

Федеральное агентство по образованию  
Государственное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
Ивановский государственный химико-технологический университет

Т.Ю. Степанова

**Технологии поверхностного  
упрочнения деталей машин**

**Учебное пособие**

Иваново 2009

УДК 621.8

Степанова, Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие/ Т.Ю. Степанова; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.-Иваново, 2009.- 64с.- ISBN – 5-9616-0315-4.

Пособие написано в соответствии с программой курсов «Материаловедение и технология конструкционных материалов» и «Механика». В нем изложены основные сведения о методах упрочнения поверхности деталей машин, приводится классификация методов отделочно-упрочняющей обработки. Содержится информация о параметрах состояния поверхностного слоя, структурных несовершенствах в реальных кристаллах, образовании и размножении дислокаций.

Пособие предназначено для студентов немашиностроительных специальностей.

Ил. 23, Библиогр.: 6 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Ивановского государственного химико-технологического университета.

Рецензенты: кафедра технологии автоматизированного машиностроения Ивановского государственного энергетического университета им. В.И. Ленина; кандидат технических наук В.В. Киселев (Ивановский институт государственной пожарной службы МЧС России).

ISBN-5-9616-0315-4

©Степанова Т. Ю., 2009  
© ГОУВПО Ивановский  
государственный  
химико-технологический  
университет, 2009

## Введение

Одним из важнейших показателей, определяющих спрос на проектируемый объект, является его качество. Обеспечение необходимого качества возможно при удовлетворении эксплуатационных требований, предъявляемых к деталям машин.

Работоспособность и надежность детали обеспечиваются за счет выполнения следующих основных требований: прочности, жесткости и стойкости к различным воздействиям (износу, вибрации, температуре и др.). Выполнение требований прочности при статическом, циклическом и ударном нагружении должно исключить возможность разрушения, а также возникновения недопустимых остаточных деформаций. Требования жесткости к детали или контактной поверхности сводятся к ограничению возникающих под действием нагрузок деформаций, нарушающих работоспособность изделия, к недопустимости потери общей устойчивости для длинных деталей, подвергающихся сжатию, и местной – у тонких элементов. Должна быть обеспечена износостойкость детали, которая существенно влияет на долговечность работы механизма. Достаточно, чтобы для каждой детали выполнялись не все перечисленные выше требования, а лишь те, которые связаны с ее эксплуатацией.

Детали, испытывающие максимальные напряжения на поверхности (изгиб, контактные напряжения), для повышения сопротивления усталости подвергают поверхностному упрочнению. Существуют следующие методы поверхностного упрочнения: механический, термический, химико-термический, лазерная закалка, ионная имплантация и др.

## 1. Механические методы поверхностного упрочнения деталей машин

Требования по созданию долговечных машин можно удовлетворить не только разработкой современных конструкционных решений и применением новых высокопрочных материалов, но и путем изменений поверхностного слоя деталей машин.

Процессом, обеспечивающим получение стабильных показателей по качеству поверхности, является **поверхностное пластическое деформирование**, которое подразделяется на сглаживающее и упрочняющее.

### 1.1. Параметры состояния поверхностного слоя деталей машин

Поверхностный слой детали – это слой, у которого структура, фазовый и химический состав отличаются от основного материала, из которого сделана деталь.

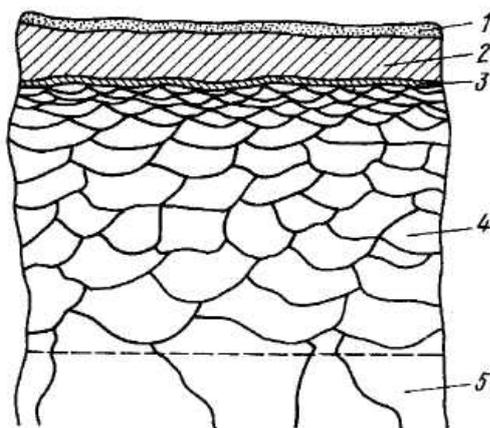


Рис.1.1. Схема поверхностного слоя детали

В поверхностном слое можно выделить следующие основные зоны (рис.1.1):

1. адсорбированных из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ. Толщина слоя  $1 \pm 0,001$  мкм;
2. продуктов химического взаимодействия металла с окружающей средой (обычно оксидов). Толщина слоя  $10 \pm 1$  мкм;
3. граничная толщиной несколько межатомных расстояний, имеющая иную, чем в объеме, кристаллическую и электронную структуру;
4. с измененными параметрами по сравнению с основным металлом;
5. со структурой, фазовым и химическим составом, который возникает при изготовлении детали и изменяется в процессе эксплуатации.

Толщина и состояние указанных слоев поверхностного слоя могут изменяться в зависимости от состава материала, метода обработки, условий эксплуатации. Оценка этого состояния осуществляется методами химического,

физического и механического анализа. Многообразие параметров состояния поверхностного слоя и методов их оценки не позволяет выделить единственный параметр, определяющий качество поверхностного слоя. На практике состояние поверхностного слоя оценивается набором единичных или комплексных свойств, которые оценивают качество поверхностного слоя.

Эти параметры характеризуют:

- геометрические параметры неровностей поверхности;
- физическое состояние;
- химический состав;
- механическое состояние.

*Геометрические параметры неровностей поверхности* оцениваются параметрами шероховатости, регулярных микрорельефов, волнистости.

*Шероховатость поверхности* – это совокупность неровностей с относительно малыми шагами. Примерное отношение высоты неровностей к шагу менее 50.

*Волнистость поверхности* – это совокупность неровностей, имеющих шаг больший, чем базовая длина, используемая для измерения шероховатости. Отношение высоты к шагу более 50 и менее 1000.

Волнистость в России не стандартизирована, поэтому для ее оценки используют параметры шероховатости.

*Регулярные микрорельефы* – это неровности, которые, в отличие от шероховатости и волнистости, одинаковы по форме, размерам и взаиморасположению.

Регулярный микрорельеф получают обработкой резанием или поверхностным пластическим деформированием роликами, шариками, алмазами.

*Физическое состояние* поверхностного слоя деталей в технологии упрочнения наиболее часто характеризуется параметрами структуры и фазового состава.

**Структура** – это характеристика металла, зависящая от методов изучения его строения. Выделяют следующие типы структур:

- кристаллическая;
- субструктура;
- микроструктура;
- макроструктура.

**Кристаллическая структура.** Металлы представляют собой кристаллы с трехмерной периодичностью. Основой кристаллической структуры является трехмерная решетка, в пространстве которой располагаются атомы. В зависимости от характера расположения атомов в кристаллической решетке структуры чистых металлов разделяются на ряд типов (рис.1.2).

**Субструктура.** В реальном металле кристаллическая структура имеет множество дефектов, которые в значительной степени определяют его свойства. Совокупность дефектов решетки и их пространственное распределение в кристалле называется субструктурой. Здесь кристаллы могут

образовывать более крупные фрагменты – кристаллиты, блоки, зерна, фрагменты, полигоны. Размер субмикрзерна:  $10^{-2} \div 10^{-5}$  см.

**Микроструктура** – это структура, определяемая с помощью металлографических микроскопов. Этот анализ позволяет определить наличие, количество и форму структурных составляющих сплава.

Размер субзерна:  $10^{-3} \div 10^{-4}$  см.

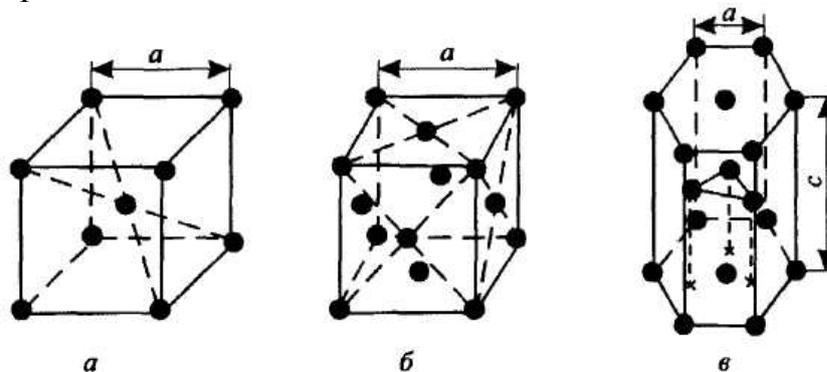


Рис.1.2. Типы кристаллической структуры:  
а - объемно - центрированная кубическая; б - гранецентрированная кубическая; в - гексагонально-плотнупакованная

**Макроструктура** – это структура, которая определяется невооруженным глазом или при небольших увеличениях. С помощью макроанализа определяют трещины, неметаллические включения, примеси и др.

*Физическое состояние* характеризуется числом и концентрацией фаз, распределением фаз по поверхностному слою, объемом сплава и др.

Исследование физического состояния осуществляется экспериментальными методами физики твердого тела: дифракционными и микроскопическими.

*Химический состав* характеризуется элементным составом сплава и фаз, концентрацией элементов в объеме фаз, сплава и др.

Исследования химического состава поверхностного слоя позволяют оценить адсорбцию из окружающей среды молекул и атомов органических и неорганических веществ, диффузионные процессы, процессы окисления и другие, происходящие при обработке металлов.

Механическое состояние металла определяется параметрами:

- сопротивлением деформированию: предел упругости, предел пропорциональности, предел текучести, предел прочности, твердость и др.;
- пластичностью: относительное удлинение, относительное сужение, ударная вязкость и другие, устанавливаемые специальными испытаниями образцов.

Например, в процессе пластической деформации, которая всегда сопровождается механической обработкой, все характеристики механического состояния поверхностного слоя изменяются: показатели сопротивления

деформированию увеличиваются, а показатели пластичности уменьшаются. Это явление называют *деформационным упрочнением*.

В инженерной практике деформационное упрочнение поверхностного слоя определяют измерением твердости  $H$  или микротвердости. Для этого твердость измеряют на поверхности металла и внутри металла (при помощи послойного травления). В результате устанавливают толщину упрочненного слоя  $h_H$  и степень деформационного упрочнения  $\delta_H$ :

$$\delta_H = (H_{обр} - H_{иск}) / H_{иск},$$

где  $H_{обр}$  и  $H_{иск}$  - соответственно твердость (микротвердость) металла после и до обработки.

Важной характеристикой состояния поверхностного слоя являются *остаточные напряжения*.

*Остаточные напряжения* – это упругие напряжения, которые остались в детали после обработки. В зависимости от объема тела, в которых рассчитывают остаточные напряжения, они условно подразделяются на остаточные напряжения:

- первого рода, уравновешенные в макрообъемах тела;
- второго рода, уравновешенные в пределах размера зерен;
- третьего рода, уравновешенные в пределах нескольких межатомных расстояний.

В зависимости от характера и интенсивности физико-механических процессов, происходящих при обработке, остаточные напряжения могут иметь различный знак:

- (+) - растягивание;
- (-) - сжатие.

Условие равновесия требует, чтобы в объеме детали сумма проекций всех сил была равна нулю. Поэтому в детали есть область со сжимающими и растягивающими остаточными напряжениями.

В инженерной практике остаточные напряжения первого рода принято представлять в виде проекции на оси заданной системы координат. Например, для тела вращения используют понятия осевых  $\sigma_x^0$ , окружных (тангенциальных)  $\sigma_t^0$  и радиальных  $\sigma_r^0$  остаточных напряжений.

Обобщенно можно сказать, что остаточные напряжения первого рода есть результат неравномерных пластических деформаций различных слоев детали (искривление детали).

Остаточные напряжения оказывают существенное влияние на прочность и долговечность деталей машин и конструкций. Остаточные сжимающие напряжения, возникающие в поверхностном слое, повышают циклическую прочность деталей, т.к. они разгружают поверхностные слои от напряжений, вызванных нагрузками и, наоборот, растягивающие остаточные напряжения уменьшают прочность деталей вследствие повышения напряженности поверхностного слоя.

## 1.2. Структурные несовершенства в реальных кристаллах

В соответствии с современными взглядами на строение металла, существенное различие теоретической и физической прочности объясняется наличием структурных несовершенств (дефектов) кристаллов.

Структурные дефекты оказывают существенное влияние на упрочнение и разрушение металла при обработке.

Структурные несовершенства в кристаллах возникают в результате кристаллизации металла, термической обработки, пластической деформации и др.

Структурные несовершенства (дефекты) кристалла по геометрическому признаку подразделяются на 4 группы:

- точечные;
- линейные;
- поверхностные (плоские);
- объемные.

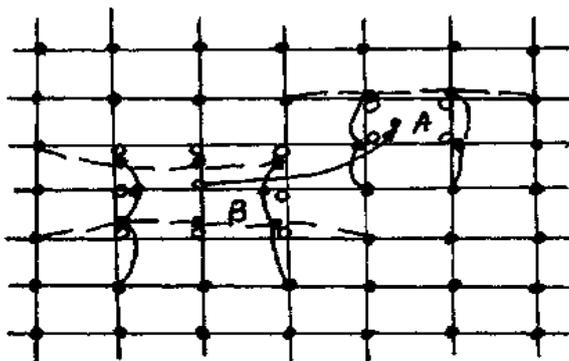


Рис.1.3. Точечные дефекты в плоскости простой кубической решетки:  
А - дислоцированный атом; В - вакансии

Точечные дефекты по своим размерам сопоставимы с размерами атома. В чистых кристаллах возможны два типа точечных дефектов (рис.1.3):

- вакансии;
- межузельные атомы.

*Вакансии* образуются при удалении атома из узла решетки, а *межузельный атом* при введении атома в межузельное пространство.

Образование вакансий и межузельных атомов связано с тем, что колеблющиеся около положения равновесия атомы могут под влиянием привнесенной извне энергии выходить из положения равновесия, образуя после себя в узле кристаллической решетки пустоту (вакансию) и, соответственно, межузельный атом. Множество вакансий и межузельных атомов может быть увеличено резким охлаждением металла, пластичной деформацией, облучением высокоэнергетическими лучами, магнитным полем и др.

Например, количество точечных дефектов в кристаллах при пластической деформации можно определить по зависимости:

$$n/N = (10^{-5} \div 10^{-6}) \epsilon,$$

где

n- предельное число равновесных точечных дефектов;

N- общее число атомов;

$\epsilon$  – деформация, %.

В качестве точечных дефектов чистых металлов можно также рассматривать примесные атомы замещения и внедрения (рис.1.4).

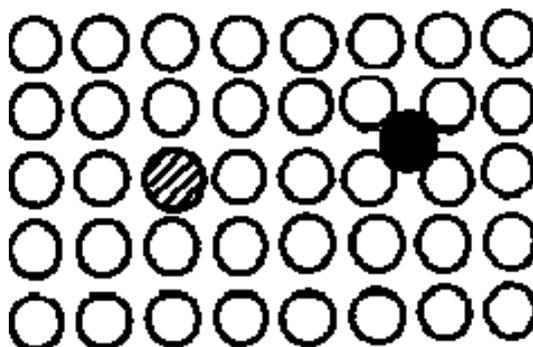


Рис.1.4. Точечные дефекты в плоскости простой кубической решетки:  
 $\circ$  - примесные атомы внедрения;  $\bullet$  – атомы замещения

Все точечные дефекты образуют локальные искажения кристаллической решетки, повышая тем самым энергию, зависящую от размера введенных атомов и расстояние между ними.

*Линейные дефекты* кристаллической решетки имеют размеры, близкие к атомным в двух измерениях и значительную протяженность в третьем. К этому виду дефектов относятся дислокации, простейшими из которых являются краевые и винтовые.

На рис.1.5 показана модель краевой дислокации на примере простого кубического кристалла. Она образуется путем внедрения в кристалл лишней плоскости атомов ABCD называемой экстраплоскостью. Граница экстраплоскости – линия CD – является краевой дислокацией. Экстраплоскость действует как клин, создавая сильное искажение кристаллической решетки, особенно в окрестности атомов, расположенных на линии дислокации CD.

Если экстраплоскость расположена сверху дислокации, то дислокацию называют *положительной* и обозначают знаком  $\perp$ . Дислокация является *отрицательной*, если экстраплоскость расположена под ней. В этом случае она обозначается знаком  $\nabla$ .

*Винтовая дислокация* (рис.1.6) образуется при смещении части кристалла, разделенного плоскостью ABCD, относительно другой в направлении АВ.

Линия DC есть винтовая дислокация. В зависимости от направления движения дислокации бывают правого и левого вращения.

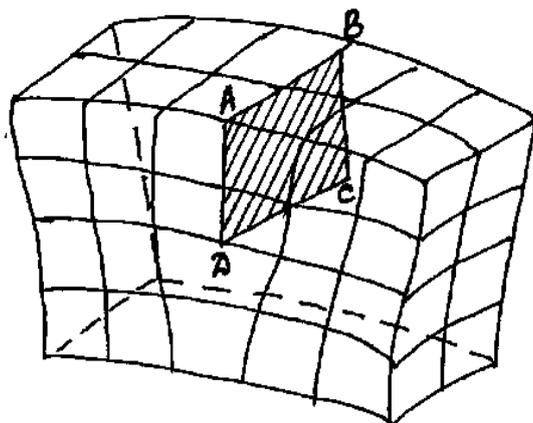


Рис.1.5. Модель положительной краевой дислокации

К *линейным* относят смешанные дислокации, в которых содержатся части в виде краевой и винтовой дислокации.

