

М.Н.Босьяков, С.В.Бондаренко, Д.В.Жук, А.А.Козлов, И.Л.Поболь

Физико-технический институт НАН Республики Беларусь, Минск (E-mail: e-phys@tut.by)

Оборудование и применение ионно-плазменного азотирования для упрочнения деталей машин и механизмов

В ФТИ НАН Беларуси разработаны новые подходы к созданию инновационного оборудования для реализации энергосберегающих технологий ионно-плазменного азотирования деталей машиностроения и инструмента. Создана гамма установок с широким диапазоном мощности разряда и размерами рабочего пространства вакуумной камеры. Оборудование поставлено на ряд крупных машиностроительных предприятий. В статье представлена методика оптимизации энергетических характеристик реального промышленного оборудования, приведены примеры изделий промышленности, подвергнутых ионно-плазменному азотированию.

Ключевые слова: ионно-плазменное азотирование, оптимизация, энергетические характеристики, энергосберегающие технологии, промышленное оборудование.

Введение

Современный уровень развития машиностроения в промышленно развитых странах характеризуется переходом от традиционных высокотемпературных видов химико-термической обработки, таких как цементация и нитроцементация, к процессам азотирования [1–6]. Этому в существенной степени способствуют новые разработки в области ионно-плазменного азотирования (ИПА), которое позволяет избавиться от таких недостатков газового азотирования, как большая длительность и трудоемкость процесса, повышенная хрупкость слоя, недостаточная контактная выносливость упрочненного материала, нестабильность получаемых результатов. Пионером практического применения этого метода стала немецкая фирма *Klöckner-Ionon* в 1960-е годы. Тогда же начались исследования и в СССР — в МВТУ им. Н.Э. Баумана и МАДИ.

В зависимости от целей обработки при ИПА возможно получение диффузионного слоя с нитридной зоной и без нее. В первом случае обеспечиваются высокие коррозионная стойкость и прирабатываемость трущихся поверхностей (для деталей, работающих на износ), во втором — сопротивление знакопеременным нагрузкам в условиях изнашивания при высоких давлениях (для деталей, режущего и штампового инструмента).

Учитывая весьма высокую стоимость оборудования ИПА производства западных фирм, решение проблемы применения технологии ИПА в странах СНГ — Беларуси, Казахстане, России, Украине — состоит, прежде всего, в изготовлении отечественных установок ионного азотирования, соответствующих современному уровню требований. Прежде всего, должно быть обеспечено автоматизированное управление процессом ИПА. Это дает возможность обработки изделий, независимо от степени загрузки рабочей камеры и марки обрабатываемой стали. Исходными параметрами в этом случае являются требования конструкторской документации по глубине упрочненного слоя и его твердости.

В последние годы в ФТИ НАН Беларуси разработан и создан инновационный комплекс для реализации процесса азотирования, выполнена коренная модернизация образцов зарубежного промышленного оборудования, создано несколько установок ИПА для ряда предприятий.

Принцип действия и механизм процесса ИПА

Ионно-плазменное азотирование — это химико-термическая обработка деталей, обеспечивающая диффузионное насыщение поверхностного слоя сталей, чугунов, сплавов титана, никеля, алюминия и других металлов азотом (или азотом и углеродом) при давлении 130–600 Па. Температурный диапазон ИПА (350–600 °С) при упрочнении сталей и чугунов шире, чем для газового азотирования.

Принцип действия ИПА заключается в том, что в разряженной азотсодержащей газовой среде между катодом (деталью) и анодом (стенками вакуумной камеры) возбуждается аномальный тлеющий разряд, образующий активную среду (ионы и атомы азота), обеспечивающую формирование в поверхностном слое металла азотированного слоя, состоящего из внешней — нитридной зоны и располагающейся под ней диффузионной зоны. При ИПА химически активный азот образуется в раз-

рядной зоне (катодном слое), и поэтому можно использовать молекулярный азот, который при газовом азотировании является химически неактивным. Поток активного азота на поверхность материала зависит от тока и напряжения разряда, поэтому необходимо учитывать взаимосвязь этих параметров с площадью обрабатываемых изделий при создании технологических процессов для разных моделей установок.

Технологическими факторами, влияющими на эффективность ИПА, являются температура процесса, продолжительность насыщения, давление, состав и расход рабочей газовой смеси, а также плотность тока разряда. Разряд на всех стадиях процесса должен быть аномальным, т.е. вся поверхность обрабатываемых изделий должна быть покрыта свечением, а плотность разрядного тока должна быть больше нормальной плотности для этого давления с учетом эффекта нагрева газа в катодной области разряда.

Температура изделий, площадь садки, участвующей в теплообмене, и эффективность теплообмена со стенкой (количество экранов, степень их черноты или температура «горячей» стенки) определяют мощность, необходимую для поддержания разряда и обеспечивающую нужную температуру изделий как на стадии разогрева, так и на стадии выдержки, когда температура изделий должна быть постоянной в течение длительного времени.

