ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ И ДИФФУЗИОННЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ АЗОТИРОВАНИИ ЗУБЧАТЫХ КОЛЕС В ВАКУУМНОЙ СРЕДЕ

Холмирзаев Жасурбек Юлдашбоевич

Андижанский государственный технический институт, кафедра альтернативных источников энергии

Аннотация: В данной работе моделирование процессов при ионном азотирование проводилось с помощью программного пакета. Это интерактивная среда моделирования для расчета большинства научных и инженерных задач на основе дифференциальных уравнений в частных производных, решаемые методом конечных элементов.

Ключевые слова: моделирование дифференциальные уравнения, методом конечных элементов, азотирования, ускорение, процесса диффузия скорость, время обработки.

Abstract: In this study, ion nitriding processes were modeled using a software package. This is an interactive modeling environment for calculating most scientific and engineering problems based on partial differential equations solved using the finite element method.

Keywords: Modeling differential equations, finite element method, nitriding, acceleration, diffusion process speed, processing time.

Annotatsiya: Ushbu tadqiqotda ion nitridlash jarayonlari dasturiy ta'minot to'plami yordamida modellashtirilgan. Bu chekli elementlar usuli yordamida hal qilingan qisman differentsial tenglamalar asosida ko'pgina ilmiy va muhandislik muammolarini hisoblash uchun interaktiv modellashtirish muhiti.

Kalit so'zlar: differensial tenglamani modellashtirish, chekli elementlar usuli, nitridlash, tezlanish, diffuziya jarayoni tezligi, ishlov berish vaqti.

Введение

На сегодняшний день большинство машиностроительных предприятий для увеличения износостойкости выпускаемых деталей применяют процесс ионного азотирования в тлеющем разряде. Среди всего множества деталей упрочнению часто подвергаются длинномерные, крупногабаритные детали, работающие в условиях локального износа. В таких случаях целесообразно использовать методы локального ионного азотирования [2].

Ионное азотирования позволяет проводить локальное ускорение процесса диффузионного насыщения, что позволяет в конечном итоге сократить время обработки. Одновременно с выигрышем во времени упрощается и сам процесс обработки.

ISSN 3030-3907

Таким образом существует необходимость математического описания и компьютерного моделирования отдельных этапов процесса ионного азотирования позволяющий более надежно управлять за ходом процесса и проводить предварительные расчеты результатов обработки, без дополнительных экспериментов.

Известно [3,4], что при традиционном ионном азотировании нагрев обрабатываемой детали происходит за счет бомбардировки поверхности высокоэнергичными ионами рабочего газа. При этом температура и скорость нагрева зависят от концентрации ионов насыщающего элемента n_i в прикатодной области (или плотности ионного тока j_i) и от разности потенциалов U между электродами.

При ионного азотирования происходит неравномерный нагрев обрабатываемой детали. Это связано с тем, что скорость нагрева и, следовательно, температура поверхности выше, чем в остальных участках детали [5]. При этом расчет времени нагрева обрабатываемого участка детали до температуры диффузионного насыщения осложняется в результате процесса переноса внутренней энергии от более нагретых частей детали к менее нагретым. Известно [6], что температура при азотировании играет большое значение в активации процесса диффузии азота в металл и за формирование диффузионного слоя. Поэтому на сегодняшний день проведение моделирования тепловых и диффузионных процессов при ионном азотирования является актульной задачей. Получение более полного представления о процессах, протекающих в поверхностном слое материала во время обработки, даст возможность повышения эффективности азотирования за счет назначения оптимальных технологических режимов.

Основная часть

С целью прогнозирования температуры поверхности детали и толщины упрочненного слоя при ионного азотирования была разработана компьютерная модель, позволяющая проводить предварительные расчеты результатов обработки, без дополнительных экспериментов для деталей любых конфигураций. Для этого необходимо загрузить в COMSOL Multiphysics объемную трехмерную модель детали, выполненную в программе Solid Works и указать поверхности. Компьютерная модель объединяет в себе описание тепловых и диффузионных процессов.

Для описания температурного поля в модели используется уравнение теплопроводности [7]:

ISSN 3030-3907

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \quad (1)$$

где ρ - плотность материала, *кг/м*^{3};

C – удельная теплоемкость, *Дж/(кг·К)*; T – температура, *К*;

t – время, *с*;

k – коэффициент теплопроводности, *Вт/(м·К)*; Q – удельный источник теплоты, *Вт/м*^{3}.

Для стали 38ХМЮА удельная теплоемкость составляет 585 *Дж/(кг·К)*, а коэффициент теплопроводности - 24 *Вт/(м·К)*.

