**Тема: Основные закономерности процесса кристаллизации.**

**СОДЕРЖАНИЕ**

1. **Основные закономерности процесса кристаллизации. Влияние примесей и условий переохлаждения на процесс кристаллизации металлов.**
2. **Процессы, происходящие в металле при упругой и пластической деформации.**
3. **Классификация видов термической обработки. Назначение каждого вида.**
4. **Влияние различных видов термической обработки на свойства конструкционной стали.**
5. **Требования, предъявляемые к подшипниковым сплавам. Сплавы, их структура и свойства.**

**1. Основные закономерности процесса кристаллизации. Влияние примесей и условий переохлаждения на процесс кристаллизации металлов.**

При соответствующем понижении температуры в жидком металле начинают образовываться кристаллики – *центры кристаллизации* или *зародыши*. Для начала их роста необходимо уменьшение свободной энергии металла, в противном случае зародыш растворяется.

Минимальный размер способного к росту зародыша называется *критическим размером*, а зародыш – устойчивым.

Переход из жидкого состояния в кристаллическое требует затраты энергии на образование поверхности раздела жидкость – кристалл. Процесс кристаллизации будет осуществляться, когда выигрыш от перехода в твердое состояние больше потери энергии на образование поверхности раздела. Зависимость энергии системы от размера зародыша твердой фазы представлена на рис. 3.3.

Зародыши с размерами равными и большими критического растут с уменьшением энергии и поэтому способны к существованию.

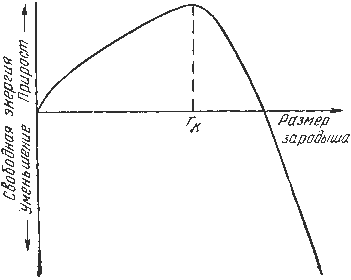


Рис.3.3. Зависимость энергии системы от размера зародыша твердой фазы

Механизм кристаллизации представлен на рис.3.4.

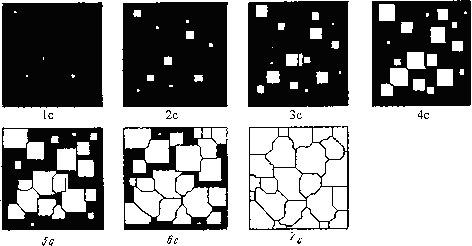


Рис.3.4. Модель процесса кристаллизации

Центры кристаллизации образуются в исходной фазе независимо друг от друга в случайных местах. Сначала кристаллы имеют правильную форму, но по мере столкновения и срастания с другими кристаллами форма нарушается. Рост продолжается в направлениях, где есть свободный доступ питающей среды. После окончания кристаллизации имеем поликристаллическое тело.

Качественная схема процесса кристаллизации может быть представлена количественно кинетической кривой (рис.3.5).

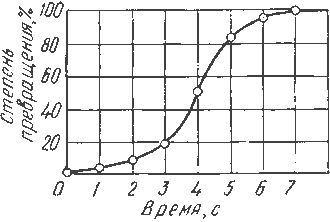


Рис. 3.5. Кинетическая кривая процесса кристаллизации

Процесс вначале ускоряется, пока столкновение кристаллов не начинает препятствовать их росту. Объем жидкой фазы, в которой образуются кристаллы уменьшается. После кристаллизации 50 % объема металла, скорость кристаллизации будет замедляться.

Таким образом, процесс кристаллизации состоит из образования центров кристаллизации и роста кристаллов из этих центров.

В свою очередь, число центров кристаллизации (ч.ц.) и скорость роста кристаллов (с.р.) зависят от степени переохлаждения (рис. 3.6).

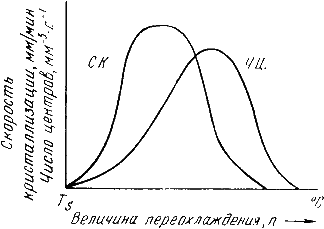


Рис. 3.6. Зависимость числа центров кристаллизации (а) и скорости роста кристаллов (б) от степени переохлаждения

Размеры образовавшихся кристаллов зависят от соотношения числа образовавшихся центров кристаллизации и скорости роста кристаллов при температуре кристаллизации.

При равновесной температуре кристаллизации ТS число образовавшихся центров кристаллизации и скорость их роста равняются нулю, поэтому процесса кристаллизации не происходит.

Если жидкость переохладить до температуры, соответствующей т.*а,* то образуются крупные зерна (число образовавшихся центров небольшое, а скорость роста – большая).

При переохлаждении до температуры соответствующей т.*в –* мелкое зерно (образуется большое число центров кристаллизации, а скорость их роста небольшая).

Если металл очень сильно переохладить, то число центров и скорость роста кристаллов равны нулю, жидкость не кристаллизуется, образуется аморфное тело. Для металлов, обладающих малой склонностью к переохлаждению, экспериментально обнаруживаются только восходящие ветви кривых.