*Поверхностные дислокации* – это дефекты, имеющие значительную протяженность в двух направлениях. К ним относятся границы между субзернами, зернами, межфазные границы, дефекты упаковки кристаллической решетки, скопление дислокаций в одной плоскости и др.

*Объемные дефекты* имеют протяженность во всех трех измерениях. К этим дефектам относится совокупность точечных, линейных и поверхностных дефектов, которые приводят к искажению кристаллической решетки в больших объемах кристалла.

Кроме того, к объемным дефектам относят наличие фаз, дисперсных выделений, различных включений, а также неравномерность распределения напряжений и деформаций в макрообъемах.

Наличие дефектов кристаллической решетки вызывает ее искажение. Мерой искаженности решетки является вектор Бюргерса, характеризующий энергию дислокации и силы, действующие на нее. Это отрезок, замыкающий контур Бюргерса. Понятие о векторе и контуре Бюргерса дает рисунок 1.7.

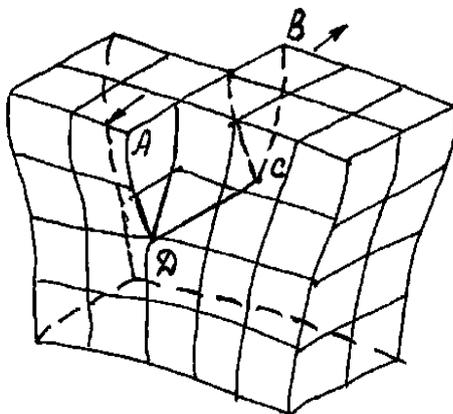


Рис.1.6. Модель винтовой дислокации

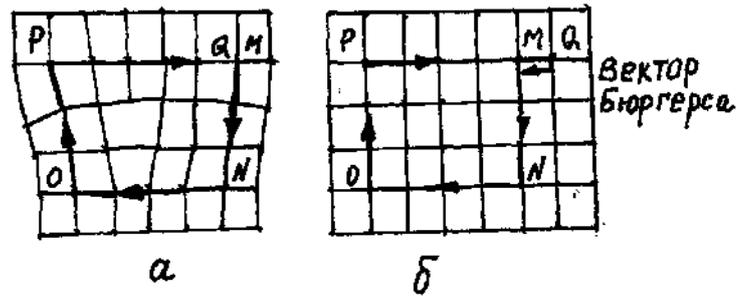


Рис.1.7. Контур Бюргерса, включающий дислокации (а); тот же контур в совершенном кристалле (б)

Вектор, который необходимо ввести в совершенный кристалл для того, чтобы замкнуть контур Бюргерса (на рис. 1.7,б - это отрезок MQ), и есть вектор Бюргерса.

Различают единичные, частичные и супердислокации, вектор Бюргерса которых соответственно равен межатомному расстоянию, меньше или больше его. В реальном кристалле, как правило, присутствуют все виды дислокаций.

Плотность дислокаций  $\rho$  – это суммарная длина  $L_{\Sigma}$  всех дислокационных линий, отнесенная к объему  $V$ ,  $\text{см}^{-2}$ :

$$\rho = L_{\Sigma} / V.$$

### 1.3. Образование и размножение дислокаций

Дислокации возникают при кристаллизации или охлаждении кристаллов после исчезновения жидкой фазы.

В теории дислокации рассматриваются множественные механизмы возникновения дислокаций. Все они сводятся к возникновению локальных участков концентрации напряжений на границе твердых и жидких фаз. Эта концентрация возникает в результате термических градиентов, изменения состава и структуры кристалла, наличия примесей, вакансий, различных случайностей рода кристаллов, размножения зародившихся на первых этапах кристаллизации дислокаций и др.

В поликристаллических телах (металлах) кристаллы (зерна) отличаются пространственной ориентацией. Внутри зерен существуют субзерна, в которых имеются блоки, разориентированные относительно друг от друга на угол менее  $10^{\circ}$ . Границы зерен и блоков являются источниками зарождения дислокаций.

На рис.1.8 показана малоугловая граница блоков. Решетки блоков упруго сопрягаются во всех областях, кроме тех, в которых находятся дислокации.

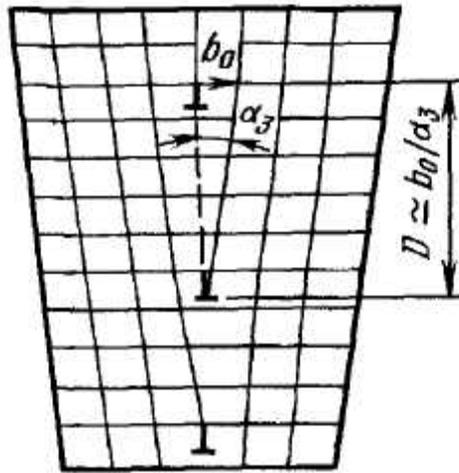


Рис.1.8. Схема малоугловой границы

Расстояние между дислокациями в границе определяется из формулы:

$$D = b/\alpha_3,$$

где

$b$  - вектор Бюргерса;

$\alpha_3$  - угол разориентирования зерен.

Возникновение дислокаций приводит к возникновению дефектов упаковки, т.е. нарушению чередования слоев кристаллической решетки.

Дислокации, возникшие при кристаллизации, имеют свойства размножаться или исчезать при пластической деформации, термообработке или других видах энергетического воздействия. Одна из моделей размножения дислокаций при пластической деформации, предложенная Франком и Ридом, представлена на рис.1.9.

Имеем отрезок дислокации  $AB = L$  (а), закрепленный на концах. На этот отрезок действует нормальная сила  $\tau_b$ . Под действием возрастающего напряжения линейная дислокация ведет себя как упругая нить – она выгибается. Из условия равновесия напряжение, препятствующее этому изгибу, определяется

$$\tau = 0,5Gb/R,$$

где  $G$ - модуль сдвига;

$b$  - вектор Бюргерса;

$R$ - радиус кривизны.

Максимальное значение этого напряжения  $\tau_{\max}$  соответствует  $R=L/2$  (рис.1.9,б).

Последующее увеличение длины будет идти при напряжениях, меньших  $\tau_{\max}$ .

Дальнейший цикл размножения дислокаций показан на рис.1.9.в, г. Цикл завершается образованием замкнутой петли дислокации, а участок АВ подготавливается для генерации новой петли.

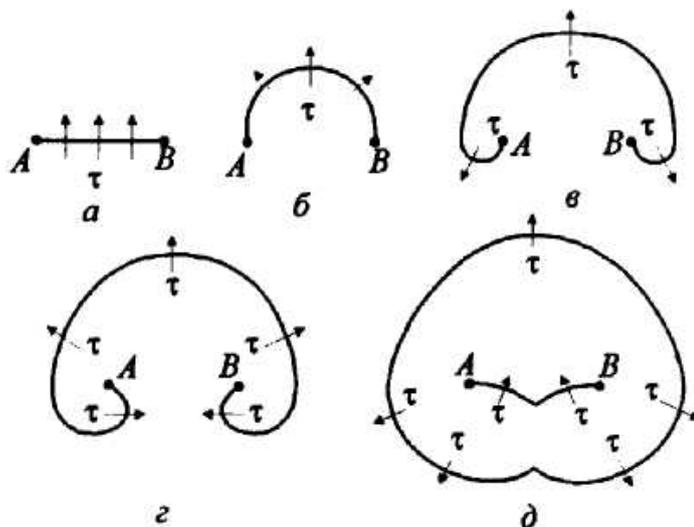


Рис.1.9. Схема действия источника Франка- Рида

Пластическая деформация и термическая обработка приводят к увеличению плотности дислокаций:

- монокристалл –  $10^2 \dots 10^4 \text{ см}^{-2}$ ,
- отожженный монокристалл –  $10^4 \dots 10^6 \text{ см}^{-2}$ ,
- отожженный поликристалл –  $10^7 \dots 10^8 \text{ см}^{-2}$ .

Металлы после холодного пластического деформирования имеют плотность дислокаций  $10^9 \dots 10^{12} \text{ см}^{-2}$ .

#### 1.4. Основные виды обработки поверхностным пластическим деформированием

**Алмазное выглаживание** отличается сравнительно малой площадью контакта инструмент-деталь, поэтому применяется при обработке нежестких деталей, прочных и закаленных материалов. Алмазное выглаживание наружных, внутренних и фасонных поверхностей аналогично обработке роликами и шарами. При алмазном выглаживании обработка поверхностным пластическим деформированием проводится в условиях трения скольжения (с малым коэффициентом трения), а при обкатке роликами и шарами – трения качения. Рабочим инструментом служат простые по конструкции державки с наконечниками из естественных и искусственных алмазов в виде полусферы, цилиндра или конуса. Выглаживают детали жестким или нежестким (подпружиненным) инструментом. Номенклатура деталей, обрабатываемых алмазными выглаживателями, чрезвычайно велика.

Выглаживание является одним из методов отделочно-упрочняющей обработки поверхности пластическим деформированием и заключается в

пластическом деформировании обрабатываемой поверхности скользящим по ней инструментом – выглаживателем, закрепленным в оправке алмазным кристаллом, который обладает следующими свойствами:

- высокой твердостью;
- низким коэффициентом трения;
- высокой степенью чистоты;
- высокой теплопроводностью.

Выглаживание производится: для уменьшения шероховатости поверхности (отделка), упрочнения поверхностного слоя, повышения точности размеров и форм деталей (калибрование).

Прижатый к обрабатываемой поверхности с силой инструмент внедряется в нее на глубину  $R_d$  и при своем движении сглаживает исходные неровности. Высота шероховатости в направлении скорости (продольная шероховатость) обычно значительно меньше, чем высота поперечной шероховатости (в направлении подачи). После прохода инструмента происходит частичное упругое восстановление поверхности. Впереди выглаживателя образуется валик пластически деформированного металла, передняя поверхность выглаживателя нагружается гораздо больше, чем задняя поверхность. По этой причине, а также вследствие адгезионного взаимодействия между деталью и инструментом в процессе выглаживания возникает тангенциальная составляющая силы.

Рассмотрим теперь деформацию поверхностного слоя в направлении подачи.

При продольном перемещении выглаживатель раздвигает металл деформируемых поверхностных неровностей в стороны. При этом со стороны исходной поверхности образуется валик деформированного металла, а со стороны выглаженной поверхности происходит искажение профиля канавок, образовавшихся при предыдущих оборотах детали в результате пластического течения металла, выдавливаемого из-под выглаживателя в сторону выглаженной поверхности. В наибольшей степени искажается профиль канавки, образованной на предыдущем обороте.

После каждого оборота обрабатываемой детали канавка-след выглаживателя перемещается в осевом направлении на величину подачи  $S$ . При этом происходит многократное перекрытие ее при последующих обработках обрабатываемой детали, т.к. ширина канавки больше величины подачи. Со стороны невыглаженной поверхности образуется валик деформированного металла, правая полуповерхность (в направлении подачи) нагружена гораздо больше, чем левая полуповерхность. Поэтому в процессе выглаживания возникает осевая сила.

В результате пластического деформирования обрабатываемой поверхности происходит сглаживание исходных неровностей и образование нового микрорельефа поверхности со значительно меньшей высотой неровностей. Размер детали уменьшается на величину остаточной деформации. На величину и форму образующихся неровностей влияет также неоднородность

шероховатости поверхности и твердость обрабатываемой поверхности, колебания силы выглаживания, вызванные биением детали и др. Это вызывает отклонение исходного микрорельефа от полученного при деформации поверхности.

Образующийся в результате алмазного выглаживания микрорельеф поверхности обуславливается следующими факторами:

- кинематикой процесса (направлением взаимного перемещения инструмента и обрабатываемой детали);
- величиной исходной шероховатости;
- формой и размером рабочей части алмаза;
- величиной внедрения алмаза в обрабатываемую поверхность;
- пластическим течением материала, обуславливающим появление вторичной шероховатости;
- шероховатостью рабочей части алмаза;
- величиной упругого восстановления поверхности после выглаживания.

Формирование поверхностного слоя при алмажном выглаживании происходит вследствие пластического деформирования обрабатываемой поверхности. Под действием радиальной силы, действующей на поверхность контакта алмаза с деталью, возникают контактные давления. Если их величина превышает предел текучести, возникает пластическая деформация тонких поверхностных слоев. При пластической деформации поверхностный слой имеет специфическое волокнистое строение, исходная кристаллическая решетка искажается.

Эффективность алмазного выглаживания различных материалов в значительной мере определяется их исходной структурой.

Исследованиями установлено, что при выглаживании наиболее интенсивно возникает деформация в феррите, менее интенсивно – в перлите и мартенсите.

Высокая эффективность упрочнения объясняется более высокой плотностью дефектов, образующихся в поверхностном слое, за счет концентрации дислокаций. При этом создается тонкое структурное состояние металла, которое обеспечивало бы максимальную задержку дислокаций и минимальный их выход на поверхность. При алмажном выглаживании плотность дислокаций в поверхностном слое близка к предельному значению. С увеличением расстояния от поверхности плотность дислокаций уменьшается.

Особенность процесса алмазного выглаживания: если при других видах упрочнения полностью или частично удаляется слой металла, деформированный на предыдущей операции, то при алмажном выглаживании тот слой не удаляется, а претерпевает дополнительную упругопластическую деформацию.

Оптимальное усилие  $P_y = 300-200\text{Н}$ . При  $P_y = 300\text{Н}$  возрастает глубина упрочненного слоя, увеличивается микротвердость в нижних слоях, однако уменьшение микротвердости в верхнем тонком поверхностном слое происходит за счет уменьшения пластичности.

### **Силы, возникающие при алмазном выглаживании**

При выглаживании сила  $P$  раскладывается на составляющие: нормальную  $P_y$ , тангенциальную  $P_z$  и силу подачи  $P_x$ .

Величина сил выглаживания зависит от радиуса формы рабочей части выглаживателя, пластичности и шероховатости обрабатываемой поверхности, от глубины внедрения выглаживателя, подачи и др.

$$P_x = C_x R^{0,5} h^{4,5} \sigma_T, \quad P_y = C_y R h \sigma_T, \quad P_z = C_z R^{0,5} h^{4,5} \sigma_T,$$

где  $C_x$ ;  $C_y$ ;  $C_z$ - коэффициенты, учитывающие конкретные условия обработки;

$R$ - радиус рабочей части выглаживателя;

$h$ - глубина внедрения выглаживателя;

$\sigma_T$  - предел текучести обрабатываемого материала.

Исследованиями установлено, что основной силой, создающей необходимое давление в зоне контакта инструмента с деталью, является нормальная составляющая  $P_y$ . Составляющие  $P_x$  и  $P_z$  в 10-20 раз меньше  $P_y$ . Поэтому в качестве силы выглаживания принимают  $P_y$ . Для расчетов берут:

$$P = C \varepsilon \sigma_T R^2,$$

где  $\varepsilon = h/R$ .

Так как величина  $\sigma_T$  неудобна для расчетов, то удобнее выражать сопротивление деформации поверхностного слоя металла через величину его твердости  $HV$ .

Заменим  $R$  приведенным радиусом:

$$R = (DR)^2 / (D+R)^2,$$

где  $D$ - диаметр обрабатываемой детали.

Окончательно:

$$P = \pi \varepsilon HV (DR)^2 / (D+R)^2.$$

### **Инструменты для выглаживания**

Для изготовления выглаживателей используют природные и синтетические алмазы.

Стойкость природных и искусственных алмазов примерно одинакова.

Инструмент со *сферической* (рис.1.10,а) формой заточки позволяет обрабатывать наружные, внутренние и плоские поверхности как методом выглаживания, так и вибровыглаживанием.

*Цилиндрическую* форму (рис.1.10,б) применяют только для обработки наружных цилиндрических поверхностей.

Тороидальная форма (рис.1.10,в) широкого применения не нашла из-за отсутствия природных и синтетических алмазов большого размера.

Конический выглаживатель (рис.1.10,г) работает большой поверхностью конуса.

**Применение.** Алмазным выглаживателем можно обрабатывать почти все применяющиеся в промышленности металлы и сплавы, за исключением титана, циркония и ниобия, так как они налипают на рабочую часть выглаживателя.

**Детали:** все виды поверхностей (наружные, внутренние, плоские, профильные) валов, штоков, цилиндров, поршневых пальцев и т.д.

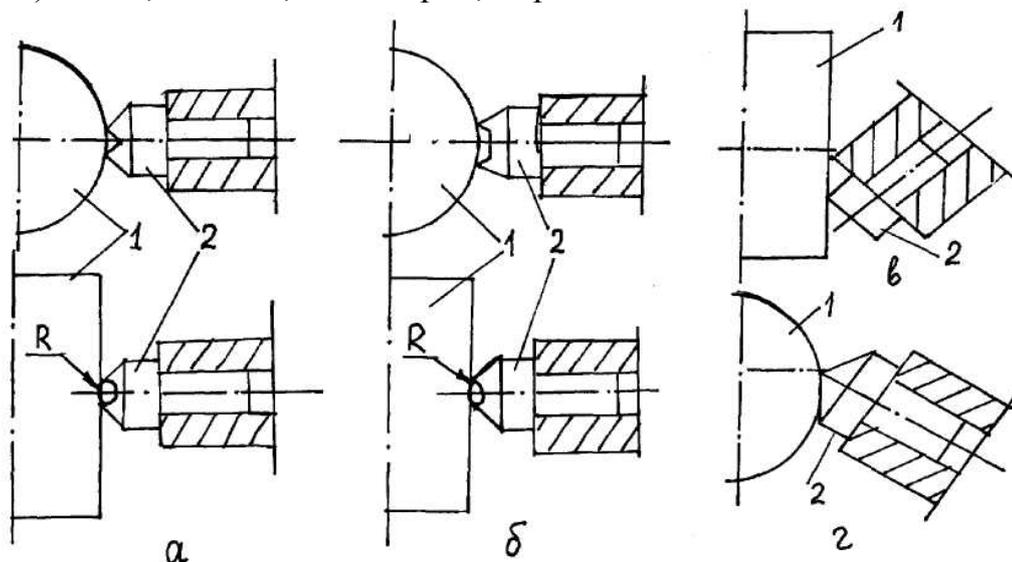


Рис. 1.10. Схема установок выглаживателей при обработке цилиндрической поверхности: а – сферическая форма заточки, б – цилиндрическая, в – тороидальная, г – коническая; 1 – обрабатываемая поверхность, 2 - заточка

Нельзя использовать для деталей имеющих неравномерную твердость.

