Из рассмотренных примеров очевидно, что будущее тормозных систем автомобиля представляет собой сложную систему, в которую будут входить необходимые сенсорные и электронные устройства, программное обеспечение и исполнительные механизмы. Причём в дальнейшем всё большее значение будет иметь программное обеспечение, которое может самостоятельно разрабатывать сценарии при опасных ситуациях и немедленно их осуществлять. При внедрении такой системы на автомобиле за водителем остается лишь функция задания начала и интенсивности осуществляемого процесса [4].

1. Фёдоров А.Г. Общее устройство автомобиля специального назначения ГАЗ-233115 «Тигр»: практ. пособ. – Новосибирск: Новосибирский военный институт генерала армии Н.К. Яковлева войск национальной гвардии Российской Федерации, 2018. – 218 с.
2. Артюшкин М.А. КамАЗ 63968 «Тайфун». - Издательство: Русские инженеры №3, 2013 - 32 с.
3. Шипилов В.В. Стариков А.Ф. тенденции развития зарубежной автомобильной техники. – Редакционно-издательский центр Министерства обороны Российской Федерации, 2005. – 176 с.
4. Концепция развития системы вооружения, военной и специальной техники войск национальной гвардии Российской Федерации на период до 2030 года.

Прохоров А.П., Баранова А.А.

**Перспективы развития процессов химико-термического упрочнения
легированных сталей (обзорная информация)**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева
(Россия, Нижний Новгород)*

doi: 10.18411/lj-02-2021-59

idsp: ljjournal-02-2021-59

Аннотация

В работе обобщены результаты исследований структуры, фазового состава и эксплуатационных свойств зубчатых колес из стали типа 38Х2МЮА, которые наблюдаются в модифицированном слое, после процесса азотирования. Большое внимание уделено процессу ионного азотирования в тлеющем разряде. Исследование упрочненного слоя показало, что в нем наблюдаются некоторые различия в зависимости от температуры процесса. Рассмотрены часто применяющиеся методы для защиты неазотируемых поверхностей.

Ключевые слова: сталь 38Х2МЮА, химико-термическая обработка, ионное азотирование, эксплуатационные свойства, модифицированный слой.

Abstract

The paper summarizes the results of studies of the structure, phase composition and operational properties of gears made of steel type 38Kh2MYuA, which are observed in the modified layer, after the nitriding process. Much attention is paid to the process of ion nitriding in a glow discharge. The study of the hardened layer showed that there are some differences depending on the temperature of the process. Frequently used methods for the protection of non-aerated surfaces are considered.

Keywords: steel 38Kh2MYuA, chemical-thermal treatment, ion nitriding, performance properties, modified layer.

Введение

Задача современного материаловедения и термической обработки заключается в создании новых материалов с высоким заданным комплексом свойств, а также в разработке новейших упрочняющих технологий для высокоэффективного применения их в российском машиностроении.

Сейчас, безусловно, актуальна и востребована разработка новых методов на основе уже существующих упрочняющих технологий (технология модификации поверхности), которые в значительной степени повысили бы прочность, износостойкость, а также сопротивление хрупкому разрушению.

Целью настоящей работы является рассмотрение способов повышения износостойкости деталей, которые работают в парах трения. Как известно, при эксплуатации таких деталей, нагрузке подвергаются лишь некоторые участки поверхности, примером может служить контактная поверхность зубьев зубчатого колеса (шестерни). В этом случае модификации поверхностного слоя подвергается только рабочая область.

Химико-термическая обработка

Оценка прочности зубчатых колес проводится при помощи объективного критерия, которым является изгибная выносливость зубьев.

Такая выносливость характеризуется сопротивлением зубчатого зацепления усталостному разрушению, которое часто возникает в основании зуба. Сила F_0 , имея максимальное значение при зацеплении, в области линии симметрии зуба, действует перпендикулярно к его поверхности, и, совместно с плечом изгиба H определяет напряжения в основании зуба (рисунок 1).

Рисунок 1. Схематичное представление изгибной выносливости в основании зуба.

Решающим фактором для достижения высокой прочности на изгиб, при действии силы F_0 , являются максимально возможный радиус закругления r_3 в основании зуба, а также толщина ножки зуба S .

Наиболее нагруженным участком профиля зубчатого колеса является боковая поверхность в зоне делительной окружности. В этой зоне происходит ударный вход зуба в зацепление. При эксплуатации зубчатых передач наблюдаются высокие контактные напряжения и напряжения изгиба, в момент, когда вся нагрузка воспринимается одной парой зубьев. Повторно-переменные напряжения являются причиной усталостного разрушения. Основные виды разрушений зубьев представлены на рисунке 2.