Несмотря на давнюю историю изучения процессов азотирования, в том числе ионного, общепризнанный механизм процесса пока отсутствует. Полагают, что за процесс ионного азотирования ответственны ионы атомарного азота. Они имеют меньшие размеры, легче сорбируются поверхностью материала, взаимодействуют с ним и диффундируют по междоузлиям. При образовании твердого раствора постепенно формируется диффузионная зона. Нейтральные атомы являются источником ионов [1–4]. В соответствии с другой точкой зрения [5, 6], в формировании азотированного слоя определяющую роль играет атомарный азот, который образуется на поверхности обрабатываемого изделия вследствие диссоциативной рекомбинации молекулярного иона азота. В дальнейшем, вследствие хемосорбции, атомы азота вступают в реакцию с металлом, либо образуя нитрид железа (или нитриды легирующего элемента), либо диффундируют в глубь металла. Последовательность формирования фаз в сталях и чугунах при ИПА следующая: $\alpha \rightarrow \gamma' (\text{Fe}_4\text{N}) \rightarrow \epsilon (\text{Fe}_{2,3}\text{N})$.

Варьируя состав газа, давление, температуру и время обработки, можно получать азотированные слои заданной структуры и фазового состава, например, чисто диффузионные слои, без нитридной зоны, либо слои с нитридной зоной. В зависимости от условий азотирования нитридный слой может быть либо γ' -фазой, либо $\gamma'+\epsilon$ -фазой, причем γ' -нитридный слой является износостойким и относительно пластичным, а ϵ -слой — коррозионно-стойким.

Собственный и мировой опыт азотирования различных марок сталей показал, что, управляя алгоритмом изменения плотности потока азота в ходе процесса, можно формировать на сталях глубокие слои, причём использование в качестве рабочей среды смеси газов $\text{H}_2 + \text{N}_2 + \text{Ar}$ даёт существенно лучшие результаты, чем применение аммиака NH_3 .

Параметром, характеризующим интенсивность процесса ИПА, является плотность потока, диффундирующего в сталь азота, которая является функцией параметров разряда (плотности тока и напряжения) и заданного расхода азота и может изменяться в ходе процесса по любому алгоритму в зависимости от марки стали и требований к азотированному слою. Для каждой марки стали существует определённый диапазон значений плотности потока азота, обеспечивающий предельную концентрацию азота в α -твёрдом растворе. При этом на поверхности не образуется нитридный γ' — слой, замедляющий диффузию азота в глубь металла. Получение в поверхностном слое стали предельной (по растворимости) концентрации азота C_α^N обеспечивает ускоренный рост зоны внутреннего азотирования. С другой стороны, в зависимости от температуры процесса и суммарной площади поверхности изделий, заданной плотности потока азота соответствует определённое время, в течение которого азот эффективно поглощается поверхностью деталей без образования белого слоя.

Используемые для ИПА рабочие давления — это диапазон устойчивого существования аномального тлеющего разряда. Конкретное значение величины рабочего давления зависит от суммарной обрабатываемой площади деталей, их геометрии, а также температуры процесса и мощности разряда. Для эффективного управления процессом ИПА на промышленном оборудовании необходимо знать характер взаимосвязи мощности разряда и давления газа в рабочей камере в зависимости от степени ее загрузки, поскольку мощность (ток разряда и напряжение), помимо обеспечения разогрева садки и поддержания ее температуры на стадии выдержки, также определяет и химическую активность разряда.

Теоретический анализ проблемы энергоэффективности ионного азотирования

Энергетические параметры оборудования для азотирования оказывают решающее влияние на экономические параметры, так как составляют основную долю в расходах на проведение процесса. Нами разработана методика определения электрической мощности, которую необходимо вкладывать в разряд для обеспечения необходимого темпа разогрева садки различной массы в разных температурных интервалах, а также мощности, обеспечивающей постоянство температуры садки на стадии выдержки.

Основной конструктивной частью установки ИПА является вакуумная камера. Стенка камеры может быть «холодной», охлаждаемой водой, либо «горячей», с дополнительными резистивными нагревателями, расположенными внутри или снаружи основной стенки.

В нашей работе определение энергетических характеристик процесса ИПА базируется на анализе энергетического баланса системы «садка — стенка камеры» на разных стадиях процесса азотирования — при разогреве садки и ее изотермической выдержке для камер с холодными и горячими стенками. Предполагается, что в тлеющем разряде мощность, выделяющаяся на катоде (самих изделиях), определяется в основном энергией, приносимой положительными ионами и «быстрыми» молекулами и атомами, образующимися при перезарядке в области катодного падения потенциала. Согласно [1], доля мощности, идущая на разогрев катода (садки), составляет от 0,8 до 0,9 от общей мощности разряда $P_{эл} = U \cdot I \cdot k$, где U — напряжение; I — ток разряда; k — коэффициент скважности (для пульсирующего разряда). Для оценки можно использовать среднее значение (0,85). В случае камеры с «горячими» стенками дополнительным источником тепла при нагреве и выдержке садки являются нагреватели на стенке, поэтому в таких камерах доля энерговклада от разряда может быть как больше, так и меньше, чем в установках с «холодными» стенками.