### Вибровыглаживание

При вибрационном выглаживании инструменту в виде сферы (другие формы заточки неприменимы) дополнительно придается возвратно-поступательное перемещение по поверхности детали (рис.1.11).

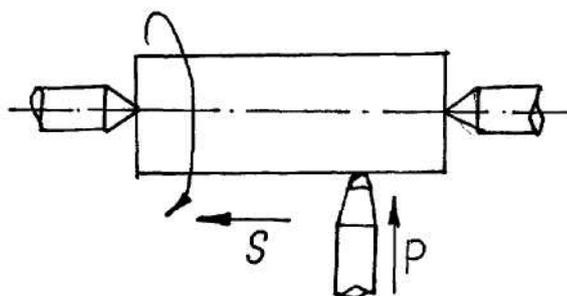


Рис.1.11. Схема вибровыглаживания

В результате на поверхности образуется синусоидальный канал. При обработке инструмент скользит либо по исходной, либо по частично выглаженной поверхности, а при каждом двойном ходе изменяется направление движения инструмента и дуга контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании, по характеру и плотности синусоидальных каналов подразделяется на 4 вида.

Варьирование форм, размеров и расположения микронеровностей по поверхности достигается изменением режимов обработки:

- скорости вращения детали;
- подачи инструмента;
- амплитуды и частоты его колебаний;
- силы поджима инструмента к детали;
- радиуса сферической части инструмента.

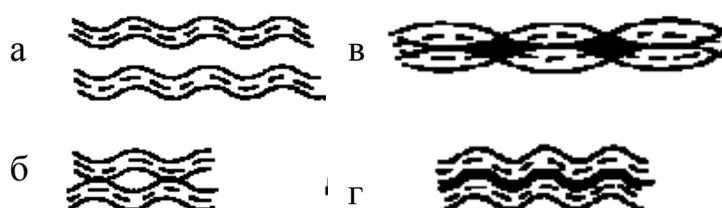


Рис.1.12. Микрорельеф, получаемый при вибровыглаживании:  
а - каналы не касаются друг друга; в - каналы касаются друг друга;  
б - каналы пересекаются; г - каналы накладываются

В качестве инструмента здесь применяют шарики диаметром 4-10 мм, и сферические наконечники из алмазов. В первом случае обработку ведут трением качения, во втором – трением скольжения. В первом случае называется *виброобкатывание*, во втором – *вибровыглаживание*.

Преимущества вибровыглаживания перед выглаживанием:

- увеличение остаточных напряжений в 1,3-1,7 раз;
- увеличение длина канала в 1,5-2 раза;
- повышение износостойкости детали в 1,5 раза;
- возможность изготовления любого микрорельефа для контактирующих тел;
- возможность удержания масляной пленки в каналах при трении;
- упрочнение с оплавлением поверхности детали;

**Дорнование** – эффективный метод калибрования и отделки внутренних поверхностей деталей машин. Инструмент перемещается в отверстиях с натягом, он является основным технологическим параметром процесса. Процесс выполняется за один или несколько проходов инструмента. Калибрование повышает точность отверстий и обеспечивает высокое качество поверхности; процесс производителен. Дорнование применяется для обработки отверстий

(рис.1.13). Формообразующая обработка применяется для получения на поверхности детали мелких шлицов и других рифлений. Толщина упрочненного слоя при дорновании регулируется натягом, т.е. разностью диаметров дорна «Д» и отверстия «d» заготовки.

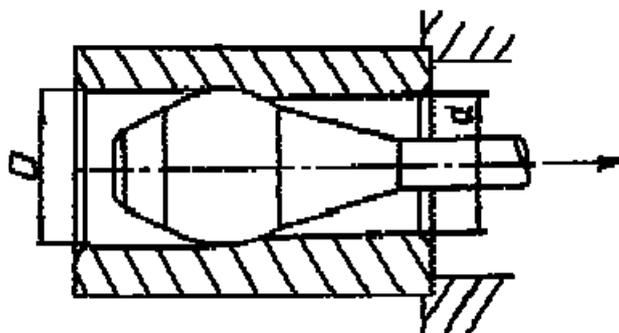


Рис.1.13. Дорнование

Методы накатывания, выглаживания и деформирующего протягивания относятся к методам *статического поверхностного деформирования*. Характерным признаком этих методов является стабильность формы и размеров ОД в стационарной фазе процесса.

Наряду с этими методами в машиностроении существует большое число методов поверхностного пластического деформирования, основанных на динамическом (ударном) воздействии инструмента на поверхность детали (рис.1.14). В этих процессах инструмент внедряется в поверхностный слой детали перпендикулярно профилю поверхности или под некоторым углом к ней. Многочисленные удары, наносимые инструментом по детали по заданной программе или хаотично, оставляют на ней большое число локальных пластических отпечатков, которые в результате покрывают (с перекрытием или без него) всю поверхность. Размеры очага деформации зависят от материала детали, размеров и формы инструмента и от энергии удара по поверхности.

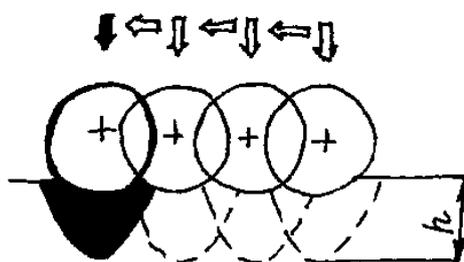


Рис.1.14. Схема обработки поверхностным пластическим деформированием при ударном воздействии инструмента

*При чеканке* наносят удары ударниками с бойками по обрабатываемой поверхности при помощи механических, пневматических или

электромеханических специальных приспособлений. После чеканки твердость поверхности возрастает на 30...50 % , глубина упрочнения – до 30 мм. Чеканка эффективна для обработки деталей машин, таких как зубчатые колеса, шлицевые валы из различных материалов. Хорошо упрочняются чеканкой сварные швы. К методам *ударного поверхностного пластического деформирования* относятся чеканка, обработка дробью, виброударная, ультразвуковая, центробежно-ударная обработка и др.

Дробеструйная обработка (наклеп) осуществляется за счет кинетической энергии потока чугунной, стальной или другой дроби, который направляется, например, роторным дробестетом (рис.1.15)

Центробежно-шариковая обработка осуществляется за счет кинетической энергии стальных шариков (роликов), расположенных на периферии вращения диска (рис.1.16).

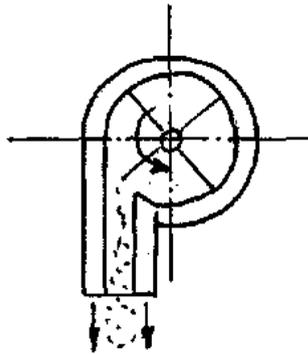


Рис.1.15. Дробеструйная обработка детали

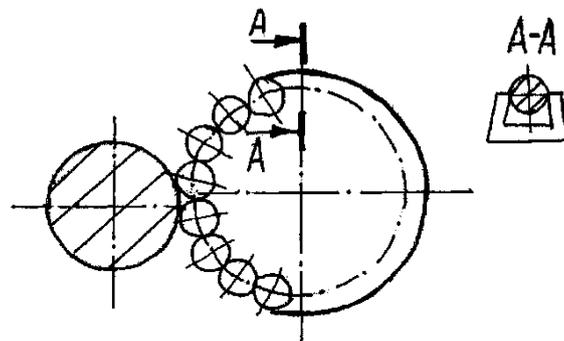


Рис.1.16. Центробежно-шариковая обработка

При вращении диска под действием центробежной силы шарики отбрасываются к периферии обода, взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью и отбрасываются внутрь гнезда.

Поверхностное пластическое деформирование:

- повышает плотность дислокаций в упрочненном слое;

- измельчает исходную структуру;
- повышает величину твердости поверхности;
- уменьшает величину шероховатости;
- повышает износостойкость деталей;
- увеличивает сопротивление схватыванию поверхностей;
- увеличивает предел выносливости.

### 1.5. Сущность упрочнения пластическим деформированием

Поликристаллические твердые тела состоят из большого числа зерен (кристаллов), разделенных между собой границами. Каждое зерно содержит дефекты. Зерна имеют различную ориентировку (рис.1.17).

При приложении внешнего напряжения к металлу пластическая деформация в первую очередь произойдет в зерне, наиболее благоприятно ориентированном к внешнему напряжению (т.е. с наибольшим касательным напряжением). С ростом внешнего напряжения наблюдается постепенное вовлечение остальных зерен в процессе пластической деформации при сохранении сплошности зерна. На рисунке показана схема передачи пластической деформации от зерна к зерну. Под действием внешнего сдвигающего напряжения  $\tau_s$  дислокации, генерируемые активным источником В, приходят к границе зерна и задерживаются около нее. По мере накопления дислокаций у точки «Р» растет напряжение. Однако этого недостаточно, чтобы перейти из одного зерна в другое через границу MN. Поэтому распространение скольжения от одного зерна к другому осуществляется за счет того, что при достижении определенного значения напряжения в точке «Р» возбуждается источник дислокации в соседнем зерне, например в точке А.

Движение дислокаций, генерируемых источником А, будет происходить по наиболее благоприятно ориентированной плоскости скольжения.

Рассмотренный механизм торможения дислокаций у границ зерна называется *барьерным упрочнением*.

Упрочнение более интенсивно происходит на границах зерен, мелкое зерно упрочняется интенсивнее крупного.

Напряжение текучести  $\tau_T$  в зерне диаметром  $d$ , в соответствии с соотношениями Холла-Петча, зависит от составляющих:

$$\tau_T = \tau_0 + kd^{0,5},$$

где  $\tau_0$  – напряжение как результат сопротивления движению дислокаций в теле зерна, не зависящего от размера зерна (внутренне трение);

$k$  – константа, характеризующая трудность эстафетной передачи пластической деформации от зерна к зерну.

Напряжение текучести (сопротивление деформации) возрастает с уменьшением размера зерна не из-за наличия границы самой по себе, а из-за взаимодействия между зернами, разделенными этой границей.



К первой группе относятся методы, основой которых является перенос энергии от лучевого источника к обрабатываемой поверхности, которая в результате мощного локального энергетического воздействия приобретает новые свойства.

Ко второй группе относятся методы, основу которых составляет перенос вещества от некоторого источника к предварительно очищенной обрабатываемой поверхности, на которой это вещество оседает, формируя защитное покрытие.

В третьей группе используется источник вещества, крупные частицы которого разогреваются и разгоняются до высокой энергии и внедряются или прилипают к обрабатываемой поверхности, формируя на ней слой нанесенного вещества.

## 2.1. Лазерное упрочнение

Основой процесса лазерного упрочнения является быстрый нагрев до высокой температуры (температуры плавления) поверхностного слоя металла с последующим быстрым охлаждением путем отвода тепла в основной объем металла, который остается практически холодным.

В принципе необходимое повышение температуры металла можно получить и стандартными методами – нагревом в термической или индукционной печи. Однако эти методы часто являются непригодными из-за неоднородности нагрева. Кроме того, в крупногабаритных деталях очень часто необходимо закалить только часть поверхности, а не весь объем детали. Поверхностную обработку детали можно сделать только лазерной термообработкой, которая может проводиться с оплавлением и без оплавления поверхностного слоя. Чаще всего используют обработку без оплавления с сохранением исходной шероховатости  $R_a=0,16-1,25\text{мкм}$ . Глубина упрочняемого слоя металла определяется величиной допустимого линейного износа.

Производительность лазерного упрочнения определяется:

$$G_{\text{лаз.терм.}} = K_{\text{п}} V d_0,$$

где

$K$ - коэффициент перекрытия;

$V$ - скорость движения луча (детали);

$d_0$ - диаметр пучка (ширина дорожки упрочнения),  $d_0=1-1,5$  мм. И более.

Возможна обработка *перекрывающимися* и *неперекрывающимися* дорожками. При наложении дорожки упрочнения происходит частичный нагрев предыдущей упрочненной зоны, что может привести к отпуску и снижению твердости. При обработке неперекрывающимися дорожками зазор между ними составляет 10-30% от площади обрабатываемой поверхности, происходит уменьшение износа в 2-3 раза.

Лазерное упрочнение применяется для обработки коленчатых валов двигателей, гильз цилиндров, зубчатых колес, деталей химического, нефтяного и бурового оборудования.

## **2.2. Лазерная наплавка**

Лазерная наплавка порошковых материалов обеспечивает получение наплавленного слоя высокой степени однородности и качества без значительного термического влияния на нижележащие слои металла. Применяют порошки хрома, бора, никеля, кремния.

Сущность процесса наплавки заключается в нанесении на поверхность детали слоя порошка и последующего его расплавления лучом лазера. Порошок диффундирует в основной металл, а быстрое остывание позволяет получить однородную структуру поверхностного слоя. После последующей шлифовки толщина наплавки может достигать 0,2-0,4 мм, повышается износостойкость наплавленного слоя в 2-3 раза.

## **2.3. Лазерное оборудование**

*Лазерная установка* предназначена для поверхностного упрочнения металла, содержит в качестве основных элементов лазер с блоком питания, оптическую систему для транспортировки и фокусирования лазерного луча, систему позиционирования обрабатываемой детали, систему управления и контроля параметров обработки.

Лазеры могут быть электроразрядные CO<sub>2</sub>- лазеры и твердотельные Nd-лазеры.

Электроразрядные CO<sub>2</sub>- лазеры имеют большую длину волны (10,6 мкм), электроразрядные возбуждения, прокачку газовой смеси (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He) по замкнутому контуру, используются для непрерывной обработки. Их мощность составляет 1-25 кВт. Твердотельные Nd- лазеры работают от активного элемента в виде стержня или пластины в прерывистом и непрерывном режимах. Эти лазеры имеют мощность до 200 Вт и до 3 кВт, длину волны менее 10,6 мкм и, следовательно, более высокое поглощение в металле. Можно использовать транспортировку луча по световолокнам. Для поверхностного упрочнения металла предпочтительнее применять твердотельные Nd- лазеры.

## **2.4. Электронно-лучевая обработка**

Здесь обработка поверхности производится мощным электронным пучком в вакуумной среде. При этом необходима защита оператора от рентгеновского излучения, что препятствует широкому массовому распространению такого упрочнения.

Преимущества по сравнению с лазерной обработкой:

- более высокий КПД;

- более высокая мощность;
- меньшая стоимость.

Применяют наплавку с порошком алюминия, железа и никеля в среде азота. Износ уменьшается в 2-4 раза.

Лазерное упрочнение применяется для обработки коленчатых валов двигателей, гильз цилиндров, зубчатых колес, деталей химического, нефтяного и бурового оборудования.

## **2.5. Электронно-пучковое оборудование**

Электронный, как и лучевой источник энергии, по своим технологическим возможностям близок к лазерным источникам. Установка содержит: электронную пушку с блоком питания, герметичную вакуумную камеру с устройствами перемещения обрабатываемой детали или пушки, вакуумную систему с насосами, систему управления и контроля.

Мощность до 20 кВт.

Электронно-пучковое оборудование применяется в России ограничено.

## **2.6. Методы детонационного и плазменного нанесения покрытия**

Эти методы относятся к газотермическим методам, действие которых основано на полном или частичном нагреве материала покрытия до состояния плавления и распылении его газовой струей. Напыляемый материал может быть в виде проволоки или порошка. Нагрев напыляемого материала может производиться от газового пламени, плазмы электрической дуги или от детонации взрывчатой газовой смеси.

В детонационном методе используется энергия кислородно-ацетиленовых взрывов, которая обеспечивает необходимый разогрев и ускорение напыляемого материала, а при плазменном – энергия плазменной струи. Распыляемые частицы материала ударяются в подложку и расплющиваются, образуя тонкие чешуйки, закрепляющиеся на поверхностном шероховатом слое путем механического и физико-механического взаимодействия с материалом основы. В результате взаимодействия отдельных чешуек образуется своеобразная структура напыляемого покрытия. Чем больше скорость соударения частиц, тем выше прочность наносимого покрытия. При детонационном напылении скорость движения напыляемого порошка составляет 600-1000 м/с, что в 4-7 раз больше, чем при плазменном и газоплазменном методах напыления.

Особенность этих методов упрочнения – возможность наносить тугоплавкие материалы на металлическую подложку без значительного ее нагрева (не более 150<sup>0</sup>С), т.е. наносить покрытия на окончательно термообработанные и упрочненные стали, алюминиевые, титановые и другие

сплавы после финишной механической обработки, не опасаясь изменения свойств структуры поверхностного слоя.