Рисунок 2. Типы усталостного разрушения зубьев зубчатого колеса:

А) излом зуба; Б) выкрашивание; В) усталостные раковины.

В целях повышения стойкости поверхности таких деталей, в промышленности, широко применяют химико-термическую обработку.

ХТО является совокупностью процессов термического и физико-химического воздействий, которые направлены на преобразование химического состава и структуры приповерхностного слоя зубчатых колес.

Химико-термическую обработку можно представить в виде трех основных взаимосвязанных стадий [1]:

1 ст: Представляет собой процесс образования активных атомов в среде насыщения, и последующую их диффузию к поверхности модифицируемого металла;

2 ст: Адсорбция – поглощение активных атомов поверхностью насыщения;

3 ст: Диффузия – перемещение адсорбционных атомов внутри металла.

Зубчатые колеса, при проведении химико-термической обработки, деформируются по ряду технологических факторов, выделяют следующие: конструкционное исполнение заготовки (форма), свойства стали, способы получения поковки детали, предварительная термическая обработка и др.

Современной задачей технологии химико-термической обработки является обеспечение и поддержание необходимых эксплуатационных свойств поверхностного слоя изделий, получение диффузионных слоев рабочей толщины за минимальное количество времени.

Вид ХТО - азотирование

Азотирование получило наибольшее применение, среди различных методов ХТО. Оно позволяет получать упрочненные детали, с высокой твердостью поверхностного слоя и высокую износостойкость при эксплуатации, а также сопротивление усталости изделий при их минимальном короблении и деформации. Стоит отметить, что по микротвердости азотирование уступает только борированию. Увеличение показателя микротвердости происходит лишь в случае формирования твердого раствора азота в железе.

Рисунок 3. Усталостная изгибная прочность в основании зуба цилиндрических колес.

График показывает следующие зависимости, зубчатые колеса в результате цементации 2 обладают более высокой изгибной выносливостью, по сравнению с азотированными 4. Однако, можно также заметить, что после шлифования боковых поверхностей зубьев и дна впадины после химико-термической обработки, происходит повышение изгибной выносливости, и цементованных 1, и азотированных 3 зубчатых колес [2].

В процессе азотирования на поверхности создается модифицированный слой [3], более прочный, по сравнению с материалом сердцевины и имеющий высокие сжимающие остаточные напряжения – это позволяет повысить барьерное действие приповерхностного слоя, тем самым, повышая прочностные показатели деталей под действием статических и усталостных нагружений.

Модифицированный слой имеет вид «композиционного покрытия», состоящего из приповерхностной нитридной (карбонитридной) зоны и диффузионного подслоя, то есть, так называемой зоны внутреннего азотирования. Это позволяет рассматривать свойства азотированных деталей в широком диапазоне физико-механических характеристик. Под влиянием реальных эксплуатационных воздействий требуется создание регулируемого диффузионного слоя с развитием тех или иных фазовых и структурных составляющих, которые, в конце концов, и позволят определять работоспособность изделия на износ. Для определения фазовых и структурных составляющих азотированного слоя наиболее информативным является рентгенодифрактометрический метод.

Согласно литературным данным [4], процесс насыщения поверхностного слоя азотом при традиционном азотировании определяется диффузионной кинетикой, его описание возможно при помощи уравнения Фика:

$$\Delta M = -D \frac{dc}{dx} * S * \Delta t,$$

где: D – коэффициент диффузии [$\text{м}^2/\text{с}$]; M – масса; c – концентрация; S – площадь; t – время.

Авторы [5] считают, что главенствующую роль в процессе азотирования играют ионы атомарного и молекулярного азота. Наиболее распространенной является точка зрения, что в процессах азотирования основную роль играет атомарный азот [6].

Азотирование смесью азота с инертными газами, например, Ar , He , Ne – оказывает влияние на фазовый состав и конечную концентрацию азота в приповерхностном слое детали, увеличивая микротвердость поверхности почти на 60 %.

Азотируемые стали – 38Х2МЮА

Алюминийсодержащая сталь 38Х2МЮА используется в качестве азотируемых материалов для производства зубчатых колес чаще всего. Она является среднеуглеродистой улучшаемой сталью, обладает рядом недостатков: склонна к обезуглероживанию и перегреву; чувствительна к изменению химического состава; обладает невысоким комплексом свойств сердцевины.