Вектор теплового потока при передаче тепла теплопроводностью:

$$\rho \cdot C \frac{\partial T}{\partial t} + \nabla \cdot (-k\nabla T) = Q \quad (2)$$

При моделировании используются два различных типа граничных условий: типа Дирихле (граничные условия первого рода) и типа Неймана (граничные условия второго рода). Условие границы типа Дирихле используются, чтобы установить температуру на границе [8]:

$$T = T_0 \quad (3)$$

Условие типа Неймана используется, чтобы установить поток теплоты на границе [9]:

$$-n \cdot q = q_0 \quad (4)$$

где q – вектор потока теплоты;

n – нормальный вектор границы;

q_0– внутренний поток теплоты, нормаль к границе.

Модуль передачи теплоты «Heat Transfer» в COMSOL Multiphysics использует более общую формулировку уравнения (граничные условия третьего рода):

$$-n \cdot q = q_0 + h(T_{inf} - T) \quad (5)$$

где h – коэффициент теплоотдачи.

Эта формулировка позволяет явно определять поток теплоты через q_0 и коэффициент теплоотдачи h относительно искомой температуры T_{inf}.

При ионного азотирования ионного азотирования, помимо нагрева детали тепловым потоком, происходит одновременный отвод тепла от поверхности в окружающее пространство.

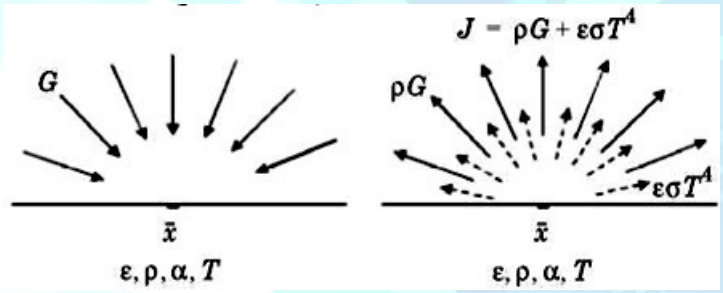
Отводом тепла конвекцией и теплопроводностью можно пренебречь, вследствие низкого давления в вакууме (процесс ионного азотирования

ISSN 3030-3907

проходит в интервале давлений 30-60 Па). Поэтому, единственным процессом отвода тепла при локальной обработке в вакууме является излучение [10, 11].

Рассмотрим точку x, которая расположена на непрозрачной поверхности с коэффициентом теплового излучения облучаемого тела ε, коэффициентом отражения ρ, с коэффициентом поглощения α и температурой T. Тело не прозрачно. Это означает, что никакая энергия через тело излучением не передается, что является истиной для большинства тел.

Полный излучающий поток теплоты, который достигает элементарной поверхности x, называют падающим тепловым потоком G (рис. 1, а) [12].



а) **б)**

Рисунок 1 - Поступление тепловой энергии (а), отвод тепловой энергии (б)

Полный излучающий поток теплоты, который x отдает, называют эффективным потоком J (рис. 1, б). Эффективный поток – сумма отраженного излучения и собственного испускаемого излучения [13]:

$$J = \rho \cdot G + \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (6)$$

Поглощенный телом поток теплоты:

$$q = G - J \quad (7)$$

Подставляя (6) в (7) получаем следующее выражение для поглощенного телом потока излучения [14]:

$$q = (1 - \rho) \cdot G - \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (8)$$

Помимо предположения, что поверхность является непрозрачной, также предполагаем, что поверхность является серой. Для серых поверхностей можем принять следующее [15]:

$$1 - \rho = \varepsilon \quad (9)$$

Подставляем (9) в (8), убираем коэффициент отражения в уравнении (8) и выражаем поглощенный внутрь тела поток излучения q:

$$q = \varepsilon \cdot (G - \sigma \cdot T^4) \quad (5.10)$$

Для расчета отвода тепловой энергии излучением от поверхности в окружающее пространство принимаем следующие допущения:

1. Окружающая среда, видимая поверхностью, имеет постоянную

ISSN 3030-3907

температуру T_{amb}.

2. Окружающая среда имеет свойства черного тела, то есть излучаемая и поглощаемая способности тела равны 1, а коэффициент отражения - нулю.

Эти предположения позволяют выразить падающий тепловой поток на поверхность как [16]:

$$q = \varepsilon \cdot (G - \sigma \cdot T^4) \qquad (11)$$

Вставив (11) в уравнение (10), получим уравнение излучающего потока теплоты от поверхности в окружающее пространство [17]:

$$q = \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T^4 - T^4)\, amb \qquad (12)$$

В качестве детали для моделирования процесса нагрева при ионного азотирования с ПК было выбрано зубчатое колесо (рис. 2). Выбор обоснован тем, что:

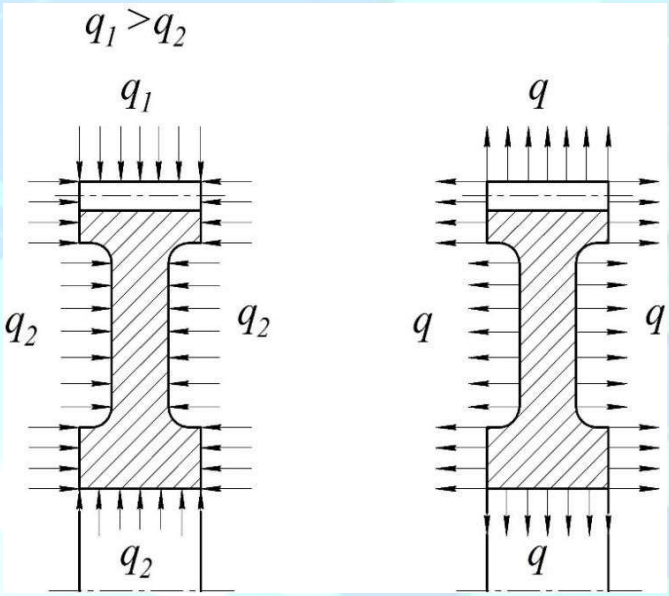
1. Этот тип деталей очень распространен в машиностроении и имеет массовый характер производства.
2. Этот тип деталей работает в условиях локального износа (контактная поверхность зубьев).



Рисунок 2 – Зубчатая колесо для моделирования процесса нагрева при ионном азотировании.

На рисунке 3 показа схема подвода (а) и отвода (б) тепловой энергии для детали зубчатое колесо.

ISSN 3030-3907



а) **б)**

Рисунок 3 - Схема подвода тепловой энергии от высокоэнергичных ионов насыщающего элемента на поверхность детали (а) и схема отвода тепловой энергии излучением от поверхности в окружающее пространство (б): q_1, q_2 – поток теплоты в тлеющем разряде в местах проявления q – поток теплоты от поверхности детали в окружающее пространство.

Тепловой поток в тлеющем разряде в местах можно выразить как:

$$q_1 = j_{i1} \cdot U \qquad (13)$$

где j_{i1} – плотность ионного тока под экраном, *мА/см*^{2}; U – разность потенциала между электродами, *В*.

Тепловой поток в тлеющем разряде:

$$q_2 = j_{i2} \cdot U \qquad (14)$$

где j_{i2} - плотность ионного тока в прикатодной области, *мА/см*^{2}.

Плотность тока в тлеющем разряде в прикатодной области при ионном азотировании составляет 1-3 *мА/см*^{2}. Доказано [18], что плотность тока в тлеющем разряде больше в ~3 раза, чем в обычном тлеющем разряде, и может достигать до 10 *мА/см*^{2}.

Для объяснения причины интенсификации процесса ионного азотирования рассмотрим процессы, происходящие на границе металл-газ. Реакции металлов с газами можно разделить на два широких класса – реакции, не приводящие к образованию химических соединений на поверхности (физическая адсорбция), и реакции с образованием этих соединений.

Трепнел [19] приводит следующие критерии отличия физической

ISSN 3030-3907

адсорбции от химической:

1. Физическая адсорбция протекает при более низких температурах чем хемосорбция и обусловлена слабыми Ван-дер-Ваальсовыми силами.
2. Хемосорбция в ряде случаев требует преодоления заметной энергии активации. Физическая адсорбция, если и требует, то весьма небольшой энергии активации, и поэтому обычно легко протекает при весьма низких температурах.
3. Хемосорбция всегда охватывает лишь один слой, так как после этого не остается ненасыщенных связей на поверхности твердого тела. Для физической адсорбции таких ограничений нет, так что при благоприятных сочетаниях давления и температуры образуются адсорбированные слои толщиной во много молекул, при этом первый слой молекул (частиц) газа может быть связан с поверхностью хемосорбцией, а последующие слои молекул (частиц) – силами физической адсорбции.
4. Хемосорбция обладает рядом специфических особенностей, которые зависят, в частности, от чистоты поверхности адсорбента. Для начала хемосорбции необходимо принять иногда чрезвычайные меры, чтобы получить достаточно чистую поверхность, в частности, очистить ее от загрязнений, обусловленных взаимодействием с атмосферой. Физическая адсорбция, напротив, при подходящих температурах и давлениях происходит на всех поверхностях.
5. Физическая адсорбция, по сравнению с химической, всегда обратима. На рис. 4 приведена зависимость изменения энергии двухатомного газа при физической адсорбции на поверхности металла.