Потери тепла, которое садка аккумулирует при ее разогреве и на стадии выдержки, обусловлены, прежде всего, теплообменом между садкой и стенками рабочей камеры вследствие теплового излучения. Для установок с холодными водоохлаждаемыми стенками их температура постоянная и не превышает 45 °С (по требованию ГОСТа), а излучающей считается поверхность, огибающая нагреваемую садку. При обработке шестерен с зубом на внутреннем венце азотируемая площадь может быть существенно больше площади, участвующей в теплообмене со стенками камеры. При разогреве садки необходимо также учитывать увеличение теплоемкости стали с ростом температуры. Для установок с «горячими» стенками температура внутренней стенки поддерживается нагревателями, однако она должна иметь определенное значение, так как часть тепла на стенку поступает также и от садки вследствие излучения.

При разогреве садки энергия расходуется на повышение теплосодержания деталей в садке и оснастки (если таковая используется), а также экранов и стенки камеры.

Если задан темп разогрева, то уравнение баланса энергии при разогреве садки имеет вид:

$$cm \frac{dT}{dt} = P_{НАГР} - P_{ОХЛ}, \quad (1)$$

где c — теплоемкость стали (для углеродистой стали в интервале температур 50–550 °С ее среднее значение $c = 0,162 \text{ Вт} \cdot \text{ч} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{К}^{-1}$, для оценочных расчетов можно использовать среднее значение теплоемкости стали, при более точных расчетах необходимо учитывать температурную зависимость теплоемкости); $\frac{dT}{dt}$ — темп разогрева, °С/ч; m — масса садки, кг; $P_{НАГР}$ и $P_{ОХЛ}$ — соответственно мощность, идущая на нагрев садки и теряемая ею при охлаждении вследствие теплообмена со стенками.

Примем, в соответствии с [1], $P_{НАГР} = \Psi P_{эл}$, где $\Psi \approx 0,85$, а $P_{ОХЛ} = Q_{(с,ст)э}$, где поток излучения от садки с излучающей площадью F_c с температурой T_c к стенке, имеющей температуру $T_{ст}$, при наличии теплозащитных экранов [7]:

$$Q_{(с,ст)э} = C_o A_{(с,ст)э} F_c \left[\left(\frac{T_c}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{ст}}{100} \right)^4 \right], \quad (2)$$

где $A_{(C,CT)Э}$ — приведенный коэффициент поглощения рассматриваемой излучающей системы, имеющий различные значения для случая цилиндрических и плоских экранов; $C_0 = 5,67 \text{ Вм}/\text{м}^2\text{К}^4$ — константа излучения черного тела.

Как следует из выражения (2), поток излучения зависит от разности температур излучающего тела (в нашем случае садки) и стенки камеры (либо экрана), площади излучающей поверхности и приведенного коэффициента поглощения. В таблице 1 приведены значения величины

$$P = C_0 F_C \left[\left(\frac{T_C}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{CT}}{100} \right)^4 \right] \text{ для различных температур садки при } T_{CT} = 40 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Т а б л и ц а 1

Расчетные значения величины P при различных температурах садки

$T_C, \text{ }^\circ\text{C}$	50	100	160	200	260	300	360	400	460	500	540	560	580
$\Theta = (T/100)^4$	109	194	352	501	807	1078	1606	2050	2885	3570	4370	4815	5295
$P, \text{ кВт}$	0,07	0,56	1,45	2,3	4,0	5,56	8,56	11,08	15,81	19,7	24,23	26,76	29,48

Из (1) и (2) необходимая электрическая мощность при разогреве садки имеет вид:

$$P_{эл} = 1,18 \cdot \left(cm \frac{dT}{dt} + Q_{(C,CT)Э} \right), \quad (3)$$

а при выдержке, когда $T = \text{const}$,

$$P_{эл} = 1,18 \cdot Q_{(C,CT)Э}. \quad (4)$$

Для камеры с «горячей» стенкой величина $A_{(C,CT)}$ определяется следующим образом [3]:

$$A_{(C,CT)} = 1 / (\varepsilon_C^{-1} + (\varepsilon_{CT}^{-1} - 1) (F_C / F_{CT})), \quad (5)$$

где ε_C и ε_{CT} — соответственно, степень черноты садки и стенки; F_C и F_{CT} — площадь излучающей поверхности садки и стенки соответственно.

В случае камеры с «холодными» стенками для системы цилиндрических экранов

$$A_{(C,CT)} = 1 / (\varepsilon_{12}^{-1} + \sum (F_C / F_{Эi}) (2 / \varepsilon_{Эi}^{-1} - 1) + F_C / F_{CT}), \quad (6)$$

где ε_{12} — приведенная степень черноты системы; $F_{Эi}$ и $\varepsilon_{Эi}$ — площадь и степень черноты соответствующего i -го экрана и для системы n плоских экранов (основание и верх камеры):

$$A_{(C,CT)} = 1 / (\varepsilon_C^{-1} + 2 \sum \varepsilon_{Эi}^{-1} + \varepsilon_{CT}^{-1} - (n + 1)). \quad (7)$$

Таким образом, при расчете потока тепла от садки к стенке для камеры с «холодными» стенками необходимо определить поток тепла от боковой поверхности садки и от ее нижней и верхней части.