Сталь 38Х2МЮА была создана для изготовления ответственных деталей (зубчатых колес, валов), которые работают при высоких знакопеременных и истирающих нагрузках. Высокая прочность азотированного слоя достигается за счет легирования хромом, молибденом и, в частности, алюминием.

По ГОСТ 21354-97 наличие в стали алюминия определяет основные требования к твердости поверхности и сердцевины, а также к глубине азотируемого слоя. Алюминий является агентом, который эффективно повышает твердость азотированной поверхности.

Получаемая высокая твердость азотируемого слоя и увеличение объема, за счет диффузии атомов азота в сталь, приводит к появлению больших напряжений сжатия в азотированном слое (примерно 6000 МПа). Высокие напряжения на поверхности часто приводят к короблению деталей, которые имеют сложное строение (проточки, канавки) – это, в свою очередь, приводит к появлению брака. Высокая твердость азотированного слоя зубьев зубчатого колеса ведет к их охрупчиванию и, так называемому, питтинговому выкрашиванию поверхности при обработке (шлифовке) и контактных нагрузках.

Продуктом изнашивания материала может служить тонкая стружка, при этом, на поверхности пар трения появляются следы резания. Можно предположить, что перенос материала с одной поверхности трения на другую осуществляется адгезионным механизмом изнашивания. При образовании в железе твердого раствора азота следует говорить о смене механизма на абразивный.

Виды азотирования

Газовое азотирование.

Наиболее распространенным в России и странах СНГ является газовое азотирование (традиционное). В этом случае процесс проводят в герметических камерах-ретортах (рисунок 4), куда подается специально разработанная смесь газов, при определенной температуре и скорости подачи.

При газовом азотировании контроль и регулирование фазового состава упрочненного слоя проводят вариацией индекса азотирования. На практике происходит путем градации степени диссоциации аммиака в печи.

Рисунок 4. Принципиальная схема вакуумной печи (реторта).

Степень диссоциации объединяет в себе множество показателей: скорость потока газа, температуру процесса, площадь поверхности азотируемых деталей, гидростатический фактор (давление) и др.

Количество поглощенного сталью азота, а также тип и концентрация образующихся нитридов – определяют твердость стали при азотировании. Различия в твердости между поверхностным слоем и сердцевиной тем больше, чем выше содержание в стали нитридов (нитридообразующих) легирующих элементов, для стали 38Х2МЮА: *Al, Cr, Mo, Si*. Стоит отметить, что алюминий не влияет на растворимость азота в твердом растворе.

В зависимости от условий образования азотированного слоя, нитридный слой стали 38Х2МЮА представляет собой: γ' -фазу (Fe_4N), $(\gamma' + \epsilon)$ -фазу (ϵ -фаза – $Fe_{2-3}N$) и твердый раствор азота в железе – α -фаза. γ' -нитридный слой представляет собой износостойкий и относительно пластичный слой. ϵ -определяется как коррозионно-стойкий слой. Крупные частицы нитридов железа $Fe_{2-3}N$ дают толчок к появлению высоких местных напряжений в упрочненном слое, и как следствие, возникновению макродефектов (трещин).

Азотирование в жидких средах.

Это так называемое карбонитрирование (цианирование) в расплаве солей. Для азотирования в жидких средах, часто называемое мягким азотированием или тенифер-процессом, используют расплавы цианид-цианатных солей, а также ванны, основой которых является карбамид. Из-за токсичности процесса жидкое азотирование не получило столь широкого применения.

Ионное азотирование.

Современным и активно развивающимся методом азотирования является ионное азотирование в тлеющем разряде. Этому типу азотирования уделяется большое внимание, но стоит отметить, что внутренние процессы, происходящие при таком упрочнении, изучены не в полной мере. Сведения о фазовом и структурном составе сталей после проведения высокотемпературного азотирования, не систематизированы и порой являются противоречивыми.

Рисунок 5. Принципиальная схема установки для ионного азотирования:

1 – рабочая вакуумная камера; 2 – кольцевой экран, задерживающий металлические ионы; 3 – деталь, подвергаемая азотированию; 4 – газообразный азот; 5 – фокусирующая направление газа катушка; 6 – источник питания анода; 7 – источник питания подложки; 8 – устройство для разворачивания подложко-держателя; 9 – дуговой источник питания катода; 10 – катод.