ISSN 3030-3907

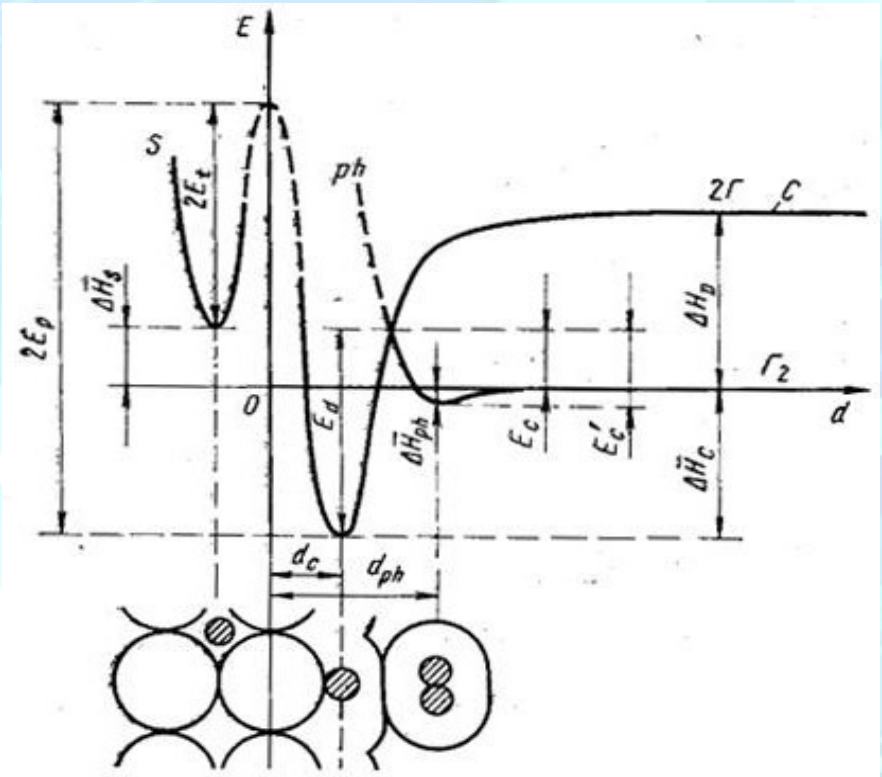


Рисунок 4 - Изменение энергии двухатомного газа при физической адсорбции оверхности металла

Потенциальная кривая *Ph* описывает физическую адсорбцию и характеризуется широким потенциальным минимумом небольшой глубины, где $\Delta\bar{H}ph$ - энтальпия. Потенциальная кривая *c* относится к химической адсорбции диссоциированного газа и характеризуется узким глубоким минимумом, величина которого относительного нулевой линии определяет величину энтальпии хемосорбции $\Delta\bar{H}$c ($\Delta\bar{H}_D$– энергия диссоциации молекулы $\Gamma_2 \rightarrow 2\Gamma$) [20]. Для перехода газа из физически адсорбированного состояния в химически адсорбированное надо преодолеть энергию активации *Ec*. Энергии активации хемосорбции зависят от относительного расположения потенциальных кривых *Ph* и *c*, в частности, *Ec* может меняться от нуля до энергии диссоциации $\Delta\bar{H}_D$. Если за хемосорбцией следует растворение газа в металле, то график надо дополнить кривой *S*, которая характеризует потенциальную кривую для атома газа, растворяющегося по эндотермической реакции. Здесь $\Delta\bar{H}s$– энтальпия растворения, а 2*Ep* – энергия активации перехода атома газа из хемосорбированного состояния в растворенное [21].

Известно, что при адсорбции газов, т.е. концентрировании компонентов газовой среды на поверхности, образовывается мономолекулярный адсорбционный слой – монослой. Скорость поступления частиц в адсорбированный слой определяется [22]:

ISSN 3030-3907

$$V_{адс} = 3{,}51 \cdot 10^{22} p/(TM)^2 \qquad (15)$$

где p – давление в камере, *Торр*;

T – температура поверхности, *К*; M – молекулярная масса, *г/моль*.

Для молекулярного азота при температуре T=293*К* и давлении p=1 *Торр* скорость поступления частиц в адсорбированный слой составляет $V_{адс}$ = 3,88 · 10^{22} *см*$^{-2}$*с*$^{-1}$. Если же считать, что полностью сформированный монослой включает 10^{15}…$2 \cdot 10^{15}$ *атом/см*^{2}, то при коэффициенте прилипания, равном единице, время формирования монослоя по порядку величин составит $3 \cdot 10^{-6}$ с. Таким образом можно считать, что адсорбированный монослой на обрабатываемой поверхности формируется мгновенно.

В результате расчетов компьютерной модели было получено распределение температурного поля в детали «зубчатое колесо» при ионного азотирования. На рисунке 5 показано поверхностное распределение температуры детали после 8 часов локальной обработки. При этом температура поверхности зубьев составляла ~823 К (550°С).

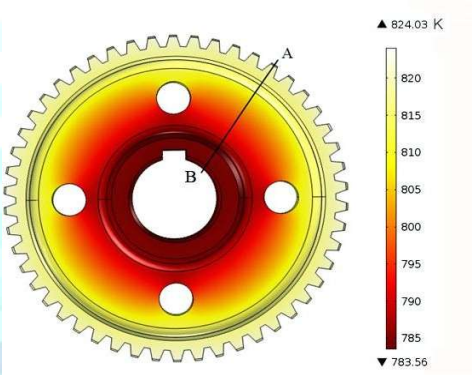


Рисунок 5 - Поверхностное распределение температуры при ионном азотирования.