**Влияние переохлаждения на процесс кристаллизации**

Скорость процесса кристаллизации и строение металла после затвердевания зависят от числа зародышей *ч.з.* (центров кристаллизации), возникающих в единицу времени и в единице объема, то есть от скорости образования зародышей [1/см3с] и скорости роста *с.р.* зародышей (увеличения линейных размеров растущего зародыша в единицу времени (мм/с).

Чем больше скорость образования зародышей и чем больше скорость их роста, чем выше эти факторы, тем быстрее протекает процесс кристаллизации.

При ТП - *ч.з.* и *с. р.* равны нулю, и поэтому процесс кристаллизации не происходит.

С увеличением степени переохлаждения *ч.з.* и *с.р.* возрастают, при определенной ?Т достигают максимума, после чего снижаются (рис. 7).

Рисунок 7. Зависимость параметров кристаллизации *ч.з.* и *с.р.* от степени переохлаждения

В условиях когда ?Т1 ?Т2 ?Т3 будет получено:

при ?Т1 - крупное зерно;

?Т2 - чуть мельче;

?Т3 - максимальное измельчение структуры.

С увеличением ?Т скорость образования зародышей, а следовательно, их число возрастают быстрее, чем скорость роста, это объясняется диффузиционными процессами, которые замедляются при низких температурах (больших ? Т).

Чем больше скорость образования зародышей (*ч.з.*) и меньше скорость их роста, тем меньше размер кристалла (зерна), выросшего из зародыша, структура металла будет мелкозернистой.

Величина зерна определяется:

S = 1,1 (*с.р.*/*ч.з.*)3/4

При малой ?Т число зародышей мало, получено будет крупное зерно.

С увеличением ?Т число зародышей возрастет (скорость образования зародышей) и размер зерна металла уменьшается.

Зерно металла (его размер) влияет на пластичность и вязкость. Чем меньше размер зерна, тем выше эти свойства у металлов.

**Влияние примесей на процесс кристаллизации**

Часто источником образования зародышей являются всевозможные твердые частицы (примеси - неметаллические включения, окислы и т.д.). Частицы примеси должны иметь одинаковую кристаллическую решетку с затвердевающим металлом, параметры решетки могут отличаться не более чем на 9%.

Наличие примесей приводят и уменьшают размер Rк, работы его образования, затвердевание жидкости начинается при меньшем ?Т, чем при самопроизвольном зарождении.

Чем больше примесей, тем больше центров кристаллизации, тем мельче получается зерно (гетерогенное образование зародышей).

Примеси делятся:

1) влияющие на число зародышей (взвешенные примеси);

2) изменяющие свободную энергию системы (растворенные примеси в жидком металле - при затвердевании осаждаются в виде тонкого слоя на поверхности растущего кристалла, что приводит к уменьшению поверхностной энергии);

Модифицирование - использование специально вводимых в жидкий металл примесей (модификаторов) для получения мелкого зерна по описанному выше механизму.

Эти примеси не изменяют химического состава сплава, но измельчают зерно, улучшая свойства металла.

Виды примесей:

1) тугоплавкие соединения (влияют на число центров кристаллизации - ТiC, VC, VN, NbC, Al2O3 - нитриды, карбиды, оксиды - кристаллизуются в первую очередь); для стали применяют - Al, V, Ti;

2) поверхность активные модификаторы: для никелевых и железных сплавов - В (бор), для чугуна Мg (магний).

**2. Процессы, происходящие в металле при упругой и пластической деформации.**

Деформация – это изменение формы и размеров тела, деформация может вызываться воздействием внешних сил, а также другими физико-механическими процессами, которые происходят в теле. К деформациям относятся такие явления, как сдвиг, сжатие, растяжение, изгиб и кручение.

Упругая деформация – это деформация, которая исчезает после снятия нагрузки. Упругая деформация не вызывает остаточных изменений в свойствах и структуре металла; под действием приложенной нагрузки происходит незначительное обратимое смещение атомов.

При растяжении монокристалла возрастают расстояния между атомами, а при сжатии атомы сближаются. При смещении атомов из положения равновесия нарушается баланс сил притяжения и электростатического отталкивания. После снятия нагрузки смещенные атомы из-за действия сил притяжения или отталкивания возвращаются в исходное равновесное состояние и кристаллы приобретают первоначальные размеры форму.

Деформация может быть упругой, исчезающей после снятия нагрузки, и пластической, остающейся после снятия нагрузки.

Самое малое напряжение вызывает деформацию, причем начальные деформации являются всегда упругими и их величина находится в прямой зависимости от напряжения. Основными механическими свойствами являются прочность, пластичность, упругость.

Важное значение имеет пластичность, она определяет возможность изготовления изделий различными способами обработки давлением. Эти способы основаны на пластическом деформировании металла.