Процесс плазменного напыления происходит в два этапа:

- 1) полет и распыление частиц напыляемого материала;
- 2) удар об обрабатываемую поверхность, соединение частиц с нею и между собой.

Образование покрытия происходит вследствие соударения частиц с поверхностью обрабатываемой детали, их сильного деформирования, расплющивания и разбрызгивания. В результате получаемое покрытие, так же как и в случае детонационного напыления, состоит как бы из чешуек напыляемого материала, соединенных между собой по контактной поверхности участками сваривания, поэтому прочность и плотность покрытия ниже прочности и плотности исходного материала.

При детонационном напылении кинетика и механизм формирования покрытий определяются пластичной деформацией частиц порошка и подложки в зоне соударения, где происходит локальное повышение активности твердой подложки под действием давления от удара твердых частиц, вызывающего упругие искажения решетки и пластическую деформацию.

Это приводит к увеличению прочности сцепления покрытия с основным металлом.

Для повышения физико-механических свойств напыленного слоя и улучшения адгезии к подложке применяют дополнительную операцию оплавления. Сущность ее: напыленный слой нагревают до температуры, близкой к его плавлению. В результате нагрева между напыленным слоем и основным металлом протекает диффузионный процесс, и при остывании образуется плотное покрытие. Поры, остающиеся после напыления, заполняются расплавленной частью напыленного материала. После остывания получается равномерный тонкий без пор однородный слой. При этом охлаждение ведут вместе с печью.

Способы оплавления:

- плазменной или газовой горелкой;
- в электрической печи;
- в соляной ванне;
- ТВЧ.

Методом детонаций напыляют пластичные металлы и сплавы (Cu, Ni, Fe и др.), твердые непластические металлы и тугоплавкие соединения (W, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и др.)

*Применение:* моторостроение; авиационное, станко- и приборостроение; химическое и металлургическое машиностроение; инструментальное производство; ракетная, космическая и ядерная техника.

При плазменном напылении в качестве плазмообразующих газов используют аргон, неон, азот, водород, гелий, аммиак, природный газ и их смеси. Порошок вводится в плазменную струю.

## 2.7. Оборудование для детонационного нанесения покрытия

Разработаны конструкции детонационных установок с внутренним и внешним смесеобразованием. В первом случае роль камеры для образования горючей смеси выполняет ствол; во втором – в ствол подается горючая смесь, подготовленная в смесителе.

Детонационная установка с внутренними смесеобразователями представляет собой водоохлаждаемый ствол длиной 1-1,8 м с внутренним диаметром от 10 до 40 мм. В ствол подается смесь кислорода и ацетилена вместе с порцией порошка. Взрывающаяся газовая смесь воспламеняется при помощи электрического импульса, и детонационная волна перемещается по стволу, ускоряя и нагревая порошок. Частицы порошка ускоряются до скорости 500-1000 м/с и ударяются в деталь, образуя пятно диаметром, зависящим от диаметра ствола. Затем ствол очищается азотом, и процесс повторяется. Частота повторений 4-8 циклов/с.

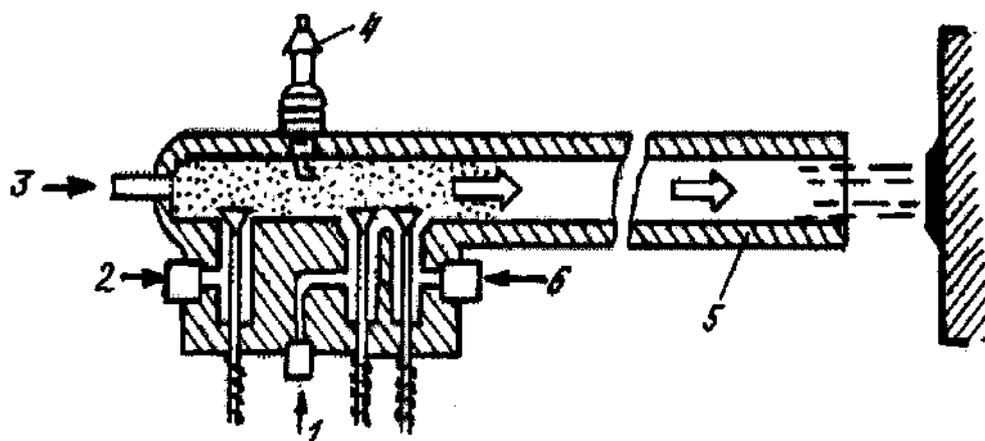


Рис.2.1. Схема детонационной установки с внутренним смесеобразованием:  
1-ацетилен; 2- азот; 3- подача порошка; 4- свеча зажигания;  
5- выходная труба; 6- кислород

## 2.8. Плазменное поверхностное упрочнение деталей

Одной из наиболее перспективных обработок является плазменная технология, интенсивно разрабатываемая как в нашей стране, так и за рубежом. Использование низкотемпературной плазмы эффективно не только для переплава металлов и сплавов; напыления износостойких, жаропрочных и коррозионностойких покрытий резки и сварки различных материалов, но и для поверхностного упрочнения различных изделий.

Плазменное поверхностное упрочнение находит широкое применение как в условиях мелкосерийного и единичного (в том числе ремонтного), так и крупносерийного и массового производства. Сущность его заключается в

термических фазовых и структурных превращениях, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменной струей (дугой) и теплоотводе в материал детали.

## 2.9. Оборудование для плазменного упрочнения деталей

Для осуществления различных видов плазменной обработки материалов (резки, сварки, напыления, поверхностного упрочнения, легирования) используются установки, которые включают источник питания с аппаратурой управления; механизмы, обеспечивающие равномерное перемещение плазматрона над обрабатываемой поверхностью, и плазматрон.

Установка для микроплазменной обработки МПУ-4 обеспечивает надежную работу в четырех режимах горения дуги:

- А - непрерывный режим тока дуги прямой полярности;
- В - импульсный режим тока дуги прямой направленности;
- С - импульсный режим тока дуги прямой и обратной направленности;
- Д - непрерывный режим тока дуги обратной полярности.

Для генерирования плазменного источника нагрева широко используются плазматроны с открытой дугой (рис.2.2,а), или прямого действия (положительный заряд подается на упрочняемую деталь), и плазматроны с замкнутой дугой – струей (рис.2.2,б), или косвенного действия (отрицательный и положительный заряды подаются на детали плазматрона - соответственно катод и анод). Плазматрон является основным элементом энергетической части установок для плазменного упрочнения деталей и представляет собой устройство, генерирующее стабилизированный в пространстве поток дуговой плазмы с температурой до нескольких тысяч градусов.

К плазматронам предъявляются следующие требования:

- мощность;
- высокая энергетическая эффективность;
- стабильность параметров плазменного потока;
- большая длительность непрерывной работы;
- надежность конструкции;
- простота обслуживания;
- возможность использования различных плазмообразующих газов.

Мощность плазматрона зависит от вида электроплазменного процесса, может меняться от единицы киловатт до нескольких сотен мегаватт. Для напыления и плазменного упрочнения используются дуговые плазматроны мощностью до 100 кВт.

Мощность плазматрона зависит от вида электроплазменного процесса, может меняться от единицы киловатт до нескольких сотен мегаватт. Для напыления и плазменного упрочнения используются дуговые плазматроны мощностью до 100 кВт.

### Техническая характеристика установки МПУ-4

Напряжение питающей сети, В	220-380
Количество фаз	3
Частота питающей сети, Гц	50
Диапазон токов дуги, А:	
прямой полярности	3-30
обратной полярности	1,5-15
Напряжение холостого хода, В	60-80
Длительность импульса тока прямой и обратной полярности, а также длительность паузы, с	0,02-0,5
Ток дежурной дуги, А	3-6
Напряжение холостого хода дежурной дуги, В	80 ± 10%
Длина дуги, мм	3-6
Расход плазмообразующего газа, л/мин	0,2-0,5
Потребляемая мощность, кВт	3,5
Масса, кг	100

Мощность плазматрона зависит от вида электроплазменного процесса, может меняться от единицы киловатт до нескольких сотен мегаватт. Для напыления и плазменного упрочнения используются дуговые плазматроны мощностью до 100 кВт.

Высокая энергетическая эффективность плазматронов – это возможность эффективного преобразования электрической энергии в тепловую, получение максимального КПД технологического процесса.

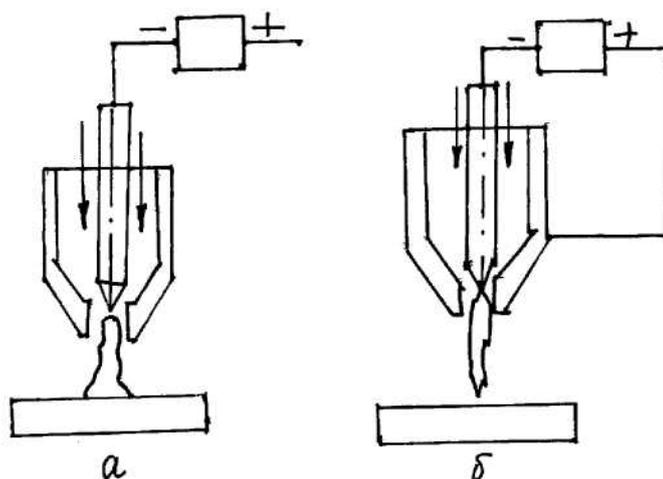


Рис 2.2. Схемы плазматронов:  
а – с открытой дугой, б – с замкнутой дугой – струей.

Эффективность ведения технологического процесса зависит от стабильности параметров плазменного потока. В начале плазматроны могут

создавать значительные пульсации параметров плазменного потока, что приводит к неравномерному вводу тепла в упрочненное изделие и, как следствие, неравномерному распределению твердости по длине и ширине упрочненной зоны.

Дуговые плазматроны, предназначенные для плазменного поверхностного упрочнения, могут работать 200 часов и более без смены электродов.

Надежность конструкции плазматрона определяется многими факторами: простотой его конструкции, надежностью сборки и разборки, удобством монтажа и т.д.

Под простотой оборудования следует понимать простоту крепления плазматрона в технологической зоне, сборки и разборки, точность возбуждения электрического разряда без ввода дополнительных устройств в область разрядного канала.

Процесс эрозии электродов в дуговых плазматронах ограничивается применением разнообразных плазмообразующих средств.

Плазматроны классифицируются по ряду признаков.

По назначению плазматроны для поверхностного упрочнения подразделяют на машинные и ручные.

По принципу работы плазматроны могут быть с внешней, или вынесенной дугой (плазматроны прямого действия), и с внутренней дугой (плазматроны поверхностного действия). Наиболее широкое применение для упрочнения деталей сложной формы получили плазматроны косвенного действия.

По роду используемого тока различают плазматроны постоянного тока и плазматроны переменного тока. Наибольшее распространение получили плазматроны постоянного тока, так как более простые по своим конструктивным схемам и обладают высокой эффективностью преобразования электрической энергии в тепловую.

По роду применяемой рабочей среды можно выделить три типа плазматронов: с нейтральным рабочим газом, с окислительной средой и водой. Из газов, нейтральных по отношению к рабочим электродам, наибольшее применение получили аргон, азот, водород и их смеси. С точки зрения экономичности процесса целесообразно использовать плазматроны, работающие на воздухе, однако стойкость электродов у таких плазматронов относительно невелика из-за значительной их эрозии.

При всем разнообразии конструкций все плазматроны имеют три основных элемента: электрод (катод), сопло (у плазматронов косвенного действия - анод) и изолятор (промежуточная вставка). Изолятор разделяет электрод и сопло, которые находятся под разными электрическими потенциалами.

Электроды плазматрона по типу и по конструкции зависят от состава плазмообразующей среды. В качестве материала для электродов, работающих в окислительных средах, используют графит, в нейтральных газах – вольфрам. Конструктивно электроды выполняют двумя способами: в виде прутка, который фиксируется цанговым зажимом, закрепленным в электродном узле плазматрона, и медной державки с запрессованным в нее стрижнем электрода.

Сопло плазматрона предназначено для формирования геометрических и энергетических параметров дуги. Основные параметры сопла – диаметр и высота канала. Для упрочнения деталей желательнее уменьшать диаметр сопла и увеличивать высоту канала сопла, что благоприятно сказывается на технологических возможностях плазматрона, так как при этом увеличивается скорость упрочнения и глубина упрочненной зоны. Однако значительное уменьшение диаметра сопла приводит к снижению его стойкости, и возникают трудности с зажиганием дуги.

К материалу промежуточных вставок предъявляются следующие требования:

- высокая электрическая прочность, так как возбуждение дуги осуществляется чаще всего с помощью высоковольтного высокочастотного разряда;
- высокая механическая прочность, поскольку промежуточные вставки выполняют функции несущих частей конструкции, на которой крепятся остальные узлы плазматрона;
- возможность обработки режущим инструментом;
- термостойкость, так как подвержены воздействию теплового и светового излучения дуги;
- герметичность, поскольку через них проходят коммуникации плазмообразующего газа и охлаждения.

### **3. Технологические варианты плазменного упрочнения деталей**

Имеются следующие варианты плазменного поверхностного упрочнения:

- упрочнение без оплавления поверхности детали;
- упрочнение с оплавлением поверхности детали;
- упрочнение с зазором между упрочненными зернами;
- упрочнение с перекрытием упрочненных зон;
- химико-термическая плазменная обработка;
- плазменное упрочнение в сочетании с другими способами объемной или поверхностной термической обработки.

Плазменное упрочнение без оплавления поверхности является наиболее распространенным для стальных деталей, так как обеспечивает сохранение качества (величины шероховатости), достигнутого предшествующей механической обработкой.

Упрочнение с оплавлением поверхности стальных и чугунных деталей применяется, когда необходимо получить особые эксплуатационные свойства. Например, обработка валков черновой группы клетей станов горячей прокатки, к шероховатости рабочей поверхности которых не предъявляются высокие требования. При обработке чугунных деталей на поверхности образуется отдельный слой с высокой износостойкостью.

Плазменное упрочнение поверхностей деталей без перекрытия зон обработки приводит к получению равномерной твердости на поверхности, а с

перекрытием зон обработки – к появлению неравномерной твердости из-за образования зон отпуска в местах перекрытия.

Возможность реализации химико-термической обработки при плазменной обработке определяется родом газа, используемого в качестве плазмообразующего, например азотирование. Здесь в качестве плазмообразующего газа применяется смесь аргона с азотом.

Возможно применение технологии комплексного упрочнения, включающей предварительную или последующую объемную термическую обработку и плазменное упрочнение; закалку в ТВЧ и плазменную обработку.

#### **4. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение, ионное магнетронное распыление, ионное легирование**

##### **4.1. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение**

Среди методов нанесения защитных покрытий, основанных на воздействии на поверхность детали потоков частиц и квантов с высокой энергией, большое внимание уделяется вакуумным ионно-плазменным методам. Характерной их чертой является прямое преобразование электрической энергии в энергию технологического воздействия, основанное на структурно-фазовых превращениях в осажденном на поверхности конденсате или в самом поверхностном слое детали, помещенной в вакуумную камеру.

Основным достоинством данных методов является возможность создания весьма высокого уровня физико-механических свойств материалов в тонких поверхностных слоях, нанесение плотных покрытий из тугоплавких химических соединений, а также алмазоподобных, которые невозможно получить традиционными методами. Кроме того, эти методы позволяют:

- обеспечивать высокую адгезию покрытия к подложке;
- получать равномерные покрытия по толщине на большой площади;
- варьировать состав покрытия в широком диапазоне, в пределах одного технологического цикла;
- получить высокую чистоту поверхности покрытия;
- обеспечивать экологическую чистоту производственного цикла.

*Методы вакуумной ионно-плазменной технологии:*

##### **1) Модифицирование поверхностных слоев:**

- ионно-диффузионное насыщение; (ионное азотирование, науглероживание, борирование и др.);
- ионное (плазменное) травление (очистка);
- ионная имплантация (внедрение);
- отжиг в тлеющем разряде;

##### **2) Нанесение покрытий:**

- полимеризация в тлеющем разряде;

- ионное осаждение (в триодной распылительной системе, диодной распылительной системе, с использованием разряда в полой катодной системе);
- электродуговое испарение;
- ионно-кластерный метод;
- катодное распыление (на постоянном токе, высокочастотное);
- химическое осаждение в плазме тлеющего разряда.

Современные вакуумные ионно-плазменные методы упрочнения (модифицирования) поверхностей деталей машин включают следующие этапы:

- генерацию (образование) корпускулярного потока вещества;
- активизацию, ускорение и фокусировку;
- конденсацию и внедрение в поверхность деталей (подложек).

*Генерация:* корпускулярного потока вещества возможна его испарением (сублимацией) и распылением.

*Испарение:* переход конденсированной фазы в пар осуществляется в результате подводки тепловой энергии к испаряемому веществу.

Твердые вещества обычно при нагревании расплавляются, а затем переходят в газообразное состояние. Некоторые вещества переходят в газообразное состояние, минуя жидкую фазу. Такой процесс называется *сублимацией*.

Нагрев испаряемого вещества может осуществляться:

- за счет выделения Джоулева тепла при прохождении электрического тока через испаряемый материал или через испаритель;
- в результате бомбардировки поверхности металла ускоренным потоком электронов (электронно-лучевой нагрев) или квантами электромагнитного излучения (лазерный нагрев);
- высокочастотным электрическим магнитным полем (индукционный нагрев);
- электрической дугой.