Из рисунка 5 видно, что при установившемся режиме локальной обработки, разность температуры между самыми горячими и холодными участками детали составляет приблизительно 40 К. На рисунке 6 изображены теоретические кривые 1, 2 изменения температуры T зубчатого колеса в двух крайних точках А и В с течением времени t при ионного азотирования.

ISSN 3030-3907

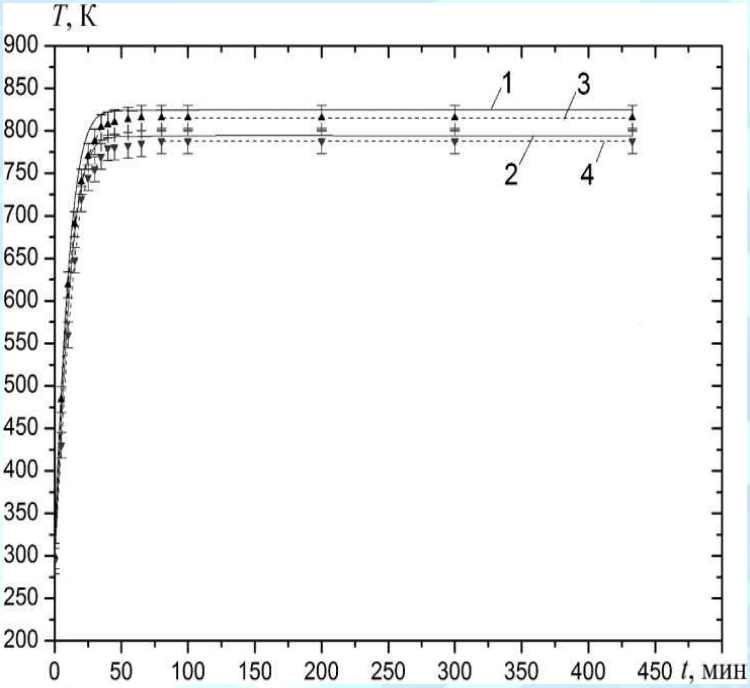


Рисунок 6 - График нагрева поверхности обрабатываемой детали в двух крайних точках А и В при ионного азотирования: 1 – теоретическая кривая, точка А); 2 – теоретическая кривая (самый холодный участок детали, точка В); 3 – экспериментальная кривая (точка А); 4 экспериментальная кривая (точка В)

Для проверки адекватности модели была проведения серия экспериментов по исследованию скорости нагрева детали (рис. 6, кривые 3, 4).

Из графика (рис. 8) видно, что полученные в результате экспериментов зависимости показали хорошее сходство с данными полученными в результате моделирования. Анализ кривых показывает, что азотируемая поверхность детали нагревается до температуры диффузионного насыщения примерно за 45 минут (скорость нагрева составляет 0,2 К/сек.) после чего температура поверхности остается неизменной до конца обработки.

Это связано с установившимся равновесием между подводом тепловой энергии от высокоэнергичных ионов и отводом тепловой энергии излучением от поверхности в окружающее пространство. При этом температура самого
«холодного» участка детали составляет 783 К (510°С).

На рисунке 9 изображены теоретическая и экспериментальная кривые охлаждения обрабатываемой поверхности детали (точка А). В этом случае подвод тепловой энергии q_1 и q_2 прекращается и деталь остывает за счет отвода тепловой энергии излучением от поверхности в окружающее пространство.

ISSN 3030-3907

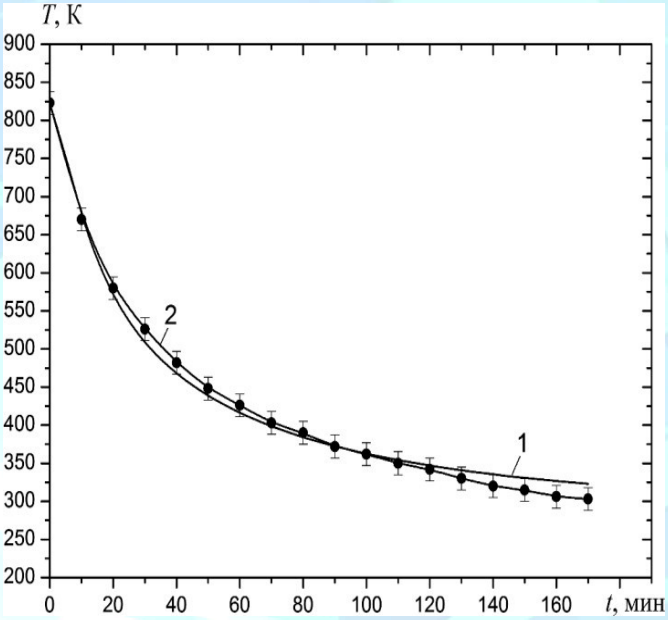


Рисунок 7 - График охлаждения обрабатываемой поверхности детали (точка А): 1 – теоретическая кривая; 2 – экспериментальная кривая.