Материалы, которые имеют повышенную пластичность, менее чувствительны к концентраторам напряжений. Для этого проводят сравнительную оценку различных металлов и сплавов, а также контроль их качества при изготовлении изделий.

Физическая природа деформации металлов

Под действием напряжений происходит изменение формы и размеров тела. Напряжения возникают при действии на тело внешних сил растяжения, сжатия, а также в результате фазовых превращений и некоторых других физико-химических процессов, которые связанны с изменением объема. Металл, который находится в напряженном состоянии, при любом виде напряжения всегда испытывает напряжения нормальные и касательные, деформация под действием напряжений может быть упругой и пластической. Пластическая происходит под действием касательных напряжений.

Упругая – это такая деформация, которая после прекращения действия, вызвавшего напряжение, исчезает полностью. При упругом деформировании происходит изменение расстояний между атомами в кристаллической решетке металла.

С увеличением межатомных расстояний возрастают силы взаимного притяжения атомов. При снятии напряжения под действием этих сил атомы возвращаются в исходное положение. Искажение решетки исчезает, тело полностью восстанавливает свою форму и размеры. Если нормальные напряжения достигают значения сил межатомной связи, то произойдет хрупкое разрушение путем отрыва. Упругую деформацию вызывают небольшие касательные напряжения.

Пластической называется деформация, остающаяся после прекращения действия вызвавших ее напряжений. При пластической деформации в кристаллической решетке металла под действием касательных напряжений происходит необратимое перемещение атомов. При небольших напряжениях атомы смещаются незначительно и после снятия напряжений возвращаются в исходное положение. При увеличении касательного напряжения наблюдается необратимое смещение атомов на параметр решетки, т. е. происходит пластическая деформация.

При возрастании касательных напряжений выше определенной величины деформация становится необратимой. При снятии нагрузки устраняется упругая составляющая деформации. Часть деформации, которую называют пластической, остается.

При пластической деформации необратимо изменяется структура металла и его свойства. Пластическая деформация осуществляется скольжением и двойникованием.

Скольжение в кристаллической решетке протекает по плоскостям и направлениям с плотной упаковкой атомов, где сопротивление сдвигу наименьшее. Это объясняется тем, что расстояние между соседними атомными плоскостями наибольшее, т. е. связь между ними наименьшая. Плоскости скольжения и направления скольжения, лежащие в этих плоскостях, образуют систему скольжения. В металлах могут действовать одна или одновременно несколько систем скольжения.

Металлы с кубической кристаллической решеткой (ГЦК и ОЦК) обладают высокой пластичностью, скольжение в них происходит во многих направлениях.

Процесс скольжения не следует представлять как одновременное передвижение одной части кристалла относительно другой, оно осуществляется в результате перемещения в кристалле дислокаций. Перемещение дислокации в плоскости скольжения ММ через кристалл приводит к смещению соответствующей части кристалла на одно межплоскостное расстояние, при этом справа на поверхности кристалла образуется ступенька.

1. **Классификация видов термической обработки. Назначение каждого вида.**

Задача термической обработки — путем нагрева и охлаждения вызвать необратимое изменение свойств, вследствие необратимого изменения структуры. Любой вид термической обработки обычно изображается в координатах: темпе- температура— время.

Собственно термическая обработка не предусматривает какого-либо иного воздействия, кроме температурного. Если при нагревах изменяется состав металла (сплава) — его поверхностных слоев в результате взаимодействия с окружающей средой, то такая термическая обработка называется химико-термической.

Старение — нагрев (или длительная выдержка при комнатной температуре), вызывающий превращения в закаленном (без полиморфного превращения) сплаве и приближающий его состояние к более устойчивому. Химико-термическая обработка классифицируется по насыщающему элементу — углероду (цементация), азоту (азотирование) и т. д.

Разные виды деформационно-термической обработки разделяются в зависимости от характера фазовых превращений и способа деформации, причем существенное значение имеет, до или после деформации происходит превращение (ТЛЮ и МТО соответственно), а также выше или ниже температуры рекристаллизации производилась деформация (ВТМО и НТМО соответственно).

Термическая обработка имеет главное значение именно для стали. Это обусловлено, с одной стороны, необыкновенно широким распространением стали как конструкционного (и инструментального) материала, а с другой стороны, для одного сплава термическая обработка не дает такого эффекта по изменению свойств, как для стали.

Отжиг I рода — нагрев до различных температур с целью гомогенизации, снятия внутренних напряжений, рекристаллизации. Если в процессе нагрева и охлаждения в сплаве (стали) происходят полиморфные превращения, то они являются лишь явлениями, сопутствующими гомогенизации, так как нет необходимости в фазовой перекристаллизации.

Отжиг II рода (или фазовая перекристаллизация) — нагрев выше Ас3 (или /4cj) с последующим медленным непрерывным или ступенчатым (изотермическим) охлаждением. Частный случай отжига II рода — нормализация (охлаждение на спокойном воздухе).