Выбор способа нагрева и конструкция установки зависят от природы испаряемого материала, его исходной формы (гранулы, порошок, проволока), требуемой скорости испарения, постоянства во времени и т.д.

Наибольшее распространение получил нагрев при помощи электронной бомбардировки, что позволяет достигать температуры 4000°С и плотности энергии в луче до  $5 \times 10^8$  Вт/см<sup>2</sup>.

Электронно-лучевой способ нагрева состоит в том, что на образец металла направляют поток электронов от катода, ускоренных электрическим полем до энергии 5-25 кэВ. Поток электронов (электронный луч) получают с помощью электронно-лучевых пушек.

Средняя энергия частиц в потоке, образованном испарением, невысока, поэтому необходимо увеличить энергию частиц, прибывающих на подложку. Простым способом ускорения заряженных частиц является электрическое поле, но так как для создания потоков в основном используются нейтральные частицы, их активацию можно осуществлять действием на атомы потоком электронов, ионов, атомов или фотонов.

В результате образования активированного корпускулярного потока в контакт с подложкой металла детали, входят нейтральные частицы (возбужденные и невозбужденные) с высокой энергией и ионы. Процесс взаимодействия такого сложного по составу потока с поверхностью металла сводится к протеканию взаимосвязанных физических явлений: конденсация, внедрение и распыление.

## 4.2. Ионное распыление

Ионные распылители разделяют на две группы:

- плазмоионные распылители, в которых мишень находится в газоразрядной плазме, создаваемой с помощью тлеющего, дугового и высокочастотного разряда. Распыление происходит в результате бомбардировки мишени ионами, извлекаемыми из плазмы;
- автономные источники без фокусировки и с фокусировкой ионных пучков, бомбардирующих мишень.

В наиболее простом случае система распыления состоит из двух электродов, помещенных в вакуумную камеру (рис. 4.1)

Распыляемую мишень из наносимого материала располагают на катоде. На другом электроде, на расстоянии в несколько сантиметров от катода, устанавливают детали (подложки).

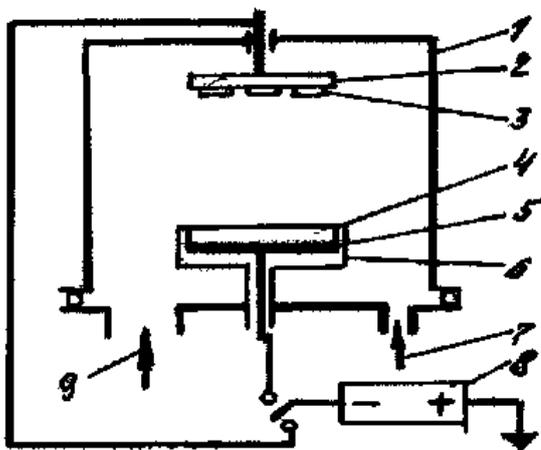


Рис. 4.1. Принципиальная система распыления:

- 1- камера; 2- подложкодержатель; 3- детали (подложки);  
4- мишень; 5- катод; 6- экран; 7- подвод рабочего газа;  
8- источник питания; 9- откачка

Камеру вакуумируют, а затем наполняют рабочим газом (чаще всего аргоном) до давления 1,33Па. На электрод с подложки подают отрицательный потенциал, зажигают газоразрядную плазму и бомбардировкой ионами производят очистку их от поверхностных загрязнений. Далее отрицательный

потенциал прикладывают к мишени и распыляют ее. Распыляемые частицы движутся через плазму разряда, осаждаются на деталях и образуют покрытие. Большая часть энергии ионов, бомбардирующих мишень (до 25%), переходит в тепло, которое отводится водой, охлаждающей катод.

*Достоинства:* возможность получения покрытий из тугоплавких металлов, сплавов и химических соединений.

### 4.3. Магнетронное распыление

Нанесение покрытий в вакууме с помощью магнетронных систем заключается в распылении твердой мишени напыляемого материала ионами инертного газа, образующимися в плазме аномального тлеющего разряда при наложении на него магнитного поля, силовые линии которого ортогонально пересекают силовые линии магнитного поля.

Основными элементами магнетрона является катод – мишень, анод и магнитная система (рис.4.2). Силовые линии магнитного поля замыкаются между полюсами магнитной системы. Поверхность мишени, расположенная между системами входа и выхода силовых линий магнитного поля, интенсивно распыляется и имеет вид замкнутой дорожки, геометрия которой определяется формой полюсов магнитной системы. При подаче постоянного напряжения между мишенью (отрицательный потенциал) и анодом (положительный потенциал) возникает неоднородное электрическое поле и возбуждается тлеющий разряд.

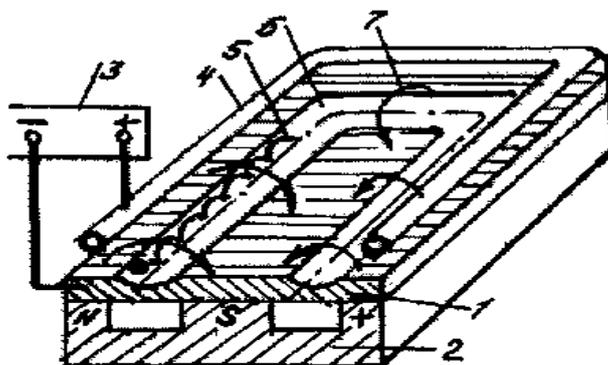


Рис.4.2. Схема магнетронной распылительной системы с плоской мишенью:  
1- катод (мишень); 2- магнитная система; 3- источник питания;  
4- анод; 5- траектория движения электрона; 6- зона распыления;  
7- силовая линия магнитного поля

Наличие замкнутого магнитного поля на распыляемой поверхности мишени позволяет локализовать плазму разряда непосредственно у мишени. Эмитированные с катода под действием ионной бомбардировки электроны

захватываются магнитным полем, и им сообщается сложное циклоидальное движение по замкнутым траекториям у поверхностей мишени.

Электроны оказываются как бы в ловушке, создаваемой с одной стороны магнитным полем, возвращающим их на катод, а с другой стороны - поверхностью мишени, их отталкивающей. Электрон циркулирует в этой ловушке до тех пор, пока не произойдет несколько ионизирующих столкновений с атомами рабочего газа, в результате которых он потеряет полученную от электрического поля энергию. Таким образом, большая часть энергии электрона, прежде чем он попадает на анод, используется на ионизацию и возбуждение, что значительно увеличивает эффективность процесса ионизации и приводит к возрастанию концентрации положительных ионов у поверхности мишени. Это, в свою очередь, приводит к увеличению интенсивности ионной бомбардировки мишени и значительному росту скорости осаждения покрытия.

#### **4.4. Ионное осаждение покрытий**

К покрытиям ионного осаждения относят методы, в которых осаждаемая пленка подвергается интенсивному воздействию ионного компонента корпускулярного потока, обеспечивающего изменения в структуре и свойствах как переходной зоны, так и самого покрытия. Такой результат возможен либо при высокой степени ионизации корпускулярного потока (газообразного или металлического) осаждаемого вещества, либо при высокой энергии ионного компонента корпускулярного потока.

По типу источника генерации металлического компонента потока различают ионно-термические системы распыления и холодные системы. В первых системах перевод переносимого материала из твердого в парообразное состояние осуществляется в результате термического нагрева, во-вторых – распылением с поверхности интегрально – холодной мишени (катода).

Эти методы позволяют получать покрытия с высокими служебными характеристиками кристаллизации пленок и их свойствами. В машиностроении они нашли применение для получения износостойких и коррозионно – стойких покрытий как из чистых металлов, так и из соединений.

*Недостаток:* низкий процент ионизированных частиц в общем потоке испаряемого материала, что влияет на адгезионные свойства характеристики покрытия и условия протекания реакции с реактивным газом.

#### **4.5. Ионно-диффузионное насыщение**

Система ионного насыщения представляет собой вакуумную камеру, в электрическом плане реализующую двухэлектродную схему: катод-электрод с

детальями; второй электрод (анод) – заземленный корпус вакуумной камеры. Для проведения процесса ионами насыщения в вакуумную камеру подается легирующий материал (элемент или химическое соединение) в газообразном (парообразном) состоянии, а к деталям прикладывается отрицательный потенциал 300+1000 В. Поверхность детали бомбардируется положительными ионами легирующего элемента из газоразрядной плазмы, что позволяет значительно сократить длительность процесса насыщения поверхности.

Этот метод наиболее широко применяется при азотировании сталей и металлов.

*Преимущества перед печами обычного газового азотирования:*

- сокращение длительности цикла в 3-5 раз;
- уменьшение деформации деталей в 3-5 раз;
- возможность проведения регулируемых процессов азотирования с получением слоев с заданным составом и структурой;
- возможность уменьшения температуры процесса азотирования до 350-400<sup>0</sup>С, что позволяет избежать разупрочнения материала сердцевины изделий;
- уменьшение хрупкости слоя и повышение его служебных характеристик;
- простота защиты отдельных участков деталей от азотирования;
- устранение опасности взрыва печи;
- снижение удельных расходов электрической энергии в 1,5-2 раза и рабочего газа в 30-50 раз;
- улучшение условий труда термистов.

*Недостатки:*

- невозможность ускорения процесса путем увеличения плотности ионного потока, т.к. в результате перегрева деталей снижается поверхностная твердость;
- интенсификация процесса ионного азотирования;
- наложение магнитного поля с целью увеличения плотности тока и снижения давления газа;
- за счет создания поверхности детали заданной конфигурации происходит предварительное пластическое деформирование, термическая обработка.

#### **4.6. Ионное легирование (имплантация)**

При имплантации тонкий поверхностный слой насыщается элементом, потоком ионов которого поверхность обрабатывается (бомбардируется). Имплантированный элемент может входить в кристаллическую решетку основы в виде твердого тела или образовывать мелкокристаллические

выделения химических соединений с компонентами материала основы. Кроме того, при внедрении иона в кристаллическую решетку инициируется смещение атомов, приводящих к образованию большого количества дефектов кристаллической решетки. Толщина этого слоя, насыщенного дефектами и вследствие этого упрочненного, во много раз превышает глубину проникновения ионов. Толщина модифицированного слоя несколько микрон.

Имплантация существенно снижает износ и трение, увеличивает антикоррозионные свойства металла.

## **5. Магнитное упрочнение деталей машин**

Электромагнитное поле успешно применяют в современной технике и технологии для управления свойствами тела и жидкости. В России и передовых странах мира магнитную обработку используют для улучшения свойств конструкционных материалов, воды, растворов, дисперсных систем, резины, режущего и мерительного инструмента, зубчатых колес, тросов, заклепок, станин, буров и т.п.

Внедрение магнитной обработки позволяет уменьшить остаточные и усталостные напряжения в деталях и конструкциях, повысить износостойкость и долговечность различных деталей.

### **5.1. Методы магнитной обработки**

Применяемые на практике методы магнитной обработки материалов различаются по своим физическим методам и технологии производства.

Методы магнитной обработки:

- одним импульсом постоянного магнитного поля напряженностью  $100 \div 1000 \text{ кА/М}$  при различной длительности воздействия:  $10 \div 300 \text{ с}$  и более;
- импульсным магнитным полем напряженностью  $50 \div 2000 \text{ кА/М}$  при длительности импульса  $0,1 \div 10 \text{ с}$  и с различным количеством импульсов.

Методы обработки постоянным магнитным полем:

- обработка одним импульсом с последующим размагничиванием через  $8 \div 24$  часа;
- обработка направленной (локальной) концентрацией магнитного потока на заготовку;
- обработка без последующего размагничивания;
- динамическая обработка, когда деталь в поле постоянной напряженности вращается с некоторым ускорением частоты вращения ( $1 \div 50 \text{ с}$ ) в течение  $1 \div 5$  секунд;

- обработка при свободном перемещении заготовки в полости индуктора;
- обработка детали при свободном перемещении в непосредственной близости от полости индуктора.

Методы импульсной магнитной обработки:

- обработка без последующего размагничивания;
- многоцикловая обработка ( $2 \div 10$  циклов) с выдерживанием между циклами  $1 \div 20$  минут;
- обработка с применением ферромагнитных сердечников и локальных концентраторов магнитного поля;
- обработка в металлических контейнерах или камерах с применением ферромагнитной жидкости или ферромагнитного порошка;
- комбинированные методы.

Перспективные методы импульсной магнитной обработки:

- обработка с нарастающей амплитудой импульса. Применяют для снятия напряжений в изделиях, работающих при ударных нагрузках. Режим:  $H=100 \div 800$  кА/М, время цикла обработки  $0,1 \div 1,0$  с, число циклов  $2 \div 10$ , время выдерживания между циклами  $1 \div 20$  минут.

- с вращением детали в соленоидах. Применяют для снятия напряжений в местах сварки разнородных материалов. Режим:  $H=100 \div 800$  кА/М, число циклов  $2 \div 10$ , время выдерживания  $1 \div 20$  минут, частота вращения детали в соленоиде  $1000 \div 10000$  мин<sup>-1</sup> в течение 1-5 мин;
- вращающимся магнитным полем. Применяют для повышения долговечности готовых изделий. Режимы:  $H=100 \div 800$  кА/М, время цикла  $0,1 \div 1,0$  с, число циклов  $2 \div 10$ ;

- обработка холодом и импульсной магнитной обработкой. Применяют для упрочнения ответственных деталей, работающих при низких температурах. Режим: обработка в контейнерах при  $-100 \div 200$  °С,  $H=400 \div 2000$  кА/М, время цикла  $0,3 \div 2$  с, число циклов  $1 \div 10$ , время между импульсами  $30 \div 3000$  с. Размагничивание.

- импульсная магнитная обработка в вакууме с применением защитных покрытий. Применяют для упрочнения деталей, работающих в вакууме:  $H=400 \div 2000$  кА/М, время цикла  $0,3 \div 2,0$  с, число циклов  $1 \div 10$ , время между импульсами  $30 \div 3000$  с.

- термическая обработка металлов в магнитном поле.

## 6. Упрочнение деталей наплавкой

Применение наплавки рабочих поверхностей позволяет повысить их долговечность и износостойкость путем нанесения металла соответствующего химического состава и физико-механических свойств.

Сущность процесса наплавки состоит в том, что из источников нагрева присадочный металл расплавляется и переносится на наплавляемую поверхность. При этом расплавляется металл поверхностного слоя основного металла и вместе с расплавленным присадочным металлом образует слой наплавленного металла.

Одним из важных параметров процесса наплавки является глубина проплавления основного металла: чем меньше глубина проплавления, тем меньше основного металла в наплавленном. Химический состав наплавленного металла будет ближе к присадочному. Обычно химический состав присадочного металла и металла наплавки выравнивается во втором – третьем слое.

На глубине проплавления располагается переходная зона от основного металла к наплавленному. Эта зона считается наиболее опасной, с точки зрения разрушения металла. Металл переходной зоны охрупчен из-за большой скорости охлаждения металла шва, имеет повышенную склонность к образованию холодных трещин по причине большой неоднородности химического состава металла и соответственно большой разности коэффициентов линейного расширения. Отсюда следует, что чем больше глубина проплавления, тем больше зона ослабленного участка и тем ниже прочность детали. И наоборот, чем меньше глубина проплавления, тем в меньшей мере теряется прочность детали. Металл наплавки по химическому составу приближается к присадочному, при этом отпадает необходимость в наложении второго слоя.

Исходя из изложенного, выбор оборудования для наплавки, режимов и технологии должен проводиться из условия обеспечения минимальной глубины проплавления основного металла.

При толщине наплавленного слоя больше 5 мм наплавку желательно вести в два слоя для уменьшения глубины проплавления.

Выбор режимов наплавки зависит от толщины наплавленного слоя.

Выбор наплавочных материалов производится исходя из требований, предъявляемых к металлу трущихся поверхностей в зависимости от вида изнашивания. Например, для условий абразивного изнашивания требуется высокая твердость наплавленного металла, которая обеспечивается использованием наплавочных материалов с повышенным содержанием углерода, хрома, марганца, вольфрама.

Для условий коррозионного изнашивания стойкость достигается легированием металла хромом в количестве больше 12% (нержавеющие стали).

Выполнение наплавочных работ осуществляется различными способами, основными из которых являются ручная дуговая наплавка, автоматическая дуговая наплавка под флюсом, наплавка в среде углекислого газа, вибродуговая, плазменная и газовая наплавка.

Ручная дуговая наплавка применяется при индивидуальном способе выполнения ремонтных работ.

Для восстановления деталей типа валов, работающих при нормальных условиях, рекомендуют электроды ОЗН 400, обеспечивающие твердость НВ 375 – 425 без термической обработки.

Наплавка деталей, работающих при коррозионном изнашивании, выполняется электродами ЦН-6М, химический состав наплавленного металла О8×17Н8С6Г или ЦН-5 (24×12).

Для деталей, работающих в условиях абразивного износа, рекомендуются электроды Т-590 (Э-320×25 СЗГР).

Для наплавки могут применяться и сварочные электроды, но механические свойства наплавленного металла низкие.

Автоматическая наплавка под флюсом рекомендуется при большом объеме ремонтных работ.