В результате расчетов модели была получена кривая изменения концентрации насыщающего элемента по глубине диффузионного слоя участка (рис. 8).

Анализ графика показывает, что глубина диффузионного слоя составляет ~ 200 мкм. Для проверки результатов расчета модели, был локально азотирован образец в тлеющем разряде при T=550°С, P=60 Па, U=500 В, t=8 ч.

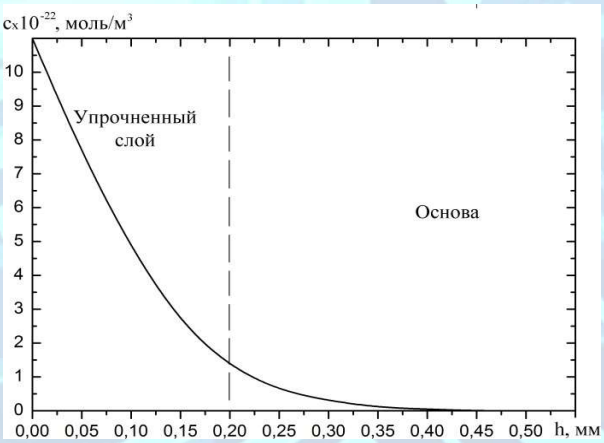


Рисунок 8 - Расчетное изменение концентрации насыщающего элемента по глубине диффузионного слоя на участке, азотирования.

На рисунке 9 показана фотография микроструктуры стали 38ХМЮА после ионного азотирования.

ISSN 3030-3907

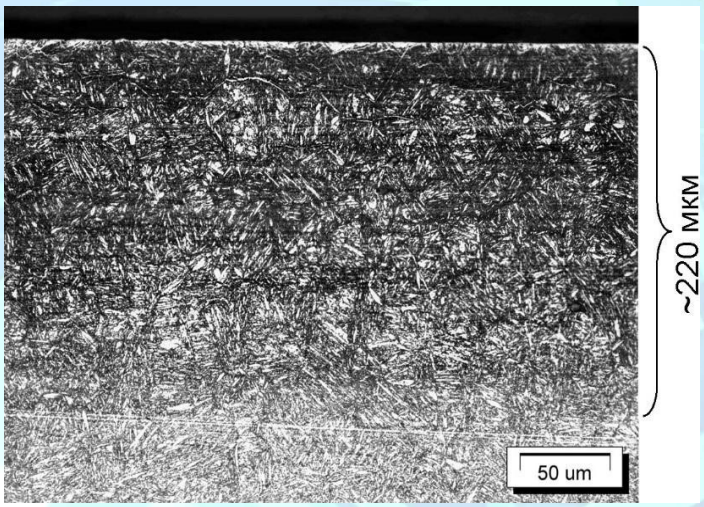


Рисунок 9 - Фотография микроструктуры стали 38ХМЮА после ионного азотирования: *T*=550°С, *P*=60 Па, *U*=500 В, *t*=8 ч.

Исследование микроструктуры образца (рис. 10) после ионного азотирования показало наличие темного диффузионного слоя толщина которого составляет ~ 220 мкм.

Для определения глубины упрочненного слоя были произведены измерения микротвердости по глубине азотированного слоя на поперечном шлифе данного образца (рис. 12).

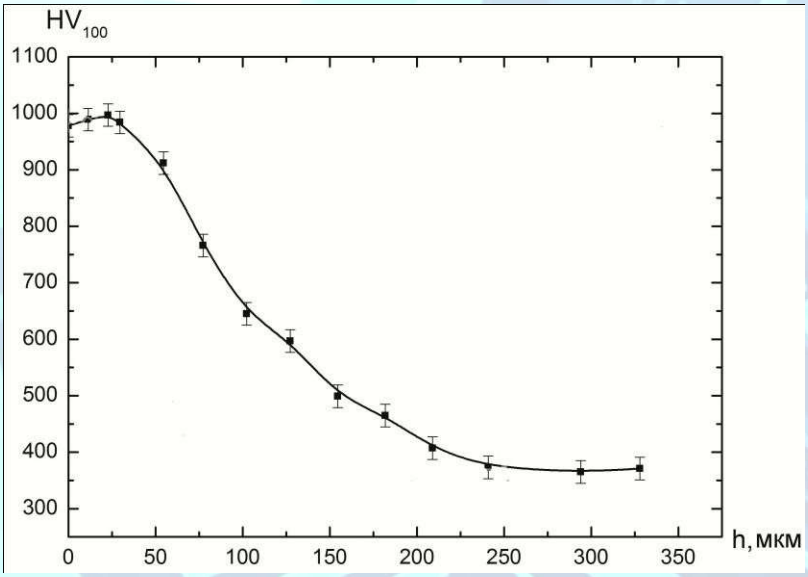


Рисунок 10 - Изменение микротвердости по глубине азотированного слоя для образца стали 38ХМЮА: *T*=550°С, *P*=60 Па, *U*=500 В, *t*=8 ч.