Ионное азотирование также можно проводить при помощи вакуумных печей шахтного или колпакового типа, выбор каждой из них зависит от типа изделий, которые необходимо подвергнуть упрочняющей обработке. Универсальной является установка, имеющая камеру с изменяемой геометрией, которая, в свою очередь, позволяет при необходимости, упрочнять длинномерные изделия в подвесном виде.

Технология ионного азотирования в тлеющем разряде дает отличные возможности проводить контроль и управлять процессом диффузионного насыщения. Регулирование процесса происходит как составом азотсодержащей среды, продолжительностью и температурой операции, так и варьированием давления в газовой среде, а также электрическими показателями разряда. Все эти факторы являются принципиальным отличием от классического азотирования.

При ионном азотировании наблюдается превращение молекулярного азота в так называемый «реактивный азот», этот процесс происходит в катодной области тлеющего разряда.

Еще одним значительным отличием ионного азотирования от газового, является то, что кроме потока нейтральных частиц в разряде (атомов, молекул), на поверхность металла можно также воздействовать концентрированным потоком положительных ионов, плотность и энергия которого зависят от параметров электрического заряда – плотности тока и разницы катодного потенциала.

В формировании азотированного слоя при ионном процессе главную роль играют атомы азота. Имеется две причины их образования в разряде:

- Диссоциация молекулярного азота в прикатодном пространстве, а также диффузия молекул азота к катоду;
- Перекомбинация молекулярных ионов на катодной поверхности.

В ходе ионного азотирования в тлеющем разряде с ЭПК при температуре $T = 550\text{ }^{\circ}\text{C}$ в стали 38Х2МЮА обнаруживаются следующие составляющие упрочненного слоя [7]: ε -фазы $Fe_{2-3}N$, $Fe_{2-3}(N,C)$, γ' -фазы Fe_4N , $Fe_4(N,C)$, а также фазы, состоящие из нитридов и карбонитридов хрома (CrN , $Cr(N,C)$, Cr_2N , $Cr_2(N,C)$). Важно отметить, что такие легирующие элементы как хром и марганец, растворяясь в γ' -фазе, снижают в ней содержание азота и уменьшают толщину.

Замечено, что при возрастании температуры азотирования до $T = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$, происходит выклинивание области существования γ -фазы $\text{Fe}_{2-3}(\text{N}, \text{C})$, она, растворяя в себе углерод, переходит в карбонитрид $\text{Fe}_4(\text{N}, \text{C})$ [7].

Авторами [8-9] также отмечается, что с ростом температуры в диффузионном слое, кроме нитридных и карбонитридных соединений, могут образовываться оксинитридные соединения типа $(\text{Fe}, \text{Me})_3\text{O}_4$. Зоны, содержащие эти соединения более пластичны, обладают хорошими адгезионными свойствами.

Недостатками ионного азотирования являются:

- Невозможность ускорения процесса путем увеличения плотности ионного потока, т.к. в результате перегрева деталей снижается поверхностная твердость;
- Интенсификация процесса ионного азотирования;
- Отсутствие возможности наложения магнитного поля для увеличения плотности тока и снижения давления газа;

Ионное азотирование зубчатых колес является альтернативой процессу цементации. Ионное азотирование зубчатых колес при температурах, порядка $(480...580\text{ }^{\circ}\text{C})$, позволяет избежать фазовые превращения при упрочнении – это, в свою очередь, в значительной степени снижает деформацию деталей и позволяет сохранить геометрию профиля зубьев. Последующая механическая обработка (шлифование) после такого вида упрочнения не требуется.

Хрупкие фазы, находящиеся в упрочненном слое, являются причиной износа поверхности стали 38Х2МЮА, эти фазы под влиянием эксплуатационных нагрузок приводят к растрескиванию азотированного слоя.

Способы защиты неазотируемых поверхностей

Существенной проблемой при проведении азотирования является защита неазотируемых поверхностей. Проблема представляет краеугольный камень, с одной стороны – техническая и экономическая точка зрения, с другой экологический вред.

Основными способами защиты неупрочняемых поверхностей на сегодняшний день являются: для газового азотирования – никелирование, гальваническое лужение, нанесение тонкого слоя жидкого стекла; при ионном азотировании – целесообразно использовать специальные защитные металлические экраны.

Гальваническое лужение.

При азотировании стальных изделий места поверхности их, не подлежащие азотированию, обычно покрываются оловом гальваническим путем (гальваническое лужение).