Закалка с полиморфным превращением — нагрев выше Ас3 (или Acj) с последующим быстрым охлаждением.

Отпуск — нагрев закаленной стали до температуры не выше Ас,. Закалка без полиморфных превращений (а, следовательно, и последующее старение) — сравнительно редкий случай при термической обработке сталей. Она характерна для аустенитных сталей, не имеющих полиморфных превращений, и используется для растворения карбидов или интерметаллидов.

**4. Влияние различных видов термической обработки на свойства конструкционной стали.**

Термическая обработка проводится для изменения свойств стали (прочности, твердости, пластичности, вязкости). Эти свойства зависят от структуры стали после термической обработки.

После отжига, отпуска, нормализации (отпуск с охлаждением на воздухе) структура стали состоит из пластичного феррита и цементита, обладающего высокой твердостью и хрупкостью. Включения карбидов оказывают упрочняющее действие на стали. При малом числе цементитных включений стали пластичны и имеют невысокую твердость. Измельчение частиц цементита при термической обработке приводит к упрочнению стали. При укреплении частиц цементита увеличивается способность стали к пластической деформации.

Повышение температуры отпуска закаленных изделий, ведущее к укрупнению цементитных частиц, снижает прочность. Прочность снижается при уменьшении скорости охлаждения в процессе закалки или повышении температуры из термического распада.

После закалки структура стали состоит из мартенсита и остаточного аустенита. Твердость определяется твердостью мартенсита и его количеством. Пластичность закаленной стали зависит не только от содержания мартенсита, но и от его дисперсности (размера игл). Для обеспечения высокого комплекса механических свойств стремятся получить после закалки мелкоигольчатую структуру, что достигается при мелкозернистой структуре аустенита до превращения.

Твердость стали зависит от температуры изотермического распада аустенита. Чем ниже температура изотермического распада аустенита, тем выше дисперсность перлитных фаз и вследствие этого выше твердость стали.

Заключительной операцией термической обработки является отпуск. При отпуске стальное изделие приобретает свои окончательные свойства. Чем выше температура отпуска, тем ниже прочность и выше пластичность стали. Наибольшая пластичность соответствует отпуску при температуре 600—650°С.

Свойства стали после закалки и высокого отпуска оказываются выше по сравнению с отожженной или нормализованной сталью.

Двойная термическая обработка, состоящая в закалке с последующим высоким отпуском, ведущая к существенному улучшению общего комплекса механических свойств, называется улучшением и является основным видом термической обработки конструкционных сталей.

*Термической обработкой* называют совокупность операций нагрева, выдержки и последующего охлаждения изделий из металлов и сплавов. Задача термической обработки – путем нагрева и охлаждения вызвать требуемые изменения структуры и как следствие свойств. Наиболее распространенными видами термической обработки являются отжиг, нормализация и закалка с отпуском.

Режимы термических обработок характеризуются следующими параметрами: временем (скоростью) нагрева τн  до требуемой температуры tmp.н, временем выдержки τв и временем охлаждения τо (охлаждение с заданной скоростью снижения температуры).

Скорость нагревания зависит от химического состава стали исходного состояния и сложности конфигурации изделия. Требуемая температура нагрева в основном определяется на основании диаграммы состояния железоуглеродистых сплавов.

Выдержка при температуре нагрева должна обеспечивать полный прогрев изделия по всему объему для завершения фазовых превращений, растворения карбидов и выравнивания температуры и химического состава во всех сечениях. Условия (скорость) охлаждения при каждом виде термической обработки различны.

Изделия несложных конфигураций из углеродистых и малолегированных сталей с низким углеродом можно нагревать относительно быстро: загружать изделия в предварительно нагретую до требуемой температуры печь. В этом случае общее время нагревания и выдержки при заданной температуре обычно исчисляют из расчета 1 минута на 1мм толщины в наибольшем сечении изделия из углеродистых сталей. Для малоуглеродистых легированных сталей в связи с их пониженной теплопроводностью\* это время увеличивается на 25…40 % .

Традиционными видами термической обработки изделий из конструкционных и инструментальных сталей являются отжиг, нормализация, закалка в сочетании с тем или иным вида отпуска.

**Отжиг**

*Отжигом* называют вид термической обработки, заключающейся в нагреве выше критических температур с последующим медленным охлаждением (обычно вместе с выключенной печью).

В зависимости от температуры нагрева отжиг подразделяют на полный (нагрев выше верхней критической температуры) и неполный (выше нижней критической температуры). Доэвтектоидные стали подвергают обычно только полному отжигу (нагрев на 30…50оС выше АС3), заэвтектоидные стали – неполному (нагрев на 50…70оС выше АС1).

**Нормализация**

*Нормализацией* называют вид термической обработки, включающей нагрев выше верхних критических точек доэвтектоидных сталей на 30…50оС, заэвтектоидных – 50…70оС с последующим охлаждением на воздухе.

