких процессов и находится в сильной зависимости от температуры среды.

В оптимальных условиях азотирования в разряде с жесткой составляющей основную роль играет пристеночная область с поперечным размером 6 ÷ 8 мм. Размер этой области зависит от давления смеси.

Таким образом, теоретически исследовано влияние параметров активной среды и накачки на эффективность и оптимальные условия протекания процесса ионного азотирования. Установлено повышение эффективности процесса за счет дополнительной наработки и транспортировки атомарных ионов азота.

При ускоряющем напряжении  $U = 5$  кВ, плотности тока  $j = 5$  А/см<sup>2</sup>, характерном размере образца  $R = 1,5$  см и температуре образца  $T = 500^\circ\text{C}$  оптимальные парциальные давления гелия и азота составляют  $p_{\text{He}} = 10$  торр и  $p_{\text{N}_2} = 2$  торр, соответственно. Было также исследовано влияние добавки водорода на поток ионов азота на образец и оптимальные условия. Установлено, что при концентрациях водорода свыше  $[\text{H}_2] > 10^{16}$  см<sup>-3</sup> поток ионов азота на образец существенно падает вследствие интенсивного образования молекулярных

ионов He<sub>2</sub>H<sup>+</sup> и их последующей диссоциативной рекомбинации. Таким образом, введение только небольших количеств водорода (не более 0,01 торр) может оказать положительное влияние за счет очистки поверхности.

В заключении следует особо отметить, что смесь гелия с азотом химически инертна и экологически безопасна. Азотирование в разряде пучкового типа, сохраняя все преимущества, присущие процессу в тлеющем разряде, позволяет избежать многих его основных недостатков. В частности, необходимости использования его только при изготовлении коммерчески значимого количества одинаковых деталей из-за невозможности размещения в одном разрядном объеме деталей различной формы. Кроме того, разряд электронно-пучкового типа предоставляет принципиальную возможность азотирования углублений и отверстий деталей с уже готовыми размерами. Например, рабочие стенки цилиндров двигателей внутреннего сгорания, не снижая при этом чистоты обрабатываемой поверхности.

Таким образом, использование РЖС для существенного улучшения качества поверхности металлических деталей любой геометрической формы может сделать его весьма полезным в процессе разработки и создания перспективных космических аппаратов и других сложных изделий специального назначения.

### Литература

1. Лактин Ю. М., Коган Я. Д. Газовое азотирование деталей машин и инструмента / Ю. М. Лактин, Я. Д. Коган. – Москва : Машиностроение, 1982. – 59 с.
2. Азотирование // Большая советская энциклопедия : [в 30 т.] ; гл. ред. А. М. Прохоров. – 3-е изд. – Москва : Советская энциклопедия, 1970. – Т. 1. – С. 298 – 299.
3. Быковский Ю. А. [и др.] Ионная и лазерная имплантация металлических материалов / Ю. А. Быковский, В. Н. Неволин, В. Ю. Фоминский. – Москва : Энергоатомиздат, 1991. – 240 с.
4. Салькова С. С., Рудман В. А. Опыт применения ионного азотирования в машиностроении / С. С. Салькова, В. А. Рудман. – Ленинград : ЛДНТП, 1987. – 20 с.
5. Плазмохимический реактор на основе пучка низкоэнергетичных электронов для технологий / А. М. Янчарина // Физика низкотемпературной плазмы. Матер. конф. – Петрозаводск : Изд. Петр. ун-та, 1995. – Ч. 3. – С. 404 – 406.
6. Plasmachemical reactor for ion nitriding / A. V. Karelin, V. P. Demkin, S. V. Melnichuk [et al.] // Proc.Int.Conf. Laser'96 (Portland, 1996). – McLEAN, VA : STS PRESS, 1997. – P. 653 – 657.
7. Плазменные лазеры видимого и УФ-диапазонов. Труды ИОФАН / Институт общей физики им. А. М. Прохорова Российской академии наук ; ответственный редактор д.ф.-м.н. С. И. Яковленко – Т. 21. – Москва : Наука, 1989. – 142 с.

Поступила в редакцию 31.01.2022

*Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, т. (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru. (АО «ЦНИИМаш»).*

*Валерий Варламович Хегай, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, т. (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru. (ИЗМИРАН).*

## METHOD FOR FAST NITRIDING IN THE DISCHARGE PLASMA WITH HOLLOW ANODE

**A. V. Karelin, V. V. Khegay**

*The method for fast ion nitriding in an electron-beam plasma source with increased concentration of chemical-active particles is suggested. The principle of action has based on the electron beam forming in microscopic volume of the special geometry discharge. A control nitriding has shown an opportunity of achievement of parameters of microhardness up to 700 kg/mm with a depth of a nitrated layer up to 300 microns at total effect by a plasma during 3 ÷ 5 minutes. Kinetic model of a nitriding in the plasma on the basis of the He-N<sub>2</sub>-H<sub>2</sub> mixture is constructed and investigated. It is shown, that atomic ions of nitrogen are the main component of medium, responsible for nitriding process.*

**Keywords:** nitriding, electron beam, discharge, plasma, atomic ions, molecular ions, dissociative recombination, microhardness, kinetic model.

### References

1. Laktin Iu. M., Kogan Ia. D. Gas nitriding of machine parts and tools / Iu. M. Laktin, Ia. D. Kogan. – Moscow : Mashinostroenie, 1982. – 59 p.
2. Nitriding // Great Soviet Encyclopedia : [30 Volumes] ; executive editor A. M. Prokhorov. – third edition – Moscow : Soviet Encyclopedia, 1970. – Vol. 1. – P. 298 – 299.
3. Bykovskii Iu. A. [et al.] Ion and laser implantation of metallic materials / Bykovskii Iu. A., V. N. Nevolin, V. Iu. Fomin-skii. – Moscow : Ergoatomizdat, 1991. – 240 p.
4. Salkova S. S., Rudman V. A. Experience of ion nitriding use in machine engineering / S. S. Salkova, V. A. Rudman. – Leningrad: Leningrad House of Science and Engineering, 1887. – 20 p.
5. Plasma-chemical reactor based on a beam of low-energy electrons for technologies / A. M. Iancharina // Physics of low-temperature plasma. Conference – Petrozavodsk : Petrus Publishing House, 1995. – Part 3. – P. 404 – 406.
6. Plasmachemical reactor for ion nitriding / A. V. Karelin, V. P. Demkin, S. V. Melnichuk [et al.] // Proc.Int.Conf. Laser'96 (Portland, 1996). – McLEAN, VA : STS PRESS, 1997. – P. 653 – 657.
7. Visible and UV Plasma Lasers. Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences Proceedings / Prokhorov General Physics Institute of the Russian Academy of Sciences : Doctor of Physical and Mathematical Sciences S. I. Iakovlenko – Vol. 21. – Moscow : Nauka, 1989. – 142 p.

*Aleksandr Vitalevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Chief Researcher, tel. +7 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@mail.ru. (JC «TSNIIMash»).*

*Valerii Varlamovich Khegai, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Leading Researcher, tel. +7 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru. (Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of RAS).*