Недостатком этого способа является то, что при наложении относительно тонкого слоя олова происходит некоторое «пробивание» изолированных оловом мест, что сильно затрудняет механическую обработку деталей в этих местах после азотирования.

При наложении более толстого, требующегося для полного азотирования, слоя олова, в процессе азотирования происходит затекание олова с луженых мест на места, подлежащие азотированию.

Кроме того, в процессе азотирования олово, расплавляясь и стекая, капает с верхних деталей на расположенные ниже, попадая часто на места, подлежащие азотированию. С этой целью поверхность смачивают препаратом Мажеф («марганец-железо-фосфор»). Фосфатированная поверхность совершенно не смачивается оловом и, кроме того, на ней более активно адсорбируется азот, что способствует улучшению условий азотирования.

Защита жидким стеклом.

Двукратное нанесение на поверхность детали жидкого стекла является вторым наиболее распространенным и дешевым методом защиты неазотируемых поверхностей.

Технология состоит в следующем, на поверхность наносят слой жидкого стекла (толщина слоя 1...2 мм) и последующей сушкой при $T = 100...120\text{ }^{\circ}\text{C}$.

После проведения указанных операций детали подвергают азотированию. По окончании требуется удаление слоя жидкого стекла с детали.

Очевидным недостатком такого покрытия является нарушение границы между азотируемой и неазотируемой поверхностями, в результате смещения жидкого стекла по поверхности.

Металлические экраны.

Защиту поверхностей от насыщения можно также обеспечить при помощи металлических экранов. При этом исключается необходимость нанесения и удаления трудоемких защитных покрытий. Проведенные исследования качества такого защитного покрытия и качества диффузионных слоев показали хорошие результаты. Использование защитных экранов позволяет сократить количество оснастки, что уменьшает уровень затрат при изготовлении деталей.

Выводы

Польза от азотирования деталей в промышленности очевидна, можно отметить следующее, оно позволяет проводить упрочнение зубчатых колес, при этом изделия после данной операции практически не подвергаются короблению, в отличие от цементованных (нитроцементованных), и подвергнутых ТВЧ закалке, это, в свою очередь, позволяет использовать их без дополнительной обработки (шлифования), существенно сокращая трудозатраты при производстве.

Азотирование деталей для нефтегазового и химического сектора машиностроения позволяет повысить их надежность, долговечность и эксплуатационный период.

Азотирование штампового и прессового инструмента повышает износостойкость, сопротивляемость трещинообразованию, позволяет уменьшить налипание металла, в 3...5 раз увеличивается долговечность.

Ионное азотирование в целях повышения служебных характеристик и ресурса конструкций находит все более широкое применение в процессах термоупрочнения, обусловлено это рядом преимуществ данного метода. Например, этот метод в отличие от цементации и классического газового азотирования является более экономичным, это в свою очередь приводит к снижению затрат в целом при производстве азотированных деталей.

1. Лахтин Ю.М., Коган Я.Д. Азотирование стали. М.: Машиностроение. 1976. 256 с.
2. Bausch Tomas. Innovative Zahnradfertigung. Expert verlag GmbH, D-71268, Renningen, Germany, 778 s.
3. Дубинин Г.Н., Коган Я.Д. Прогрессивные методы химико-термической обработки. М.: Машиностроение. 1979. 184.
4. Зайт В. Диффузия в металлах/В. Зайт перевод с нем. Г.С. Куликова, Р.Ш. Малкович, под ред. Б.И. Болтакса. М.: Издательство иностранной лит-ры. 1958. 712 с.
5. Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А. Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. 1999. 400 с.
6. Пастух И.М. Теория и практика безводородного азотирования в тлеющем разряде. Харьков: ННЦ ХФТИ. 2006. 364 с.
7. Рамазанов К.Н. Исследование влияния азотирования и высокотемпературного азотирования в тлеющем разряде с эффектом полого катода на фазовые превращения в конструкционных и инструментальных сталях. Уфа: УГАТУ. 2008. Т.10, №1 (26). С. 100-107.
8. Лахтин Ю.М. Теория и технология азотирования/ Ю.М. Лахтин, Я.Д. Коган, Г.Й. Шпис, З. Бемер. М.: Металлургия. 1991. 320 с.
9. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах/Б.Н. Арзамасов, А.Г. Братухин, Ю.С. Елисеев, Т.А. Панайоти. М.: Изд-во МВТУ им. Баумана. 1999. 400 с.