Микроструктура доэвтектоидных сталей перлитного класса после нормализации по фазовому составу получается такой же, как и после отжига, только более мелкозернистой вследствие ускоренного охлаждения на воздухе. Это способствует повышению твердости и прочности нормализованных сталей (по сравнению с отожженными) примерно на 10…15%.

**Закалка**

*Закалкой* называют вид термической обработки, заключающейся в нагреве сталей выше критических температур с последующим охлаждением со скоростями больше критических или критическими. При этом аустенит превращается в мартенсит, представляющий собой пересыщенный раствор углерода в тетрагональной α-решетке.

Указанные скорости охлаждения обеспечиваются применением соответствующих охлаждающих сред.

Закалку подразделяют на полную (нагрев на 30…50оС для доэвтектоидных и на 50…70оС для заэвтектоидных сталей выше верхних критических температур) и неполную (нагрев на 30…50оС или на 50…70оС соответственно выше нижней критической температуры).

Закалка, вследствие больших остаточных напряжений в закаленных изделиях, высокой хрупкости мартенсита, не является окончательной термической обработкой. Поэтому закаленные изделия подвергают дополнительной термической обработке, называемой отпуском.

**Отпуск закаленных сталей**

*Отпуском* называют вид термической обработки, заключающийся в нагреве закаленных сталей до температур, не превышающих АСI.

По температуре нагрева отпуск подразделяют на:

- низкотемпературный (НТО) – до 200 (250) оС;

- среднетемпературный (СТО) – 350…450 (480) оС;

- высокотемпературный (ВТО) – 500…650 (680) оС.

Закалка с высокотемпературным отпуском называется термическим *улучшением* (или просто улучшением).

Температура, время выдержки и скорость охлаждения после отпуска выбирается в зависимости от характера и назначения изделия, химического состава стали и требований к свойствам.

**5. Требования, предъявляемые к подшипниковым сплавам. Сплавы, их структура и свойства.**

Основной тенденцией развития конструкций дизельных двигателей является повышение удельной мощности за счет форсирования по среднему эффективному давлению сгорания и частоте вращения коленчатого вала.  
      Реализация этой тенденции в конкретных конструкциях двигателей неизбежно приводит к повышению механических и термических нагрузок на детали и узлы и в том числе на подшипники коленчатого вала. Кроме того, требования повышения экономичности двигателей, условия их работы в различных климатических условиях и др. факторы, а также специфические требования потребителей приводят к увеличению температуры смазочного масла, а, следовательно, температуры подшипника и соответственно снижению минимальной толщины смазочной пленки в подшипнике. При этом увеличиваются периоды работы подшипников в условиях  нарушения режимов гидродинамического трения.  
       В этих условиях, роль подшипниковых материалов в вопросе обеспечения заданных показателей надежности и долговечности подшипниковых узлов и двигателей в целом, резко возрастает.  
       Требования, предъявляемые к подшипниковым материалам хорошо известны, и основными из них являются:  
- Прочность и способность выдерживать знакопеременные механические нагрузки  
- Хорошие антифрикционные свойства  
- Высокая износостойкость  
- Способность удерживать посторонние частицы, находящиеся в смазочном масле, без повреждения шейки коленчатого вала  
- Высокая коррозионная стойкость  
- Способность хорошо прирабатываться и компенсировать неточности изготовления, сборки и результаты износа поверхностей подшипника в эксплуатации  
- Возможность работать в условиях кратковременных нарушений режимов жидкостного трения   
- и т.п.  
      Очевидно, что в перечисленных требованиях имеются взаимоисключающие. Так, например, увеличение прочности и износостойкости материала напрямую связано с повышением его твердости, а это ведет к ухудшению антифрикционных свойств, способности прирабатываться и удерживать посторонние частицы без повреждения шейки вала.  
       Для обеспечения  всех этих (часто взаимоисключающих) требований был создан триметаллический подшипник, состоящий из стального корпуса,  
слоя антифрикционного сплава (бронзы или алюминия) и тонкого (0,02…0,04 мм) приработочного покрытия свинец-олово-медь с барьерным слоем никеля. Этот тип вкладыша  наиболее распространен в современных форсированных дизельных двигателях и выпускается всеми ведущими изготовителями  подшипников.  
           Именно тонкое приработочное покрытие в современных подшипниках  
способствует обеспечению всех взаимоисключающих требований к ним. Однако  его возможности в настоящее время практически исчерпаны в применении к разрабатываемым перспективным форсированным конструкциям двигателей. Причинами этого являются:  
1.    Недостаточная усталостная прочность свинцовистого сплава в условиях постоянно повышающихся нагрузок.  
2.    Резкое снижение твердости (прочности) сплава с повышением температуры.  
3.    Запрет на использование свинцовистых сплавов, в первую очередь в странах Европы.  
4.    Необходимость использования сложных дорогостоящих очистных сооружений при гальванических процессах.  
  