Измерение микротвердости на поперечном шлифе данного образца показало глубину упрочненного слоя ~220 мкм.

Таким образом, экспериментальные данные показали хорошее сходство с результатами расчетов. На кинетику процесса диффузионного насыщения, физико-механические характеристики и фазовый состав азотированного слоя в тлеющем разряде влияет вид и состав газовой среды. В азотной

ISSN 3030-3907

плазме присутствие кислорода недопустимо, так как при этом уменьшается активность рабочей атмосферы, а водород незначительно влияет на рост слоя. В качестве рабочего газа для ионного азотирования использовалась смесь азота, аргона и ацетилена (N_2 70%, Ar 25%, C_2H_2 5%). Время ионного азотирования выбирается в зависимости от необходимой толщины диффузионного слоя. Известно, что при насыщении азотом формирование упрочненного слоя подчиняется общему правилу, согласно которому диффузия между компонентами приводит к образованию однофазных слоев, соответствующих монофазным областям диаграммы состояния Me-N, пересекаемой изотермой при температуре насыщения. Диффузионные слои образуются в той же последовательности, что и однофазные области на диаграмме состояния. При этом скорость роста каждой фазы зависит от интенсивности диффузионных процессов как ниже, так и выше лежащей зоны. Для определения кинетики роста упрочненной зоны при ионном азотирование было исследовано влияние продолжительности обработки на толщину диффузионной зоны (рис.11 и12).

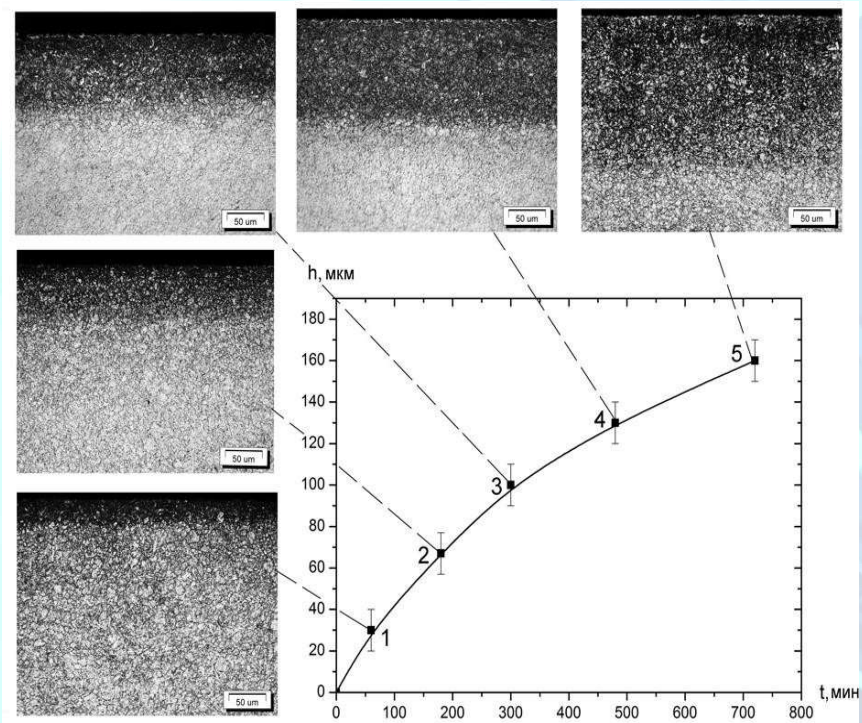


Рисунок 11 - Кинетика роста упрочненной зоны для конструкционной стали 16Х3НВФМБ-Ш при ионном азоторовнии (*T*=550°С, *P*=60 Па, *U*=500В)