Сравнение результатов расчета и экспериментальных данных

Расчет и экспериментальные исследования проводились применительно к опытному оборудованию с камерой от установки ННВ-6.6-И1 (рабочее пространство: диаметр 410 мм и высота загрузки 400 мм) и оборудованию промышленного типа с камерой колпакового типа (соответственно, 950 мм и 1250 мм). Обе камеры имеют водоохлаждаемый кожух, камера опытной установки — экранную теплоизоляцию (2 экрана), камера промышленной установки — 3 теплозащитных экрана. Мощность разряда на опытной установке — до 15 кВт, на промышленной — до 50 кВт, при этом максимальное напряжение горения разряда — не более 700 В. Загрузка камеры опытной установки — до 100 кг, промышленной — до 1000 кг.

Принимаем следующие значения величин ε [8–10]: $\varepsilon_C = 0,4$; $\varepsilon_{CT} = 0,6$; $\varepsilon_{Э1} = 0,6$; $\varepsilon_{Э2} = 0,56$ и $\varepsilon_{Э3} = 0,45$. При расчете $P_{эл}$ для установки промышленного типа использованы значения темпа разогрева 200, 240 и 300 градусов в час, масса садки вместе с оснасткой составляла 515 кг, излучающая площадь садки $F_C = 4,2 \text{ м}^2$ при ее общей площади $F_C = 10 \text{ м}^2$.

На рисунке 1 представлены результаты расчета и измерения электрической мощности при разогреве. Цифры у кривых — экспериментально определенная скорость разогрева. Как видно, методика с достаточно хорошей точностью позволяет определить величину мощности, необходимой для разогрева садки и ее выдержки при постоянной температуре.

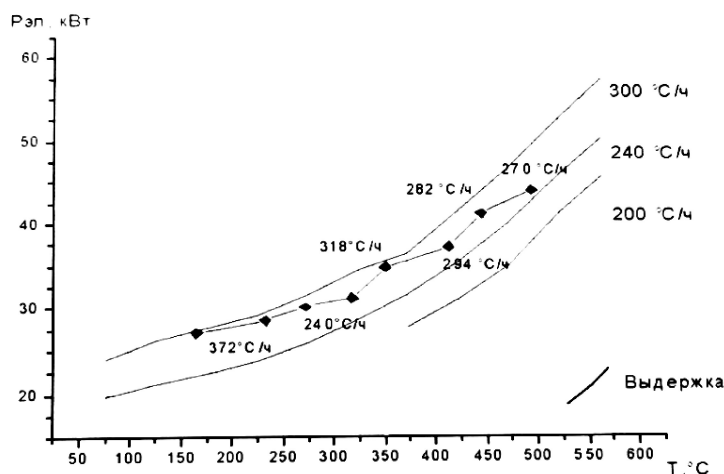


Рисунок 1. Расчетные и экспериментальные значения мощности при разогреве и выдержке садки деталей

В таблице 2 приведены расчетные значения мощности при разогреве садки массой 100 кг на опытной установке. При изотермической выдержке расчетные значения мощности существенно ниже: при 500 °С – 3,76 кВт, 540 °С – 4,62 и 560 °С – 5,12 кВт.

Таблица 2

Расчетное значение мощности ($P_{эл}$, кВт) при разогреве садки массой 100 кг с различным темпом разогрева до температуры T

$T, ^\circ\text{C}$	Темп разогрева, $^\circ\text{C}/\text{ч}$		
	200	240	300
100	3,93	4,7	5,84
200	4,26	5,03	6,17
300	4,89	5,66	6,8
400	5,94	6,71	7,85
500	7,58	8,35	9,49
540	8,44	9,21	10,35
560	8,94	9,71	10,85

Расчеты, проведенные для установки промышленного типа для различного количества теплозащитных экранов (1, 2 и 3), показали, что наличие в камере трех экранов снижает расход электроэнергии на стадии разогрева на 30–90% по сравнению с двумя или одним экраном. Из соотношения (2) получены также расчетные значения температуры внутреннего, обращенного к садке экрана, в зависимости от температуры садки. Измерения с помощью термопары показали, что при температуре садки 530–540 °С температура внутреннего экрана поддерживается на уровне 440–450 °С, что соответствует температуре внутренней «горячей» стенки в установках с косвенным подогревом (фирмы «Eltro», «Platag», «Rübig» и др.). Высокая температура внутреннего экрана обеспечивает однородность температурного поля в садке и низкий расход электроэнергии. Так, например, при обработке упомянутой выше садки на стадии выдержки затрачиваемая на поддержание разряда мощность составляет всего 18–18,5 кВт, или 35–36 Вт/кг. В установках ИПА, имеющих 1 или 2 экрана, затраты мощности на поддержание разряда выше, так как теплообмен со стенками камеры интенсивнее и, соответственно, температура внутреннего экрана ниже, что приводит к существенному градиенту температуры садки в радиальном направлении.

Экспериментально установлено, что чем полнее загружена камера, тем меньше удельный расход электроэнергии для обеспечения необходимой глубины азотированного слоя. При этом удельные энергозатраты составляют 0,6–1,6 кВт·ч/кг в зависимости от загрузки камеры при температуре садки 525–530 °С. На рисунке 2 приведен удельный расход электроэнергии при обработке шестерен с внутренним зубом в камере диаметром 950 мм и высотой загрузки 1800 мм.