     Поэтому многие ведущие специализированные фирмы производители подшипников разрабатывают конструкции  с новыми типами покрытий для дизелей высокой степени форсирования.  
   Основой таких покрытий является сплав алюминия с 20% олова, наносимый так называемым методом PVD (Physical Vapor Deposition), что соответствует процессу вакуумного ионно-плазменного напыления. Схема такого подшипника приведена на рис. 1.

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 1а |  |  |
| 1б |  |
| 1в |  |

Рис. 1.

   Впервые нанесение на сталебронзовые вкладыши покрытия алюминия с оловом применила фирма Glyco (в настоящее время Federal  Mogul, Wiesbaden)  Германия. Микроструктура слоя покрытия, названного фирмой “Sputter”, и, характеризуемая равномерным распределением частиц олова в алюминии, представлена на рис. 1а. Для улучшения адгезии такого покрытия с бронзой, оно наносится через подслой сплава никеля с хромом.  
   Для получения покрытия аналогичного состава и свойств, Австрийская фирма Miba разработала свою технологию его получения на основе того же физического метода PVD.  Типичный образец микроструктуры такого покрытия, с равномерным распределением оловянных частиц в виде более крупных дендридов в алюминии представлен на рис.1в.  
  
   Покрытие выдерживает удельные нагрузки превышающие 100 МПа и значительно увеличивает  ресурс подшипника. Однако  высокая твердость сплава (HV 90-110) ухудшает антифрикционные свойства подшипника и делает его более чувствительным к различным нарушениям при изготовлении, ремонте и эксплуатации.     
           
    Фирма «Технокомплекс»  разработала  технологию вакуумного ионно-плазменного напыления (PVD-ТК) для нанесения на бронзовый слой комплексного покрытия алюминий-олово с переменным содержанием олова. В таком покрытии основной слой  соответствует сплаву алюминия с 20% олова, а к поверхности содержание олова увеличивается для улучшения антифрикционных свойств, прирабатываемости, способности к запрессовке посторонних частиц и т.д.  Это позволяет устранить вышеупомянутые противоречия между прочностью и антифрикционными качествами покрытий вкладышей и создать подшипник нового типа, способный работать в двигателях практически всех типов.  Кроме того, комбинации и сочетания материалов в слое могут быть различными для обеспечения наилучших показателей надежности и ресурса работы конкретных двигателей. Микроструктура такого покрытия приведена на рис. 1с.  
    Важным положительным качеством процесса вакуумного ионно-плазменного напыления также является его экологическая безопасность в сравнении с гальваническим процессом.

|  |  |
| --- | --- |
| ЦЕЛЬНОКАТАНЫЕ КОЛЬЦА | |
| Диаметр | 140 - 6000 мм |
| Высота | 30 - 1200 мм |
| Масса | 5 - 12000 кг |

|  |
| --- |
| Марки сталей и сплавы российские |
| ШХ15СГ   20Х2Н4А   ШХ4   20ХН |

|  |
| --- |
| Марки сталей и сплавы зарубежные |
| 100Cr6   100CrMo7   18NiCrMo5 |

Для обеспечения требований наиболее важны следующие основные свойства подшипниковых материалов:

а) теплопроводность, обеспечивающая интенсивный теплоотвод от поверхностей трения, и малый коэффициент линейного расширения во избежание больших изменений зазоров в подшипниках;

б) прирабатываемоcть, обеспечивающая умень-шение кромочных и местных давлений, связанных с упругими деформациями и погрешностями изготовления;

в) хорошая смачиваемость маслом и способность образовывать на поверхностях стойкие и быстро восстанавливаемые масляные пленки;

г) коррозионная стойкость.

Кроме того, существенное значение имеют технологические свойства: литейные, хорошая обрабатываемость резанием и т. д. Хорошим антифрикционным свойствам материала благоприятствует структура, характеризуемая пластической основой и более твердыми вкрапленными в неё составляющими.

Подшипниковые антифрикционные материалы по своему химическому составу делятся на следующие группы: баббиты, бронзы, сплавы на цинковой основе, сплавы на алюминиевой основе, антифрикционные сплавы на железной основе.

**Баббиты**

Наиболее давними подшипниковыми материалами являются мягкие сплавы на оловянной и свинцовой основах. Первый подшипниковый сплав был разработан в 1839 г. англичанином   
И. Баббитом. Он содержал 82–84 % Sn, 5–6 % Сu и 11–12 % Sb. Этот сплав положил начало использо-ванию мягких белых антифрикционных сплавов в технике, и поэтому все последующие сплавы на оловянной и свинцовой основах стали называть баббитами. Баббиты обладают низкой твердостью (НВ 13–32), имеют невысокую температуру плавления (240–320 °С), повышенную размягчаемость (НВ 9–24 при 100 °С), отлично прирабатываются и обладают высокими антифрикционными свойствами. В то же время они обладают низкой усталостной прочностью, что сказывается на работоспособности подшипников.