Сущность процесса наплавки состоит в том, что дуга горит под слоем флюса. Под действием тепла дуги расплавляются электродная проволока, основной металл и часть флюса. Расплавленный металл электрода переносится на основной, образуя слой наплавленного флюса, который надежно защищает жидкий металл от контакта с воздухом.

Наплавка в среде углекислого газа довольно широко применяется для восстановления размеров изношенных деталей.

Сущность процесса состоит в том, что сварочная дуга горит в среде углекислого газа, который предохраняет расплавленный металл от контакта с воздухом.

### **6.1. Вибродуговая наплавка**

Сущность способа вибродуговой наплавки состоит в том, что электродной проволоке при движении в зону дуги придаются дополнительные продольные колебания большой частоты. Такие колебания обеспечивают более высокую стабильность горения дуги и позволяют значительно снизить параметры режима наплавки (силу сварного тока и напряжение) по сравнению с наплавкой в среде углекислого газа. На этом принципе разработаны многие конструкции наплавочных автоматов.

### **6.2. Плазменная наплавка**

Сущность плазменной наплавки состоит в расплавлении присадочного металла струей плазмы и перенесении его на основной металл. Плазма представляет собой направленный поток ионизированных частиц газа, имеющих температуру  $(10-30)10^3$  °С. Получают плазму в специальных устройствах – плазмотронах при пропускании газа через столб электрической дуги.

Для осуществления процесса наплавки электродную проволоку подают в зону плазменной дуги, металл электрода плавится и переносится на деталь.

Для прекращения процесса наплавки плазматрон отрывают от детали, основная дуга гаснет, но продолжает гореть дежурная дуга.

В качестве наплавленного материала могут использоваться не только порошки металлов, но и неметаллов (керамический порошок). Это позволяет нанести керамику на металлы.

### **6.3. Газовая наплавка деталей**

Газовая наплавка применяется сравнительно редко, в основном при индивидуальном способе выполнения ремонтных работ, из-за трудности механизации процесса.

Плавление металла осуществляется газовым пламенем, образующимся при сгорании кислорода в среде ацетилена. Температура пламени в зоне ядра составляет 3100 – 3200°С.

Защита расплавленного металла от окисления осуществляется самим газовым пламенем и флюсами. В качестве флюса используют буру или смесь борной кислоты.

В качестве присадочного металла при газовой наплавке используют прутки того же состава, что и основной металл.

Режим наплавки определяется мощностью газовой горелки, т.е. расходом ацетилена. Мощность зависит от толщины наплаваемого слоя.

Газовая наплавка чаще всего применяется для заплавления дефектов на корпусных деталях.

При наплавке на чугунные изделия в качестве наплавочных материалов используют чугунные прутки примерно того же состава. Процесс выполняется науглероженным пламенем, т.е. с большим расходом ацетилена.

При наплавке металла на алюминиевые изделия присадочным материалом служат алюминиевые прутки.

## **7. Химико-термическая обработка**

### **7.1. Общие закономерности**

Химико-термической обработкой называют обработку, заключающуюся в сочетании термического и химического воздействия с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя детали в необходимом направлении. При этом происходит поверхностное насыщение металлического материала соответствующим элементом (С, N, В, Al, Cr, Si, Ti и др.) путем его диффузии в атомарном состоянии из внешней среды (твердой, газовой, паровой, жидкой) при высокой температуре.

Широкое применение химико-термической обработки в различных областях техники объясняется тем, что большинство деталей машин и механизмов работают в условиях износа, кавитации, циклических нагрузок, коррозии при криогенных или высоких температурах, при которых

максимальные напряжения возникают в поверхностных слоях металла. Химико-термическая обработка металлов и их сплавов как с целью их поверхностного упрочнения, так и для защиты от коррозии повышает надежность и долговечность деталей машин.

Химико-термическая обработка включает следующие основные взаимосвязанные стадии:

- 1) образование активных атомов в насыщающей среде и диффузию их к поверхности обрабатываемого металла;
- 2) адсорбцию образовавшихся активных атомов поверхностью насыщения;
- 3) диффузию – перемещение адсорбционных атомов внутри металла.

Развитие процесса диффузии приводит к образованию диффузионного слоя, под которым понимают слой материала детали у поверхности насыщения, отличающегося от исходного материала по химическому составу, структуре и свойствам (рис.7.1). Материал детали под диффузионным слоем, не затронутый воздействием насыщающей активной среды, называется сердцевиной.

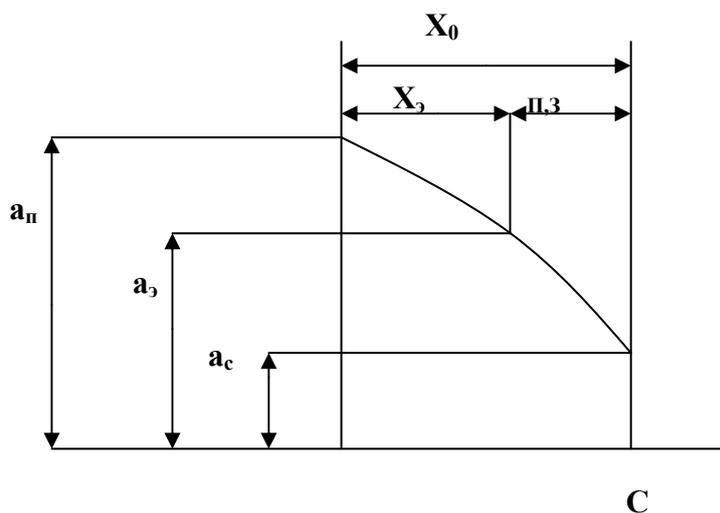


Рис. 7.1. Схема диффузионного слоя: П.З – переходная зона; С – сердцевина;  $x_0$  – общая толщина диффузионного слоя;  $x_э$  – эффективная толщина диффузионного слоя;  $a_n$  – значение базового параметра у поверхности;  $a_э$  – предельное значение базового параметра, установленное для эффективной толщины;  $a_c$  – значение базового параметра для сердцевины

Кратчайшее расстояние от поверхности насыщения до сердцевины составляет общую толщину диффузионного слоя. При контроле химико-термической обработки пользуются эффективной толщиной диффузионного слоя, под которой понимают кратчайшее расстояние от поверхности насыщения до мерного участка, характеризуемого установленным предельным номинальным значением базового параметра. Под базовым параметром

диффузионного слоя понимают параметр материала, служащий в данном испытании критерием изменения качества в зависимости от расстояния от поверхности насыщения. В качестве базового параметра принимают или концентрацию диффундирующего элемента, или свойства, или структурный признак.

Прилегающую к сердцевине внутреннюю часть диффузионного слоя, протяженность которой определяется разностью общей и эффективной толщин, называют переходной зоной диффузионного слоя (рис.7.1).

Важный этап химико-термической обработки – диффузия. В металлах при образовании твердых растворов замещение в основном происходит по вакансионному механизму. При образовании твердых растворов внедрения реализуется механизм диффузии по междоузлиям.

## 7.2. Диффузионное насыщение сплавов углеродом и азотом

Диффузионное насыщение стали углеродом, азотом и совместно этими элементами – широко распространенные в промышленности процессы химико-термической обработки.

*Цементацией* (науглероживанием) называется химико-термическая обработка, которая заключается в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали углеродом при нагревании в соответствующей среде – карбюризаторе. Цементацию проводят при температурах выше точки  $A_{c3}$  (930 – 950°C), когда устойчив аустенит, растворяющий углерод в больших количествах.

Для цементации используют низкоуглеродистые (0,1 – 0,18% С), чаще легированные стали (15Х, 18ХГТ, 20ХНМ, и др.). Детали поступают на цементацию после механической обработки с припуском на шлифование (50 – 100 мкм). Во многих случаях цементации подвергают только часть детали: тогда участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем малопористой меди (0,02 – 0,05 мм), которую наносят электролитическим способом, или изолируют специальными обмазками.

Цементованный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, убывающую от поверхности к сердцевине детали (рис.7.2). В связи с этим в структуре цементованного слоя можно различить (от поверхности к сердцевине) три зоны: заэвтектоидную, состоящую из перлита и вторичного цементита, образующего сетку по бывшему зерну аустенита; эвтектоидную, состоящую из пластинчатого перлита; доэвтектоидную – из перлита и феррита. Количество феррита в этой зоне непрерывно растет.

При высокой концентрации углерода (более 1,2 – 1,3%) на поверхности слоя образуется грубая сетка или цементит выделяется в виде игл, что отрицательно сказывается на прочности диффузионного слоя. Основные виды цементации – твердая и газовая. Газовая цементация является более

совершенным технологическим процессом, чем твердая. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое, сокращается длительность процесса, обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процесса, значительно упрощается последующая термическая обработка деталей, так как закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи. Основные виды цементации – твердая и газовая. Газовая цементация является более совершенным технологическим процессом, чем твердая. Она имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое, сокращается длительность процесса, обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процесса, значительно упрощается последующая термическая обработка деталей, так как закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи.

Она имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В случае газовой цементации можно получить заданную концентрацию углерода в слое, сокращается длительность процесса, обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процесса, значительно упрощается последующая термическая обработка деталей, так как закалку можно проводить непосредственно из цементационной печи (процесс ведут при 910 – 930°С 6 – 12 ч).

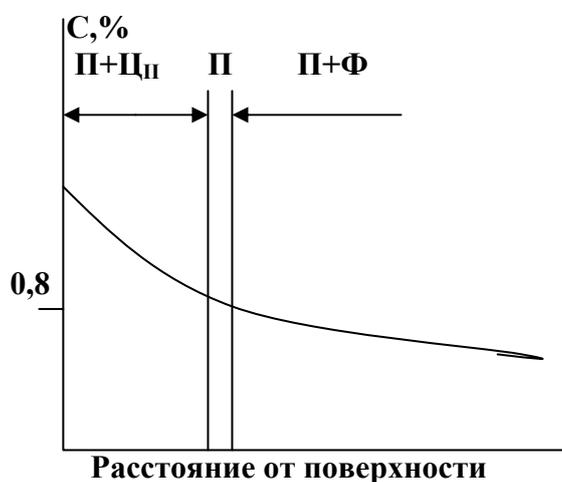


Рис.7.2. Изменение концентрации углерода по глубине цементованного слоя



Окончательные свойства цементованные изделия приобретают в результате термической обработки после цементации. Эта обработка необходима для того, чтобы исправить структуру и измельчить зерно сердцевин и цементованного слоя, неизбежно увеличивающееся во время длительной выдержки при высокой температуре цементации, получить высокую твердость в цементованном слое и хорошие механические свойства сердцевин.

В большинстве случаев, особенно при обработке наследственно мелкозернистых сталей, применяют закалку выше точки  $A_{c1}$  (сердцевин) при  $820 - 850^{\circ}\text{C}$ . Это обеспечивает измельчение зерна, полную закалку цементованного слоя, частичную перекристаллизацию и измельчение зерна сердцевин.

При газовой цементации часто применяют закалку без повторного нагрева, а непосредственно из цементационной печи после подстуживания изделий до  $840 - 860^{\circ}\text{C}$ . Такая обработка не исправляет структуру цементованного слоя и сердцевин, поэтому ее применяют только для изделий, изготовленных из наследственно мелкозернистых сталей.

После цементации термическая обработка иногда состоит из двойной закалки и отпуска. Первую закалку (или нормализацию) с нагревом до  $880 - 900^{\circ}\text{C}$  (выше точки  $A_{c3}$  сердцевин) назначают для исправления структуры сердцевин. Вторую закалку проводят с нагревом до  $760 - 780^{\circ}\text{C}$  для устранения перегрева цементованного слоя и придания ему высокой твердости. Недостаток такой термообработки – сложность технологического процесса, возможность окисления и обезуглероживания.

Заключительной операцией термической обработки цементованных изделий является низкий отпуск при  $160 - 180^{\circ}\text{C}$ , переводящий мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит, снимающий напряжения и улучшающий механические свойства.

В результате термической обработки цементованный слой должен иметь структуру мелкоиглочатого мартенсита и изолированных участков остаточного количества избыточных карбидов в виде глобулей.

Твердость на поверхности цементованного слоя находится в пределах  $\text{HRC} \sim 58 - 62$  и в сердцевине  $\text{HRC} \sim 30 - 45$ . При цементации чаще контролируют не общую, а эффективную толщину слоя. Эффективная толщина соответствует зоне слоя от поверхности насыщения до границы зоны с твердостью  $\text{HRC} \sim 50$  или  $\text{HV} \sim 550$ . Толщина эффективного слоя составляет  $0,4 - 1,8$  мм.

*Азотированием* называется химико-термическая обработка, заключающаяся в диффузионном насыщении поверхностного слоя стали азотом при нагревании в соответствующей среде. Азотированию подвергают гильзы цилиндров двигателей внутреннего сгорания, детали арматуры турбин и целый ряд других деталей, работающих на износ при повышенных температурах в агрессивных средах. Твердость азотированного слоя стали выше, чем цементованного, и сохраняется при нагреве до высоких температур

(450 – 500°C), тогда как твердость цементованного слоя, имеющего мартенситную структуру, сохраняется только до 200 – 225°C.

Азотирование чаще проводят при 500-600°C (низкотемпературное азотирование). Стали ферритного и аустенитного классов и тугоплавкие металлы (Ti, Mo и др.) подвергают высокотемпературному азотированию (600 – 1200°C). Наиболее распространено газовое азотирование. Его обычно проводят в герметических камерах (ретортах), куда поступает с определенной скоростью аммиак, диссоциирующий по реакции



Для снижения хрупкости и экономии аммиака рекомендуется азотирование в аммиаке, разбавленном азотом. Выделяющийся атомарный азот адсорбируется поверхностью металла и диффундирует в его кристаллическую решетку, образуя различные азотистые фазы. В сплавах железа с азотом образуются следующие фазы:  $\alpha$ -фаза – твердый раствор азота в  $\alpha$ -железе;  $\gamma$ -фаза – азотистый аустенит, который образуется при температуре выше эвтектоидной (591°C);  $\gamma'$ -фаза – твердый раствор на основе нитрида железа  $\text{Fe}_4\text{N}$  (5,7 – 6,1% N);  $\varepsilon$ -фаза – твердый раствор на основе нитрида  $\text{Fe}_{2-3}\text{N}$  (8,0– 11,% N).

Следовательно, в случае азотирования при температуре ниже эвтектоидной диффузионный слой состоит из трех слоев:  $\varepsilon + \gamma' + \alpha$ . Носителем твердости является нижний  $\alpha$ -слой (вследствие выделения дисперсных нитридов);  $\gamma'$ -слой очень тонок, часто даже не обнаруживается, а  $\varepsilon$  – слой непрочный и хрупкий.

В случае азотирования при температуре выше эвтектоидной, например 650°C, слой при этой температуре состоит из следующих фаз:  $\varepsilon + \gamma' + \gamma + \alpha$ . При медленном охлаждении азотированный  $\gamma$ -аустенит распадается на эвтектоид:  $\gamma \rightarrow \alpha + \gamma'$ , а при быстром охлаждении претерпевает мартенситное превращение. В этом случае максимальной твердости отвечает мартенситный подслой.

При азотировании легированных сталей образуются легированные  $\varepsilon$ - и  $\gamma'$ -фазы. Легирующие элементы W, Mo, Cr, Ni, V, будучи растворены в феррите, повышают растворимость азота в  $\alpha$ -фазе и образуют специальные нитриды MN,  $\text{M}_2\text{N}$  (VN, NiN,  $\text{Cr}_2\text{N}$  и др.). Выделяясь в мелкодисперсном состоянии, эти нитриды способствуют повышению твердости азотированного слоя.

В последние годы получило применение азотирование с добавками углеродсодержащих газов, которое проводят при 570°C в течение 1,5 – 3,0 ч в атмосфере, содержащей 50 об.% эндогаза и 50 об. % аммиака. В результате такой обработки образуется карбонитридная  $(\text{Fe}, \text{M})_{2-3}(\text{N}, \text{C})$  зона толщиной 7-25 мкм, обладающая меньшей хрупкостью и более высокой износостойкостью, чем чисто азотистая  $\varepsilon$ -фаза  $(\text{Fe}, \text{M})_{2-3}\text{N}$ . Твердость карбонитридного слоя на легированных сталях HV 600 – 1100. Общая толщина слоя - 0,15 – 0,5 мм.

### **7.3. Ионное азотирование и цементация**

Для активизации процессов в газовой среде и насыщаемой поверхности применяют ионное азотирование. При этом достигается существенное сокращение общего времени процесса (в 2 – 3 раза) и повышение качества азотированного слоя. Ионное азотирование осуществляют в стальном контейнере, который является анодом. Катодом служат азотируемые детали. Через контейнер при низком давлении пропускается азотсодержащая газовая среда. Вначале азотируемая поверхность очищается катодным распылением в разреженном азотсодержащем газе или водороде. При напряжении около 1000В и давлении 13,33 – 26,33 Па ионы газа бомбардируют и очищают поверхность катода (детали). Поверхность при этом нагревается до температуры не более 200°С. Затем устанавливается рабочий режим : напряжение 300 – 800 В, давление 133,3 – 1333 Па, удельная мощность 0,7 – 1 Вт/см<sup>2</sup>. Поверхность детали нагревается до требуемой температуры (450 – 500°С) в результате бомбардировки положительными ионами газа. Ионы азота поглощаются поверхностью катода (детали), а затем диффундируют вглубь. Параллельно с этим протекает процесс катодного распыления поверхности, что позволяет проводить азотирование трудноазотируемых сплавов, самопроизвольно покрывающихся защитной оксидной пленкой, которая препятствует проникновению азота при обычном азотировании.