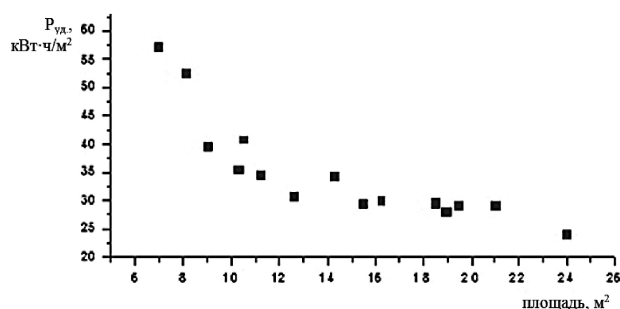


Рисунок 2. Зависимость удельной мощности разряда на выдержке от величины площади поверхности садки

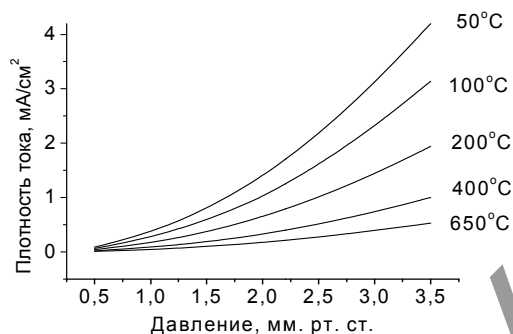


Рисунок 3. Зависимость нормальной плотности тока от температуры катода

Полученные из (3) и (4) значения $P_{Эл}$ позволяют определять диапазон рабочих давлений при разогреве и выдержке, чтобы, во-первых, обеспечивалось плотное «облегание» разрядом поверхности изделий и получение равномерного азотированного слоя и, во-вторых, разряд оставался аномальным, т.е. чтобы выполнялось условие $J_{РАЗР} \geq J_H^{N_2}(P, T)$, где $J_{РАЗР}$ — плотность разрядного тока, а $J_H^{N_2}$ — нормальная плотность тока для азота — компонента рабочей смеси, имеющего максимальное значение J_H при конкретных значениях давления в камере и температуры садки. На рисунке 3 приведены значения J_H для азота, рассчитанные по формуле из [14], применяемой для разрядов с плоскими электродами:

$$J_H = 0,4 \left(\frac{P}{P_H} \frac{T_H}{T} \right)^2 \frac{\text{МА}}{\text{см}^2}, \quad (8)$$

где P — рабочее давление, $P_H = 133$ Па (1 мм рт. ст.); $T_H = 300$ К; T — температура газа в катодной области разряда, которая принималась равной температуре катода.

Как видно из представленных данных, по мере повышения температуры в камере снижается плотность тока, обеспечивающая существование разряда в виде аномального при одинаковом давлении. С другой стороны, при одинаковой температуре рост давления в камере приводит к повышению плотности тока, что необходимо учитывать при выборе режима обработки.

Сравнение реальной плотности тока при обработке различных по массе и площади поверхности садок при температуре 530 °С с расчетной для данной температуры показало, что чем ниже рабочее давление, тем большую «степень аномальности» разряда $K = J_{эксн} / J_{расч}$ можно обеспечить при одинаковой температуре садки. Например, при $P = 190$ Па величина $K = 3,7$, а при $P = 354$ Па — $K = 1,19$. Чем выше рабочее давление, тем больше шансов разряду быть частично «аномальным» и частично «нормальным», когда не вся поверхность садки может быть охвачена разрядом. Это необходимо учитывать при разработке конкретных режимов ИПА на промышленном оборудовании.

Выбор марки стали для изготовления детали с последующим использованием ИПА как упрочняющей обработки определяется уровнем требуемой конструкционной прочности, технологичностью механической и термической обработки, объемом производства и стоимостью материала. Азотированию могут подвергаться детали из самых разных марок сталей, а количество поглощенного азота, тип и количество выделившихся нитридов определяют степень повышения твердости стали при азотировании. Перепад твердости от поверхности к сердцевине детали тем резче, чем выше в стали содержание нитридообразующих легирующих элементов (Ti, Al, Cr, V, Mo, Si), причём некоторые элементы (Ti, Cr, W, V, Mo) увеличивают растворимость азота в α -твёрдом растворе $C_{\alpha-Fe}^{лер}$, а Ni и Si снижают её (Al — не изменяет растворимость).

При выборе марки стали необходимо иметь в виду следующее:

- за сопротивление износу и коррозии отвечает в первую очередь нитридный слой — его глубина и строение (то есть процентное содержание азота в слое);
- сопротивление механическим нагрузкам (статическим, изгибающим, знакопеременным, ударным и др.) определяется структурой зоны внутреннего азотирования, то есть диффузионным слоем и твердостью сердцевины изделия, задаваемой предварительной термообработкой;

- близкая к линейной зависимость износостойкости от твердости азотированного слоя полностью соблюдается только в случае абразивного износа, поэтому для снижения износа необходимо использовать сталь с возможностью получения максимальной твердости слоя (например, сталь 38Х2МЮА упрочняется до 1000–1100 HV);
- для деталей, работающих в условиях трения скольжения или качения при наличии смазки, оптимальный диапазон твердости азотированного слоя обеспечивают низко-, средне- и высоколегированные конструкционные стали.