К выбору подшипниковых сплавов необходимо подходить с учетом толщины баббитового слоя подшипника. Гетерогенное микростроение сплавов типа Б83 с крупными твердыми кубическими кристаллами химического соединения SnSb (β-фазы) не способствует удовлетворительной сопротивляемости усталостным повреждениям под действием циклических нагрузок в тонкослойных подшипниках (толщина слоя менее 1 мм). В отдельных локальных объемах кристаллов β-фазы накапливается пластическая деформация, и в слое баббита возникают остаточные напряжения. В тонком слое внедрение в пластичную основу кристаллов твердой составляющей, принимающей на себя нагрузку, затруднительно. Размеры таких кристаллов нередко соизмеримы с толщиной слоя (достигают нескольких десятых мм). Слой мягкой пластичной основы под кристаллами твердой составляющей приобретает способность больше сопротивляться пластической деформации за счет влияния подложки (корпуса цапфы). На отдельных участках скопления хрупких кристаллов β-фазы возникает вероятность непосредственной передачи давления через эти кристаллы от шейки вала на корпус подшипника. В таких условиях β-фаза оказывается слабым участком, по кристаллам SnSb развиваются трещины. Эти микроскопические повреждения при дальнейших циклических нагружениях являются очагами развития усталостных трещин.

Гетерогенная структура, состоящая из мягкой легкоприрабатывающейся основы и твердых включений, способствует удержанию пленки смазки, что снижает коэффициент трения.

Баббиты применяются в подшипниках в виде слоя, залитого по корпусу вкладыша из бронзы, латуни, стали или чугуна. Наиболее прочное соединение заливаемого слоя баббита с корпусом вкладыша достигается специальным процессом заливки, включающим очистку поверхности корпуса и его облуживание. Тонкостенные вкладыши двигателя легкового автомобиля изготовляются штамповкой из биметаллической ленты, получаемой непрерывной заливкой баббита по движущейся стальной калиброванной ленте.

При правильной подготовке поверхности вкладыша и его заливке прочное соединение баббита и металла корпуса (бронза, сталь, чугун) происходит по всей поверхности вкладыша, что позволяет значительно уменьшить толщину слоя баббита. Способ механического крепления баббита к вкладышу (путем устройства во вкладыше пазов и отверстий, заполняемых баббитом при заливке) пригоден лишь для малонапряженных баббитов.

Для тонкослойных вкладышей баббит должен удовлетворять следующим требованиям:

* не иметь резко выраженной неоднородной структуры. Для них возможно использование однофазных сплавов при достаточном сопротивлении металла смятию;
* обладать повышенной сопротивляемостью усталостному разрушению, поскольку работа тонкослойных прецезионных вкладышей должна протекать, в основном, в условиях жидкостного трения;
* баббитовый антифрикционный слой желательно применять с пониженной твердостью — до НВ 15–20. При этом улучшается прирабатываемость. Это важно в связи с тем, что сопротивляемость смятию в тонком слое повышается за счет влияния подложки;
* для обеспечения надлежащей долговечности подшипников существенное значение имеет прочность соединения баббита с корпусом, определяемая способностью слоя полуды сопротивляться усталостному разрушению.

В России разработаны и применяют для тонкослойных подшипников сплавы Б88, БК2 с добавкой переплава и другие.

Подшипники с толщиной баббитового слоя > 3 мм используют при сравнительно легких условиях работы. Баббитовый слой таких подшипников (Б83, Б16, БН, БКА) обладает хорошей способностью прирабатываться и является своеобразным компенсатором всякого рода неточностей, образованных при обработке и монтаже трущихся деталей и возникающих в процессе эксплуатации. К такому типу относятся подшипники скольжения вагонов, вкладыши тихоходных мощных судовых двигателей, компрессоров и др.

**Сплавы на медной основе**

Из сравнительно большого количества сплавов на медной основе в качестве антиффикционных используются обычно бронзы (оловянные и безоловянные) и латуни. Подшипники изготовляют из бронзы в монометаллическом и биметаллическом исполнении. Монометаллические подшипники (вкладыши, втулки и др.) изготовляют из бронз, обладающих достаточной прочностью и твердостью. Бронзы, употребляемые в таких подшипниках, подразделяются на сплавы с высоким (до 10 %) и низким (до 3 %) содержанием олова. В состав легирующих добавок входят Zn, Pb, Ni, P и др. Стандартом (ГОСТ 613–79) определены составы малооловянистых бронз. Бронзы же с высоким содержанием олова используют в ответственных случаях по ведомственным техническим условиям.

Для изготовления свертных втулок, торцовых дисков и других антифрикционных деталей применяют деформируемые оловянные бронзы.