Наряду с ионным азотированием применяют ионную цементацию. При цементации и ионном азотировании наблюдается ускорение диффузионных процессов, особенно в начальной стадии, и сокращается общая длительность насыщения по сравнению с традиционными способами цементации и азотирования.

### **7.4. Одновременное насыщение поверхности стали азотом и углеродом**

Многочисленные исследования показали, что в ряде случаев совместное диффузионное насыщение стали азотом и углеродом имеет определенные преимущества. Так, азот способствует диффузии углерода, поэтому можно понизить температуру диффузионного насыщения до 850°С. Такой процесс называется нитроцементацией, так как исходной средой является смесь цементирующего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4 – 10 ч. Основное назначение нитроцементации – повышение твердости и износостойкости стальных изделий.

По сравнению с цементацией нитроцементация имеет ряд существенных преимуществ. При легировании аустенита азотом снижается температура  $\alpha \leftrightarrow \gamma$ -превращения, что позволяет вести процесс насыщения при более низких температурах. Одновременно в присутствии азота резко возрастает диффузионная подвижность углерода в аустените. Скорость роста

нитроцементованного и цементованного слоев практически одинакова, хотя температура нитроцементации почти на 100°С ниже. Понижение температуры насыщения без увеличения длительности процесса позволяет снизить деформации обрабатываемых деталей, уменьшить нагрев печного оборудования. Для газовой цементации и нитроцементации применяют практически одинаковое оборудование.

Для нитроцементации легированных сталей используют контролируемую эндотермическую атмосферу, к которой добавляют 1,5 – 5,5 об. % природного газа и 1,0 - 3,5 об. % аммиака. После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже – после повторного нагрева. После заковки проводят отпуск при 160 – 180°С.

При оптимальных условиях насыщения структура нитроцементованного слоя состоит из мелкоигльчатого мартенсита, небольшого количества мелких равномерно распределенных карбонитридов и 25 – 30 % остаточного аустенита.

Твердость слоя после заковки и низкого отступа – HRC~58 -60, HV~570 – 690. Толщина нитроцементованного слоя составляет 0,2 – 0,8 мм. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной формы, например зубчатые колеса.

Одновременное насыщение стали углеродом и азотом происходит также при цианировании в расплавленных солях, содержащих цианид натрия при 820 – 860° С. Однако токсичность расплава солей является серьезным недостатком, препятствующим внедрению этого процесса.

Решением проблемы можно считать процесс карбонитрации, разработанный в МВТУ им. Н. Э. Баумана, (авторы Д. А. Прокошкин, А. В. Супов и др.). Для получения активного расплава используется цианат калия. При температуре нагрева и плавлении в атмосферных условиях происходит окисление циановокислого калия по реакции



При температуре ниже 600°С оксид углерода распадается по реакции



Для интенсификации процесса карбонитрации применяется продувка воздухом. Продолжительность выдержки при температуре нагрева в расплаве составляет от нескольких минут до нескольких часов. В результате карбонитрации (температура расплава 530 – 570°С, время выдержки 5 – 30 мин) долговечность инструмента из быстрорежущей стали повышается в 1,5 – 4 раза.

## 7.5. Диффузионное насыщение сплавов металлами и неметаллами

*Борирование* – насыщение поверхности металлов и сплавов бором с целью повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости. Борированию подвергают стали перлитного, ферритного и аустенитного классов, тугоплавкие металлы и никелевые сплавы. При борировании железа упрочненный слой состоит из ромбического борида FeB и тетрагонального борида Fe<sub>2</sub>B, образующих столбчатые кристаллы. Под слоем боридов располагается переходный слой из твердого раствора бора в α-железе. При нагреве бориды устойчивы: FeB – до 800°C, Fe<sub>2</sub>B – до 1000°C. Установлено, что углерод сталей полностью вытесняется из зоны боридов вглубь и, в зависимости от легирующих элементов в стали, образует переходную зону. Хром и марганец при борировании диффундируют в зону боридов, образуя (Fe, Mn, Cr)B и (Fe, Mn, Cr)<sub>2</sub>B, которые по строению аналогичны боридам FeB и Fe<sub>2</sub>B. Кремний при борировании диффундирует из зоны боридов вглубь, обогащая зону α-фазы, а при большом количестве кремния в переходной зоне могут образоваться графит и феррит. В этом случае будет наблюдаться скалывание боридного слоя. Вообще боридный слой хрупкий. Наибольшей хрупкостью обладает борид FeB (микротвердость 2000 Н<sub>50</sub>) по сравнению с Fe<sub>2</sub>B (микротвердость 1450 Н<sub>50</sub>). При борировании инструментальных сталей Р18, Р9, ХВГ микротвердость достигает 2450 – 3435 Н<sub>50</sub>. Высокая микротвердость боридного слоя сохраняется до 700°C, что позволяет применять борирование для повышения износостойкости деталей, работающих при высоких температурах.

Борирование стали обладает высокой коррозионной стойкостью в водных растворах соляной, серной и фосфорной кислот, причем при одинаковой толщине слоя однофазные боридные слои имеют большую кислотность, чем двухфазные. В азотной кислоте боридные слои неустойчивы, однако скорость разрушения борированных сталей в 1,5 – 5 раз ниже, чем неборированных. Борированные слои на углеродистых сталях устойчивы к воздействию кипящих водных растворов NaOH и KOH, а также расплавов цинка, свинца, олова, кадмия.

*Силицирование.* В результате диффузионного насыщения поверхности кремнием (силицирования) повышается коррозионная стойкость, жаростойкость, твердость и износостойкость металлов и сплавов. При силицировании железа и стали на поверхности образуется α-фаза (твердый раствор кремния в α-железе). Иногда диффузионный слой состоит из двух фазовых слоев: на поверхности образуется слой упрочненной α'-фазы (Fe<sub>3</sub>Si), а далее следует α-фаза. Качество силицированного слоя значительно снижается из-за возникновения пористости. Беспористые слои кремнистого феррита на стали 20 при 1100 – 1200°C в течение 3 – 5 ч были получены в смеси моносилана SiH<sub>4</sub> (6 – 10 л/ч) с диссоциированным аммиаком, либо аргоном, либо азотом (15 – 20 л/ч). Наибольший интерес представляет силицирование

легированных сталей, так как Cr, Al и Ti, попадая в силицированный слой, повышают его окалиностойкость.

*Хромирование* – насыщение поверхности изделий хромом. Диффузионному хромированию подвергают чугуны, стали различных классов, сплавы на основе никеля, молибдена, вольфрама, ниобия, кобальта и металлокерамические материалы. Хромирование производят в вакуумных камерах ( $10 - 10^{-1}$  Па) при  $1420^{\circ}\text{C}$ . За 18-24 ч получают хромированный слой толщиной 2,0 – 2,5 мм с концентрацией на поверхности до 70 % хрома.

Этот процесс обеспечивает повышенную устойчивость стали против газовой коррозии (окалиностойкость) до  $800^{\circ}\text{C}$ . Хромирование сталей, содержащих свыше 0,3 – 0,4% С, повышает твердость и износостойкость. Твердость слоя, полученного при хромировании железа, достигает HV 250 – 300, а при хромировании стали HV 1200 – 1300. Хромирование используют для упрочнения деталей паросилового оборудования, пароводяной арматуры, клапанов, различных деталей, работающих на износ в агрессивных средах.

*Алитирование* – процесс диффузионного насыщения поверхности изделий алюминием с целью повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости. При алитировании железа и сталей наблюдается плавное падение концентрации алюминия по толщине слоя. В зависимости от метода и режима насыщения она может достигать до 58% (по массе) на поверхности и соответствовать образованию фазового слоя  $\text{FeAl}_3$ . В результате алитирования сталь приобретает высокую окалинность (до  $850 - 900^{\circ}\text{C}$ ), так как в процессе нагрева поверхности алитированных изделий образуется плотная пленка оксида алюминия ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), предохраняющая металл от окисления. Алитированный слой обладает также хорошим сопротивлением коррозии в атмосфере и морской воде. Толщина алитированного слоя достигает 0,2 – 1,0 мм, твердость (на поверхности) – до HV 500, износостойкость низкая. Алитированию подвергают различные изделия, работающие при высоких температурах.

## **7.6. Поверхностная закалка стали**

Назначение поверхностной закалки стали – повышение твердости, износостойкости и предела выносливости обрабатываемых изделий. При этом сердцевина остается вязкой, и изделие воспринимает ударные нагрузки.

Наибольшее распространение получил метод поверхностной закалки при нагреве токами высокой частоты (ТВЧ). При нагреве ТВЧ используется явление индукции и поверхностного распределения индуцированного тока в детали. Деталь устанавливается в индуктор (соленоид), представляющий один или несколько витков пустотелой водоохлаждаемой медной трубки. При пропускании через индуктор переменного тока высокой частоты создается магнитное поле, вызывающее появление в обрабатываемом изделии индуцированного тока той же частоты, но обратного направления. Индуцированный ток вызывает разогрев изделия. Особенностью индуктивного

тока является его неодинаковая плотность по сечению изделия. В основном ток концентрируется в поверхностном слое изделия. Толщина ( $m$ ) закаленного слоя может быть подсчитана по формуле:

$$Y = 4,46 \cdot 10^5 \sqrt{(\rho / \mu f)^{1/2}},$$

где  $\rho$ - электросопротивление, Ом·м,  
 $\mu$  – магнитная проницаемость, Гн/м,  
 $f$  – частота, Гц.

Чем меньше  $f$  (частота тока), тем больше глубина нагреваемого слоя. Если применять ток малой частоты (промышленный), то индуцированный ток будет течь по всему сечению детали и вызывать сквозной нагрев. Индуцированный нагрев обеспечивает высокие скорости нагрева. Скорость нагрева ТВЧ в зависимости от  $f$ ,  $\rho$ ,  $\mu$  составляет 50 – 500°С/с, а при обычном печном нагреве она не превышает 1 – 3°С/с. Нагрев до температуры закалки осуществляется за 2 – 10 с. Глубина слоя 2 – 5 мм. Большие скорости нагрева приводят к тому, что превращение перлита в аустенит смещается в область более высоких температур, поэтому температура закалки при индукционном нагреве выше, чем при нагреве в печах, где скорость нагрева не превышает 1,5 – 3°С/с. Чем больше скорость нагрева в районе фазовых превращений, тем выше температура аустенизации и получения при охлаждении нормальной структуры (мелкокристаллического мартенсита) и максимальной твердости. Так, например, при печном нагреве стали 40 температура закалки 840 – 860°С, при индукционном нагреве со скоростью 250°С/с – 880 – 920°С, а со скоростью 500°С – 980 – 1020°С.

Охлаждающую жидкость (вода, водные растворы полимеров) для закалки обычно подают через спрейер (душевое устройство). Различают следующие способы закалки с индукционным нагревом:

- 1) одновременный нагрев и охлаждение всей поверхности; этот метод применяется для изделий, имеющих небольшую упрочняющую поверхность (инструменты, валки, пальцы);
- 2) непрерывно-последовательный нагрев и охлаждение; этот метод применяют для закалки длинных валов, осей и т.д.;
- 3) последовательный нагрев и охлаждение отдельных участков; данный метод используют при закалке шеек коленчатых валов (последовательный нагрев и закалка одной шейки за другой), кулачков распределительных валов и т.д.

После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160 – 200°С, нередко и самоотпуску. В этом случае при закалке охлаждение проводят не до конца, и в детали сохраняется некоторое количество теплоты, нагревающей закаленный слой до температур отпуска.

Для поверхностной индукционной закалки применяют стали, содержащие 0,4 – 0,5% С (40, 45, 40X, 45X, 40XH и др.), которые после закалки

имеют высокую твердость (HRC 50 – 60), сопротивляемость износу и не склонны к хрупкому разрушению.

Структура на поверхности – мартенсит отпуска, а в сердцевине, если сталь предварительно термически не обработана, сохраняется ферритно-перлитная структура. Для повышения механических характеристик стали перед закалкой ТВЧ проводят улучшение на зернистый сорбит или нормализацию.

После закалки с индукционным нагревом действительное зерно аустенита значительно меньше (10 – 12 баллов), чем при обычной закалке с печным нагревом (7 – 8 баллов). Мелкое зерно получается вследствие большой скорости нагрева и отсутствия выдержки при нагреве. При этом образуется мелкоигльчатый мартенсит с твердостью на 3 – 6 ед. HRC выше, чем при печном нагреве.

При поверхностной закалке значительно повышается предел выносливости стали. Так, для стали 40 после нормализации он составляет 150 МПа, а после закалки с индукционным нагревом – 420 МПа. Повышение предела выносливости объясняется образованием в закаленном слое остаточных напряжений сжатия. Это особенно важно для различных осей и валов, работающих на изгиб и кручение, у которых максимальные напряжения растяжения возникают в поверхностных слоях.

## **7.7. Лазерная термическая обработка**

Лазерная технология обеспечивает повышение производительности труда, точности и качества обработки, представляет практически безотходную технологию, удовлетворяющую требованиям по защите окружающей среды.

Лазеры – оптические квантовые генераторы (ОКГ), позволяющие получать электромагнитные излучения чрезвычайно высокой концентрации энергии. Длина волн, генерируемых ОКГ, находится в световом диапазоне от ультрафиолетовой области спектра до инфракрасной ( $\lambda = 0,1 – 70$  мкм).

Применение лазеров для термической обработки основано на трансформации световой энергии в тепловую. Высокая концентрация энергии в световом потоке ОКГ позволяет нагреть поверхность до температурного диапазона термообработки за очень короткое время.

Лазерная термическая обработка (ЛТО) проводится при удельной мощности  $10^3 - 5 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> и времени воздействия на поверхность  $10^{-1}$  с.

Процессы лазерной термической обработки определяются взаимодействием лазерного облучения с материалом, которое зависит от оптических и теплофизических свойств обрабатываемых материалов: коэффициента отражения поверхности, теплопроводности, температур плавления и испарения и т.д.

Снижение отражающей способности поверхности и, следовательно, повышение эффективности ЛТО обеспечиваются увеличением шероховатости поверхности, нанесением светопоглощающих покрытий. Увеличение

поглощения излучения достигается шлифовкой поверхности, нанесением неметаллических пленок (сульфидных ( $\text{Fe}_2\text{S}_3$ ), оксидных, фосфатных  $\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_2$ ,  $\text{Zn}_3(\text{PO}_4)_2$ ).

Для лазерной обработки используют технологические лазеры импульсного и непрерывного действия. Особенностью лазерного упрочнения является его локальность. При импульсном излучении воздействие осуществляется в точке, при непрерывном – в полосе шириной до 3 мм. В связи с этим для обработки поверхности необходимо и достаточно сканировать луч с взаимным перекрытием или без перекрытия зон упрочнения. Основными геометрическими характеристиками упрочнения являются:  $D_{\text{п}}$  – диаметр зоны лазерного воздействия,  $L$  – длина упрочненного участка,  $S$  – шаг обработки (шаг следования импульсов),  $\delta$  – глубина упрочненного слоя,  $K_{\text{п}}$  – коэффициент перекрытия, представляющий отношение шага расположения последовательных зон лазерного воздействия к диаметру единичной зоны при фокусировании с помощью сферической оптики:

$$K_{\text{п}} = S / D_{\text{п}}.$$

Геометрические характеристики зоны термического воздействия зависят от энергетических параметров лазерного излучения. При обработке импульсными лазерами с повышением плотности мощности увеличиваются диаметр и глубина зоны упрочнения. Лазеры непрерывного излучения обеспечивают более высокую производительность обработки, высокую равномерность упрочнения и позволяют обрабатывать любой профиль поверхности со скоростью от 100 до 10000 мм/мин.

Глубина и ширина зоны термического воздействия при постоянной скорости обработки непрерывными лазерами зависят от плотности мощности излучения, с ростом которой увеличивается глубина зоны термического воздействия, а ширина уменьшается. При постоянной плотности мощности с увеличением скорости перемещения деталей уменьшаются как ширина, так и глубина зоны термического воздействия, так как уменьшается удельная энергия излучения в зоне лазерного воздействия.

Глубина упрочненного слоя на  $\text{CO}_2$ -лазере составляет от 0,3 до 0,1 мм, а на импульсном лазере – 0,1- 0,15 мм.

Механизм лазерной термической обработки представляет собой фазовое превращение материала после скоростного нагрева до температур выше температур фазовой перекристаллизации с последующим быстрым охлаждением обработанной зоны. Скорость охлаждения при температуре нагрева ниже температуры плавления составляет  $(5-10) \cdot 10^3$   $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ , при кристаллизации из жидкого слоя –  $10^6$   $^{\circ}\text{C}/\text{с}$ .

Упрочненная зона может состоять из трех или двух слоев. Между оплавленным слоем и следующей за ним зоной термического влияния существует четкая граница. Зона термического влияния состоит из белого и переходного слоев. Белый слой представляет собой светлую нетравящуюся

полосу, так как имеет высокую концентрацию азота за счет высокотемпературного насыщения азотом воздуха. Вследствие высокой скорости охлаждения эта зона имеет закаленную структуру, строение которой зависит от концентрации углерода. В закаленном слое технически чистого железа происходит измельчение зерна феррита, а в отдельных зернах образуется пакетный мартенсит с развитой блочной структурой, имеющей невысокую твердость. Второй слой зоны термического влияния является переходным к исходной структуре.