ISSN 3030-3907

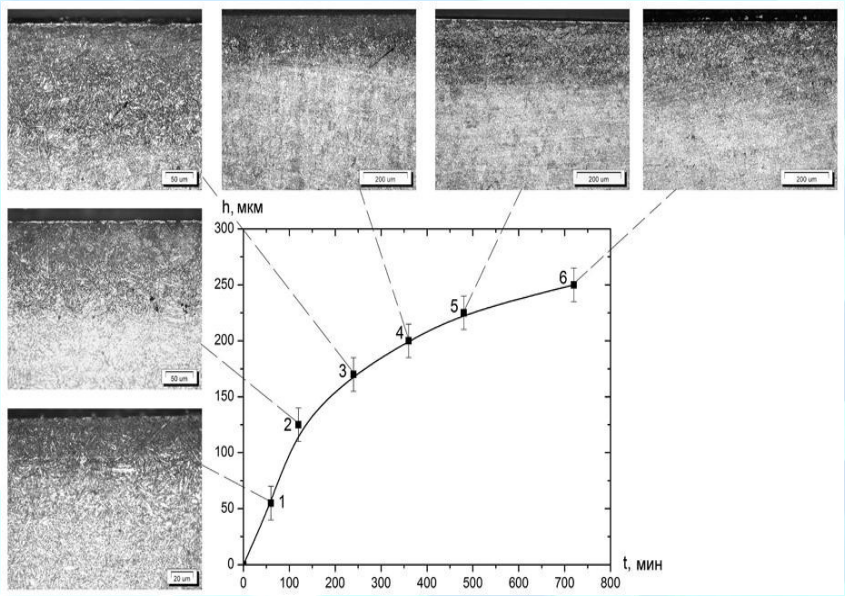


Рисунок 12.-Кинетика роста упрочненной зоны для конструкционной стали 38ХМЮА при ионном азотирования(*T*=550°C, *P*=60 Па, *U*=500В)

Выводы

На кинетику процесса диффузионного насыщения, физико-механические характеристики и фазовый состав азотированного слоя в тлеющем разряде влияет вид и состав газовой среды. В азотной плазме присутствие кислорода недопустимо, так как при этом уменьшается активность рабочей атмосферы, а водород незначительно влияет на рост слоя.

Диффузионные слои образуются в той же последовательности, что и однофазные области на диаграмме состояния. При этом скорость роста каждой фазы зависит от интенсивности диффузионных процессов как ниже, так и высше лежащей зоны. Для определения кинетики роста упрочненной зоны при ионном азотирование было исследовано влияние продолжительности обработки на толщину диффузионной зоны.

ЛИТЕРАТУРЫ

1. Арзамасов, Б.Н. Ионная химико–термическая обработка сплавов / А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. – Москва: изд-во МВТУ им Баумана, 1999. – 400 с.
2. Лахтин, Ю.М. Теория и технология азотирования / Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г-Й Шпис, З. Бемер. – М.: Металлургия, 1991. – 320 с.
3. Пастух, И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И.М. Пастух. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
4. Москалев, В.А., Измерение параметров пучков заряженных частиц / В.А. Москалев, Г.И. Сергеев. – М.: Энергоатомиздат, 1991. – 237 с.
5. Коган, Я.Д. Перспективы регулируемых процессов газового азотирования

ISSN 3030-3907

/ Я.Д. Коган // Азотирование в машиностроении: сб. науч. тр. МАДИ. – 1979. – вып.174. – С. 14–26.
6. Исаченко, В.П. и др. Теплопередача : учебник для вузов / В.П. Исаченко. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
7. Гуляев, А.П. Свойства и термическая обработка быстрорежущей стали / А.П. Гуляев. – М.: ГНТИ, 1939. – 159 с.
8. Гурьев, А.В., Тескер, Е.И., Столярчук, А.С., Митин, В.Я. Исследование износостойкости упрочненного лазером игольчатого подшипника планетарного механизма трактора / А.В. Гурьев // Износ в машинах и методы защиты от него. Тез. докл. всесоюзн. конф. Москва. – 1985. – С. 10-11.
9. Агзамов, Р.Д. Повышение производительности и качества поверхностного слоя детлаей путем дополнительной ионизации газа при ионно–плазменной обработке : дис. …канд. техн. наук. : 05.02.08 / Агзамов Рашид Денисламович. – Уфа, 2004. – 135 с.
10. Киричек, А.В., Соловьев, Д.Л., Баринов, С.В., Силантьев, С.А. Повышение контактной выносливости деталей машин гетерогенным деформационным упрочнением статико-импульсной обработкой // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2008. – №7. – с. 9-15.
11. Трепнел, Б.М. Хемосорбция / Б.М. Трепнел. – М.: Металлургиздат, 1940. – 228 с.
12. Коган, Я.Д. Константы взаимодействия металлов с газами / Б.А. Колачев, Ю.В. Левинский и др.; справ. изд. – М.: Металлургия, 1987. – 368 с.
13. Пастух, И.М. Особенности технологии моделирования многофакторных закономерностей / И.М. Пастух // Проблемы трибологии. – 2004. – №1. – С. 35-39
14. Пастух, И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде / И.М. Пастух. – Харьков: ННЦ ХФТИ, 2006. – 364 с.
15. Пастух, И.М. Кинетика прикатодных процессов как фактор формирования энергетического спектра падающего потока / И.М. Пастух // Вестник ТУП, 2004. – №1 – С. 53-64.
16. Пастух, И.М. Модификация металлов с применением азотирования в тлеющем разряде: состояние и перспективы / И.М. Пастух // Проблемы трибологии. – 2004. – №3-4. – С. 42-55.

ISSN 3030-3907