Установки для ИПА в постсоветских странах. Оборудование и технологии ФТИ

Оборудование для ИПА изготавливается рядом фирм в Европе и мире — ELTRO, IPSEN, PlaTeG (Германия), RUBIG (Австрия), Ionitech (Болгария), ВНИИЭТО (Россия) и др. Установки производства некоторых перечисленных фирм эксплуатируются на ряде предприятий Казахстана, России и Украины. В Беларуси оборудование ИПА применяется на таких крупных машиностроительных предприятиях, как Минский завод колесных тягачей (ОАО «МЗКТ»), ОАО «БелАЗ», ОАО «МАЗ», ПО «Гомсельмаш», ОАО «Могилевлифтмаш». Трём последним предприятиям установки производства ФТИ поставлены в 2012–2013 гг. При этом на заводе самоходных комбайнов «Гомсельмаш» эксплуатируются три установки ИПА с размерами вакуумных камер 950 мм (диаметр внутреннего рабочего пространства)/1250 (высота рабочего пространства), 950/2200 и 1400/2000 мм.

Оборудование для ионного азотирования производства ФТИ — автоматизированное, установки имеют широкий спектр технологических программ, позволяющих обрабатывать всю номенклатуру деталей из разных марок сталей и чугунов, предусмотренную заданием. В качестве рабочей газовой среды используются смеси азота, аргона и водорода в различной пропорции (в зависимости от марки стали, загрузки камеры и температуры процесса). Водород получается автономно путем электролиза дистиллированной воды. Возможна также подача метана, пропан-бутана или ацетилена.

На белорусских предприятиях накоплен значительный опыт по упрочнению большой номенклатуры изделий из различных марок сталей: цементируемых, низко- и среднелегированных (18ХГТ, 20ХНЗА, 20ХГНМ, 25ХГТ и др.), улучшаемых (40Х, 40ХН, 40ХФА, 40ХН2МА, 40ХМФА, 38ХМ, 38ХНЗМФА, 38Х2Н2МФА, 30Х2НМ и др.), азотируемых (38ХМЮА, 38Х2МЮА, 30Х3МФ и др.), инструментальных (4Х5МФС, Х12М, Х12МФ, 5ХНМ и др.), а также чугунов. При обработке на оборудовании ФТИ глубина азотированного слоя на деталях составляет 0,3–0,5 мм с заданной твердостью (HV450–1250 в зависимости от марки стали) независимо от объема загрузки камеры деталями. При необходимости может быть получен слой 0,6–0,8 мм с тонкой нитридной зоной. На изделиях из стали 18ХГТ (валы, шестерни) обеспечивается глубина упрочненного слоя 0,4–0,45 мм при твердости поверхности 670–750 HV 0,5; из стали 40Х (шестерни, валы), соответственно 0,37–0,4 мм и 590–640 HV0,5; из стали 38Х2МЮА (шестерни) — до 0,4 мм и 870–950 HV0,5; на изделиях из листовой горячекатаной стали 25ХГСА и 30ХГСА — 0,4 мм и 650–700 HV 0,5. Эти характеристики азотированного слоя обеспечиваются выбором режима обработки по давлению в камере, концентрации азота в рабочей газовой смеси, параметрами разряда и алгоритмом изменения концентрации азота в ходе процесса и автоматизированным управлением режима обработки.

Технология ИПА используется на производстве вместо цементации и нитроцементации (шестерни и валы), ТВЧ-закалки (валы, цилиндры) и объемной закалки (детали из листовой стали), а также может использоваться взамен газового азотирования и нитратирования (т.е. азотирования в смеси аммиака и природного газа при повышенных температурах).

Многие детали, прежде всего шестерни и валы, изготавливаются в окончательный размер и после ИПА не требуют обработки (для сравнения, после цементации проводится шлифовка, а после ТВЧ-закалки — рихтовка). Детали из листовой стали перед ИПА после механической обработки подвергаются дробеструйной обработке и отмывке в моющем растворе с наложением ультразвука. Геометрические размеры этих деталей после ИПА не изменяются, что в значительной мере облегчает сборочные операции.

В 2012 году нами создано оборудование для ионного азотирования, отличительным признаком которого является возможность изменения геометрии рабочей камеры (рис. 4). Внутреннее рабочее пространство имеет следующие габариты: диаметр 950 мм, а высота загрузки может составлять 1400 и 3000 мм. Благодаря этому на установке возможна обработка широкого спектра деталей, в том числе длинномерных.



Рисунок 4. Установка УА-63-950/3000 с изменяемой геометрией рабочей камеры



Рисунок 5. Установка УА-100-1400/2000

Система управления реализована на основе отечественного специализированного контроллера, что дает ряд преимуществ, особенно при обработке широкой номенклатуры изделий, а также при обработке режимов упрочнения деталей из новых марок сталей. Такие комплексы управления работой успешно функционируют на установках, эксплуатируемых на ряде перечисленных предприятий в Беларуси, а также в России.