Электронно-микроскопическим анализом установлено повышение плотности дислокаций в зоне термического влияния. При плотности мощности  $1,6 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> плотность дислокации достигает  $10^9$  см<sup>-2</sup>, при плотности мощности  $2,7 \cdot 10^4$  Вт/см<sup>2</sup> плотность дислокаций возрастает до  $10^{10}$  см<sup>-2</sup>.

Лазерная термическая обработка позволяет повысить твердость и износостойкость упрочняемых материалов. Твердость зависит от концентрации углерода и легирующих элементов в стали. Методом лазерной термической обработки хорошо упрочняют средне- и высоколегированные углеродистые и инструментальные стали. Стали с низким содержанием углерода и высокопрочные низколегированные стали при лазерной термической обработке упрочняются плохо. Лазерная термическая обработка практически не влияет на предел прочности и предел текучести сталей.

## **7.8. Лазерная химико-термическая обработка**

Насыщение легирующими элементами происходит путем диффузии и массопереноса в твердой фазе, из плазмы и жидкой фазе.

При лазерной химико-термической обработке на поверхность изделия предварительно наносят различными способами легирующие элементы:

- накатка фольги из легирующего материала,
- электролитическое или химическое осаждение,
- напыление,
- электроискровое легирование,
- нанесение порошков или обмазок.

Лазерная химико-термическая обработка осуществляется в режиме расплавления.

Диффузионная металлизация железа возможна при легировании различными металлами. Повышение твердости достигается только при растворении ванадия, ниобия, титана и вольфрама.

Высокая износостойкость и кавитационная стойкость получены при лазерном азотировании из обмазок на стали 38Х2МЮА и 15ХМФ.

При лазерном борировании зона термического воздействия имеет твердость в зависимости от режима обработки HV 1100-2100. При упрочнении достигается высокое сопротивление изнашиванию при различных схемах

приложения нагрузки и различных условиях трения. Легирование бором снижает коэффициент трения материала, повышает его износостойкость.

## 8. Технологические методы повышения износостойкости деталей

Традиционным является подход, устанавливающий связь режима обработки с эксплуатационными свойствами упрочняемой детали. Недостаток такого подхода в том, что выявленные закономерности не являются справедливыми для других условий. Поэтому при переходе к новому изделию возникает необходимость в повторении трудоемких исследований.

Более обобщенным является обеспечение долговечности детали в две стадии:

на первой устанавливается связь технологических факторов с параметрами состояния поверхностного слоя;

на второй - влияние этих параметров на эксплуатационные характеристики деталей.

Однако оба подхода имеют основной недостаток - эмпирический путь решения задачи, а следовательно, связанные с этим:

- 1) большую трудоемкость экспериментов;
- 2) ограниченное число исследований параметров состояния поверхностного слоя;
- 3) невысокую точность (в пределах точности метода измерения) их определения.

Эмпирический путь не позволяет использовать ЭВМ для моделирования и технологического проектирования механической обработки деталей с оптимизацией параметров состояния их поверхностного слоя, обеспечивающих заданную долговечность.

Более эффективный подход к технологическому обеспечению эксплуатационных показателей деталей, который базируется на внутренних закономерностях процесса формирования поверхностного слоя в очаге деформации (пути 1-2 и 2-3). Раскрытие таких закономерностей позволит глубже определить влияние параметров состояния поверхностного слоя на процесс разрушения детали (3-4) и эксплуатационные показатели (4-5).

Повышение сопротивления детали разрушению при различных видах эксплуатационного нагружения может быть достигнуто *технологическими методами* объемного или поверхностного упрочнения. *Объемное упрочнение* повышает статическую прочность деталей, у которых рабочие напряжения распределены по сечению более или менее равномерно. Для таких деталей используют высокопрочные стали и сплавы, композиционные материалы. Однако большинство деталей работает в условиях, при которых эксплуатационная нагрузка (давление, нагрев, действие окружающей среды и т.п.) воспринимается главным образом их поверхностным слоем. Поэтому износостойкость, зарождение и развитие усталостной трещины, возникновение

очагов коррозии зависят от сопротивления поверхностного слоя разрушению. Для деталей, разрушение которых начинается с поверхности, разработано большое количество методов поверхностного упрочнения, основанных на нанесении покрытий или изменении состояния (модификации) поверхности.

При нанесении покрытий упрочнение деталей достигается путем осаждения на ее поверхности материалов, которые по своим свойствам отличаются от основного металла, но наиболее полно отвечают условиям эксплуатации (износ, коррозия, химическое воздействие и т.п.).

При изменении состояния (модификации) поверхностного слоя происходит физико-химическое изнашивание в металле, повышающее его сопротивление разрушению. Модифицирование поверхностного слоя может осуществляться деформационным упрочнением (ППД), поверхностной термообработкой, диффузионным нанесением легирующих элементов.

Не существует универсального метода упрочнения деталей, т.к. один и тот же метод в одних условиях эксплуатации может дать положительный эффект, а в других отрицательный. Поэтому в ряде случаев применяют комбинированное упрочнение деталей, основанное на использовании двух или трех методов упрочнения, каждый из которых позволяет усилить то или иное эксплуатационное качество.

Кроме того, выбор того или иного метода поверхностного упрочнения определяется экономическими соображениями.

## **9. Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин**

Все известные методы упрочнения подразделяются на 6 основных классов.

1. Упрочнение с созданием пленки на поверхности:

а) осаждение химической реакцией (оксидирование, сульфидирование, фосфатирование, нанесение упрочняющего смазочного материала, осаждение из газовой фазы);

б) осаждение из паров (термическое испарение тугоплавких соединений, катодно-ионная бомбардировка, прямое электронно-лучевое испарение, реактивное электронно-лучевое испарение, электронно-химическое испарение);

в) электролитическое осаждение (хромирование, никелирование, электрофорез, никельфосфатирование, борирование, борохромирование, хромофосфатирование);

г) напыление износостойких соединений (плазменное напыление порошковых материалов, детонационное напыление, электродуговое напыление, лазерное напыление, вихревое напыление, индукционное припекание порошковых материалов).

2. Упрочнение с изменением химического состава поверхностного слоя металла:

а) диффузионное насыщение (борирование, цианирование, азотирование, нитроцементация и т.п.)

б) химическое и физико-химическое воздействие (химическая обработка, ионная имплантация, электроискровая обработка и т.д.).

3. Упрочнение с изменением структуры поверхностного слоя:

а) физико-термическая обработка (лазерная закалка, плазменная закалка);

б) электрофизическая обработка (электроконтактная, электроэрозионная, магнитная обработка);

в) механическая обработка (упрочнение вибрацией, фрикционно-упрочняющая обработка, дробеструйная, обработка взрывом, термомеханическая, электромеханическая);

г) наплавка легированным элементом (газовым пламенем, электрической дугой, плазмой, лазерным лучом, пучком ионов и т.д.).

4. Упрочнение с изменением энергетического запаса поверхностного слоя:

а) обработка в магнитном поле (термомагнитная обработка, импульсным магнитным полем, магнитным полем);

б) обработка в электрическом поле.

5. Упрочнение с изменением микрогеометрии поверхности и наклепом:

а) обработка резанием (точение, шлифование, сверхскоростное резание);

б) пластическое деформирование (накатывание, обкатывание, раскатывание, выглаживание, вибронакатывание, вибровыглаживание, калибрование, центробежно-ударное упрочнение, виброударное и т.д.);

в) комбинированные методы (анодно-механическая, поверхностное легирование с выглаживанием, резание с воздействием ультразвуковых колебаний, магнитно-абразивная обработка и т.д.).

6. Упрочнение с изменением структуры всего объема металла:

а) термообработка при положительных температурах (закалка, отпуск, улучшение, закалка ТВЧ, нормализация, термомагнитная обработка);

б) криогенная обработка (закалка с обработкой холодом, термоциклирование).

## **10. Нанотехнологии**

### **10.1. Механизм модифицирования стальных образцов водными растворами на основе силиката натрия**

В Каменском институте (филиале) Южно-Российского государственного университета С.И.Марченко разработан метод химического модифицирования поверхностей трения для повышения износостойкости шестерённых насосов.

Эта задача решалась с помощью нанесения на механические поверхности насоса нанопленок путем их обработки смесью жидких углеводородов, последующим кипячением этих деталей в водном моюще-модифицирующем растворе, содержащем силикат натрия.

Во время кипячения поверхности очищаются от загрязнений, представляющих собой высокомолекулярные фракции составляющих раствора. При этом большая часть этих загрязнений переходит в соединения, представляющие собой твердые низкомолекулярные вещества, конгломераты, легко удаляемые последующей механической обработкой.

На этой стадии на поверхности деталей шестерённого насоса, в результате химического взаимодействия компонентов моюще-модифицирующего раствора со сталью, образуются тончайшие пленочные нанопокрyтия, представляющие собой устойчивые к окислению соединения, обеспечивающие повышение износостойкости при коррозионно-механическом износе пар трения насосов и препятствующие налипанию технологических загрязнений в сообщающихся каналах насоса.

Наличие в моюще-модифицирующем растворе силиката натрия предопределяет образование на поверхностях насоса антифрикционного пленочного покрытия, также повышающего износостойкость пар трения шестерённого насоса. Повышение износостойкости металлических пар трения происходит в связи с эффективностью этого покрытия в процессе приработки, а также из-за повышения микротвердости поверхностей трения в связи с образованием в них силицидов и твердых растворов кремнезема в окислах железа.

Промышленные испытания насосов, восстановленных с помощью этого способа, показали, что срок их эксплуатации составил от 75 до 112 суток против 30-35 суток для новых насосов, поставляемых заводом изготовителем. Разработанный способ модифицирования позволяет обрабатывать насосы, не находившиеся в эксплуатации, тем самым увеличивая срок службы этих изделий.

## Контрольные вопросы

1. В чем сущность кристаллического строения металлов?
2. Какие типы кристаллических решеток вам известны?
3. Как обозначают кристаллографические направления и плоскости?
4. Что такое анизотропия в кристалле?
5. Что такое аллотропия в кристаллах?
6. Какие существуют дефекты кристаллического строения?
7. В чем заключается дислокационный механизм упругопластической деформации?
8. Какие основные элементы дислокационной структуры известны?
9. Как зависит прочность от плотности дислокаций?
10. Что такое наклеп и как он влияет на свойства металлов?
11. Что такое термическая обработка, каковы ее цели и за счет чего они достигаются?
12. Назовите основные элементы режима термической обработки и укажите роль и значение каждого из них.
13. Какие виды внутренних напряжений могут возникать в сплаве при термической обработке и как они влияют на формирование дислокаций?
14. От чего зависит плотность дислокаций, генерируемых при термообработке?
15. Перечислите основные виды термообработки, их назначение, режимы и особенности комплекса механических свойств получающихся продуктов.
16. Назовите основные операции термообработки сплавов с ограниченной растворимостью компонентов.
17. Чем отличается химико-термическая обработка от термической обработки?
18. В каких случаях применяют цементацию, нитроцементацию и азотирование?
19. Сущность метода дорнования.
20. Перечислите основные особенности лазерного упрочнения.
21. В чем состоит сущность вибродуговой наплавки?
22. Назовите способы упрочнения деталей наплавкой?
23. Какие существуют технологические методы повышения износостойкости деталей?
24. Сущность метода ионной имплантации.
25. Достоинства вакуумного ионно-плазменного упрочнения, ионного магнетронного распыления и ионного легирования.
26. Методы магнитной обработки.
27. Какие изменения происходят в дислокационной структуре при импульсной магнитной обработке?
28. Роль нанотехнологий в процессе упрочнения деталей машин?

## **Заключение**

При рыночной экономике одной из важных задач является обеспечение качества деталей машин, повышение их эксплуатационных показателей. Эти показатели определяются параметрами качества поверхностного слоя. Около 70% причин выхода из строя машин и механизмов связано с износом узлов трения. Следовательно, одним из направлений обеспечения качества машин является повышение износостойкости этих деталей, которое может быть достигнуто путем включения периода приработки на стадию изготовления за счет применения соответствующих технологических процессов изготовления. Износ зависит от многих параметров качества поверхностного слоя, поэтому важно знать возможности управления комплексом этих параметров в процессе обработки, включая геометрические, механические, физические и химические структурные свойства.

При производстве деталей машин широко применяются различные методы поверхностного упрочнения. Изложенные в пособии технологии поверхностного упрочнения деталей машин позволяют достигать требуемого качества изделия и формировать у студентов системный подход к решению актуальных задач повышения долговечности деталей и узлов машин.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гаркунов, Д.Н. Триботехника: учебник для втузов/ Д.Н. Гаркунов.-Изд. 2-е, перераб. и доп.-М.: Машиностроение, 1989.-328 с.: ил.-ISBN 5-7855-0361-1.
2. Дриц, М.Е., Москалев, М.А. Технология конструкционных материалов и материаловедение: учебник для вузов/ М.Е. Дриц, М.А.Москалев. – М.: Высш. шк., 1990. – 447 с.: ил.- ISBN 5-06-000144-Х.
3. Материаловедение и технология материалов: учебник для втузов/ Г.П. Фетисов [и др.].- М.: Высш. шк., 2000.- 638 с.: ил. – ISBN 5-06-003616-2.
4. Прикладная механика: учебник для вузов/ В.В. Джамай [и др.]; под общ. ред. В.В. Джамая.- М.: Дрофа, 2004.- 414 с.: ил.-ISBN 5-7107-6232-6.
5. Лахтин, Ю.М. Химико-термическая обработка металлов: учеб. пособие/ Ю.М. Лахтин, Б.Н.Арзамасов.-М.: Металлургия, 1985.- 256 с.: ил.-ISBN 5-333-04260-Х.
6. Пирогов, К.М., Вяткин, Б.А. Основы надежности текстильных машин: учебник для втузов/К.М. Пирогов, Б.А. Вяткин.- М.: Легпромбытиздат, 1985.- 256.: ил.-ISBN 5-02-013810.
7. Марченко, С.И. Повышение долговечности работы шестеренных насосов–дозаторов 11НШ путем создания композиционного модифицирующего покрытия// Изв. вузов. Сев.-Кав. регион. техн. наук, 2005. – Спец. вып.: Композиционные материалы. – С.52-53.

## Содержание

Введение	3
1. Механические методы поверхностного упрочнения деталей машин	4
1.1. Параметры состояния поверхностного слоя деталей машин	4
1.2. Структурные несовершенства в реальных кристаллах	8
1.3. Образование и размножение дислокаций	11
1.4. Основные виды обработки поверхностным пластическим деформированием	13
1.5. Сущность упрочнения пластическим деформированием	21
2. Методы лазерного, электронно-лучевого, плазменного и детонационного упрочнения деталей машин	22
2.1. Лазерное упрочнение	23
2.2. Лазерная наплавка	24
2.3. Лазерное оборудование	24
2.4. Электронно-лучевая обработка	24
2.5. Электронно-пучковое оборудование	25
2.6. Методы детонационного и плазменного нанесения покрытия	25
2.7. Оборудование для детонационного нанесения покрытия	27
2.8. Плазменное поверхностное упрочнение деталей	27
2.9. Оборудование для плазменного упрочнения деталей	28
3. Технологические варианты плазменного упрочнения деталей	31
4. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение, ионное, магнетронное распыление, ионное легирование	32
4.1. Вакуумное ионно-плазменное упрочнение	32
4.2. Ионное распыление	34
4.3. Магнетронное распыление	35
4.4. Ионное осаждение покрытий	36
4.5. Ионно-диффузионное насыщение	36
4.6. Ионное легирование (имплантация)	37
5. Магнитное упрочнение деталей машин	38
5.1. Методы магнитной обработки	38
6. Упрочнение деталей наплавкой	39
6.1. Вибродуговая наплавка	41
6.2. Плазменная наплавка	41
6.3. Газовая наплавка деталей	42
7. Химико-термическая обработка	42
7.1. Общие закономерности	42
7.2. Диффузионное насыщение сплавов углеродом и азотом	44
7.3. Ионное азотирование и цементация	48
7.4. Одновременное насыщение поверхности стали азотом и углеродом	48
7.5. Диффузионное насыщение сплавов металлами и неметаллами	50
7.6. Поверхностная закалка стали	51

7.7. Лазерная термическая обработка	53
7.8. Лазерная химико-термическая обработка	55
8. Технологические методы повышения износостойкости деталей	56
9. Классификация методов отделочно-упрочняющей обработки деталей машин	57
10. Нанотехнологии	58
10.1 Механизм модифицирования стальных образцов водными растворами на основе силиката натрия	58
Контрольные вопросы	60
Заключение	61
Список литературы	62

Учебное издание  
Степанова Татьяна Юрьевна

## **Технологии поверхностного упрочнения деталей машин**

**Учебное пособие**

Редактор О. А. Соловьева

Подписано в печать 29.05.2009. Формат 60×84 1/16 Бумага писчая.  
Усл. печ. л.3,72. Уч. –изд.л.4,13. Тираж 500 экз. Заказ

ГОУ ВПО Ивановский государственный химико-технологический университет

Отпечатано на полиграфическом оборудовании кафедры экономики и  
финансов ГОУ ВПО «ИГХТУ»

153000, г. Иваново, пр. Ф.Энгельса, 7