Для ОАО «Могилевлифтмаш» нами создано оборудование (рис. 5) и разработана технология ИПА деталей «червяк» из стали 40Х. Детали имеют длину от 432 до 769 мм и массу от 9,6 до 18,7 кг. До освоения технологии ИПА упрочнение отдельных участков изделий проводили лазерной закалкой, на поверхности зубьев формировали упрочненные дорожки, которые накладывались друг на друга с перекрытием. Глубина упрочненного слоя составляла 0,5–0,96 мм.

Перспективы промышленного применения ИПА

Азотированию могут подвергаться детали и инструменты с габаритными размерами от нескольких миллиметров до изделий длиной до 14 м и массой до 26 т [2–4] многих отраслей промышленности, в том числе:

- цилиндры, плунжеры, валы, оси, прецизионные винты, шпиндели, пиноли и направляющие в станкостроении и нефтехимическом машиностроении;
- экструзионные шнеки, цилиндры, матрицы, пресс-формы и другие детали машин для переработки пластмасс и получения алюминиевого профиля;
- различные виды зубчатых колес общего машиностроения и автомобильной индустрии;
- ковочные штампы и пресс-формы для литья металлов и сплавов под давлением;
- режущие инструменты: фрезы, долбяки, сверла и т.п.;
- ответственные прецизионные детали авиадвигателей из титановых сплавов;
- пружины клапанные и тарельчатые.

Мировой и собственный опыт использования ИПА показывает, что его можно применять также для упрочняющей обработки непрерывно работающих зубчатых колес с максимальным напряжением изгиба у основания зуба 400–550 МПа, а ресурс работы упроченной методом ИПА поверхности в 2–5 раз выше по сравнению с поверхностно-закаленной ТВЧ. Следует иметь в виду, что при обработке зубчатых колес методом ТВЧ-закалки в поверхностном слое возникают очень высокие поверхностные напряжения, приводящие к образованию микротрещин, которые выявляются при эксплуатации и приводят к разрушению зуба.

Заключение

В ФТИ НАН Беларуси созданы новые подходы к созданию инновационного оборудования для реализации энергосберегающих технологий ионно-плазменного азотирования деталей машиностроения и инструмента.

Разработана методика оптимизации энергетических характеристик реального промышленного оборудования, основанная на анализе энергетического баланса системы «садка — стенка камеры» на разных стадиях процесса азотирования — при разогреве садки и ее изотермической выдержке для камер с холодными и горячими стенками.

Основным отличием ИПА, которое выгодно выделяет его на фоне других методов высокотемпературных ХТО (цементация, нитроцементация и т.д.), является более высокое качество продукции благодаря малым деформациям и короблению деталей. Это связано с отсутствием фазовых превращений в стали в процессе насыщения поверхности азотом и низкими температурами процесса. Значительно меньшие деформации (или их полное отсутствие) позволяют исключить из технологической цепочки этап финишного шлифования изделия в заданный размер (за исключением прецизионных и особо ответственных деталей). Кроме этого, азотирование обладает еще рядом достоинств, среди которых необходимо выделить высокую твердость азотированного слоя, высокое сопротивление упрочненного материала усталости, изнашиванию, задиру и схватыванию, теплостойкость слоя до 500–600°C, коррозионную стойкость.

Важное преимущество ИПА по сравнению с классическим газовым — отсутствие опасности появления хрупкого слоя на поверхности изделий, короткое время обработки и возможность формирования на деталях из разных марок сталей азотированных слоёв заданного состава и глубины. Как показывает мировой и накопленный нами опыт, применение технологии ИПА взамен цементации, нитроцементации, газового или жидкостного азотирования, объёмной или ТВЧ-закалки позволяет экономить основное оборудование и производственные площади, снизить станочные и транспортные затраты, уменьшить расход электроэнергии и активных газовых сред. Кроме того, процесс ИПА, в отличие от газового азотирования, обеспечивает полную экологическую безопасность.

Создана гамма установок с широким диапазоном мощности разряда и размерами рабочего пространства вакуумной камеры. Оборудование поставлено на ряд крупных машиностроительных предприятий Беларуси и России. Авторы надеются, что и в Казахстане найдутся предприятия, заинтересованные во внедрении новых инновационных технологий и оборудования. Мы всегда готовы к сотрудничеству.

Список литературы

- 1 *Marciniak A.* Non-uniform Heating Effects During Treatment in a Glow Discharge // *Thin Solid Films.* — 1988. — Vol. 156. — P. 337–344.
- 2 *Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А.* Ионная химико-термическая обработка сплавов. — М.: Изд. МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. — 400 с.
- 3 *Чаттерджи-Фишер Р., Эйзелл Ф.-В., Хоффманн Р. и др.* Азотирование и карбонитрирование. — М.: Металлургия, 1990. — 280 с.
- 4 *Лахтин Ю.М., Коган Я.Д., Шлис Г.И. и др.* Теория и технология азотирования. — М.: Металлургия, 1991. — 320 с.
- 5 *Андреев А.А., Шулаев В.М., Саблев Л.П.* Азотирование сталей в газовом дуговом разряде низкого давления // *Физическая инженерия поверхности.* — 2006. — Т. 4. — № 2, 3. — С. 191–197.
- 6 *Босяков М.Н., Жук Д.В., Назарова О.И., Поболь И.Л.* Промышленное применение упрочняющей обработки деталей машин и механизмов методом ионного азотирования // *Сварщик.* — 2011. — № 5. — С. 28–33.
- 7 *Исаченко В.П., Осипова В.А., Сукомел А.В.* Теплопередача. — М.: Энергоиздат, 1981. — 415 с.
- 8 *Мастрюков Б.С.* Теория, конструкции и расчеты металлургических печей. — Т. 2. Расчеты металлургических печей. — М.: Металлургия, 1986. — 376 с.
- 9 *Свенчанский А.Д.* Электрические промышленные печи. — Ч. 1. Электрические печи сопротивления. — М.: Энергия, 1975. — 384 с.
- 10 *Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.* Теплообмен излучением: Справочник. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 432 с.
- 11 *Архипенко В.И., Згировский С.М., Кириллов А.А., Симончик Л.В.* Параметры области катодного падения потенциала самостоятельного нормального тлеющего разряда в гелии при атмосферном давлении // *Физика плазмы.* — 2002. — Т. 28. — № 10. — С. 930–938.

М.Н.Босьяков, С.В.Бондаренко, Д.В.Жук, А.А.Козлов, И.Л.Поболь

Машиналар мен механизмдердің бөлшектерін беріктендіруге арналған иондық-плазмалық азоттандыру құрылғылары және оларды қолдану

Белоруссияның Ұлттық ғылым академиясының ФТИ-да машинажасау мен механизмдердің бөлшектерін беріктендіруге арналған иондық-плазмалық азоттандыру құрылғыларын жасаудың инновациялық жолдары ойлап табылды. Қуаты мен вакуумдық камераның жұмыс кеңістігінің көлемі жөнінен кең диапазондағы бірқатар құрылғылар жасалды. Құрылғылар бірқатар ірі кәсіпорындарда қызмет көрсетуде. Мақалада өндірістік құрылғының энергетикалық сипаттамаларын оптимизациялаудың әдістемелері мен иондық-плазмалық өңдеу жасалған өндірістік бұйымдардың мысалдары келтірілген.

M.N.Bosyakov, S.V.Bondarenko, D.V.Zhuk, A.A.Kozlov, I.L.Pobol

The equipment and application of ionic-plasma nitriding for hardening of details of cars and mechanisms

New approaches are developed at the Physical Technical Institute of NAS of Belarus for designing of innovative equipment intended for realization of energy saving technologies such as ion plasma nitriding of machine parts and tools. The spectrum of setups designed possesses a wide range of vacuum chamber, discharge powers and working dimensions. The equipment is delivered to some leading machine-building enterprises. The operation procedure is presented for optimization of energy parameters of actual industrial equipment as well as examples of parts subjected to ion plasma nitriding.

References

- 1 Marciniak A. *Non-uniform Heating Effects During Treatment in a Glow Discharge* // Thin Solid Films, 1988, vol. 156, p. 337–344.
- 2 Arzamasov B.N., Bratuhin A.G., Eliseev J.S. Panajoti T.A. *Ionic himiko-thermal processing of alloys*, Moscow: Publ. house of MG TU of a name N. Bauman, 1999, 400 p.
- 3 Chatterdshi-Fisher P., Azell F.-B., Hoffman P. et al. *Warmebehandlung von Eisenwerkstoffen*, Moscow: Metallurgy, 1990, 280 p.
- 4 Lahtin J.M., Kogan J.D., Shpis G.I., et al. *The theory and technology of nitriding*, Moscow: Metallurgy, 1991, 320 p.
- 5 Andreev A.A., Shulaev V.M., Sablev L.P. *Nitriding of steels in the gas arc category of low pressure* // Physical engineering of a surface, 2006, vol. 4, No. 2–3, p. 191–197.
- 6 Bosyakov M.N., Zhuk D.V., Nazarov O.I., Pobol I.L. *Industrial application of strengthening processing of details of cars and mechanisms a method of ionic nitriding* // Welder, 2011, No. 5, p. 28–33.
- 7 Isachenko V.P., Osipov V.A., Sukomel A.V. *Heat transfer*, Moscow: Energoizdat, 1981, 415 p.
- 8 Mastrjukov B.S. *The theory, designs and calculations of metallurgical furnaces*, vol. 2, Moscow: Metallurgy, 1986, 376 p.
- 9 Svenchansky A.D. *Electric industrial furnaces*. Part 1. Electric furnaces of resistance, Moscow: Energy, 1975, 384 p.
- 10 Bloh A.G., Zhuravlev J.A., Ryzhkov L.N. *Heat exchange by radiation: The directory*, Moscow: Energoatomizdat, 1991, 432 p.
- 11 Arhipenko V.I., Zgirovskij S.M., Kirillov A.A., Simonchik L.V. *Parametres of area of cathodic falling of potential of the independent normal decaying category in helium at atmospheric pressure* // Physics of plasma, 2002, vol. 28, No. 10, p. 930–938.