Для биметаллических подшипников в качестве антифрикционного слоя употребляются бронзы, содержащие повышенное количество свинца, без олова или с небольшим количеством олова. Распространенным сплавом первого вида является бронза БрСЗО, содержащая 30 % Pb. Сплав второго вида содержит 22 % Pb и 1 % Sn. Для монометаллических подшипников иногда используется свинцовистая бронза БрОС5-25 (5 % Sn и 25 % Pb).

Помимо оловянных бронз сравнительно широко используют сплавы, не содержащие олово (безоловянные). Некоторые из сплавов по свойствам не уступают, а иногда и превосходят оловянные бронзы.

В тяжелонагруженных трущихся деталях (дорожные машины, тяжелое станочное оборудование, скользящие соединения теплопередаточного оборудования и др.) с успехом применяют высокопрочные алюминиевые бронзы.

В меньшей степени, чем бронзы, употребляются в качестве антифрикционных материалов латуни (сплавы меди с цинком и другими металлами). В качестве антифрикционных используются так называемые кремнистые и марганцовистые латуни и находят применение алюминиевожелезные латуни (ГОСТ 17711–93).

Сплавы на медной основе широко распространены во всем мире. Составы их мало отличаются один от другого.

**Сплавы на алюминиевой основе**

За последнее время в нашей стране и за рубежом резко возросло использование алюминиевых подшипниковых сплавов. Они обладают достаточной усталостной прочностью, коррозионной стойкостью в маслах, имеют сравнительно высокую задиростойкость и хорошие антифрикционные свойства. Эти качества во многом определили тенденцию замены ими антифрикционных сплавов на свинцовой и оловянной основе, а также свинцовистой бронзы.

Алюминиевые сплавы употребляют для изготовления монометаллических деталей (втулок, подшипников, шарниров и др.) и биметаллических подшипников. Последние изготовляют штамповкой из биметаллической полосы или ленты со слоем алюминиевого сплава, соединенного со сталью в процессе совместного пластического деформирования при прокатке. Для монометаллических подшипников употребляются сравнительно твердые прочные сплавы, а слой биметаллических вкладышей изготовляют из менее твердого пластичного металла.

Алюминиевые сплавы классифицируют преимущественно по микроструктурному признаку. Эта классификация отражает в большей степени антифрикционные свойства сплавов, так как общепризнанной является роль мягких структурных составляющих в уменьшении износа и увеличении сопротивляемости задиру трущейся пары. К I группе относят сплавы, имеющие включения твердых структурных составляющих (FеАl3, Аl3Ni, CuAl2, Mg2Si, AlSb, кремний и др.) в пластичной основе металла. В сплавах II группы, наряду с твердыми составляющими, имеются мягкие включения.

В РФ сплавы на алюминиевой основе стандартизованыГОСТ 14113–78.

В зарубежной практике получили большее распространение сплавы II группы, но в последние годы сравнительно широко используют и сплавы I группы.

За последние годы в связи с появлением тяжелонагруженных двигателей в автомобилестроении, тракторостроении, транспортном машиностроении и других появилась острая необходимость в материалах подшипников, обладающих повышенной задиростойкостью. В связи с этим вРФ**,** Японии, Англии и Америке разрабатываются алюминиевооловянные сплавы, содержащие до 30 и даже 40 % Sn и отрабатывается технология изготовления сплавов, содержащих свинец. Такие сплавы обладают способностью хорошо сопротивляться задиру при ультратонких смазочных слоях, однако эта особенность достигается наиболее полно при содержании 14 % Pb. В России разработан метод получения алюминиевосвинцовых (до 30 % Pb) сплавов из гранул. Отливка гранул производится во вращающемся стакане с круглыми отверстиями при частоте вращения 1500 об/мин. Струя разбивается на капли, которые через отверстия попадают в воду и кристаллизуются.

Последующее прессование гранул производят различными способами. Хорошие результаты были получены при прессовании на шнековых прессах. Прессованные заготовки достаточно хорошо обрабатываются давлением и соединяются с помощью прокатки со стальными полосами для последующего изготовления биметаллических подшипников.

**Сплавы на цинковой основе**

Цинковые сплавы в качестве антифрикционных, хотя и известны с давних времен, не получили достаточно широкого распространения. В то же время цинковые сплавы обладают рядом ценных свойств, которые дают возможность использовать их во многих случаях взамен бронз и баббитов.

Сплавы на цинковой основе, обладая низкой температурой плавления (  400 °С), в большей степени, чем бронзы и алюминиевые сплавы, размягчаются с нагревом, благодаря чему легче прирабатываются. По этой причине подшипники из цинковых сплавов меньше изнашивают сопряженные поверхности цапфы при попадании абразивов. Частицы абразивов легче внедряются в трущуюся поверхность и меньше повреждают за счет микрорезания цапфу.

Цинковые сплавы являются весьма технологичными при изготовлении как монометаллических, так и биметаллических трущихся деталей. Легко достигается соединение цинкового сплава со сталью литейным способом и совместной прокаткой со стальной заготовкой. Соединение жидкого цинкового сплава со сталью достигается за счет слоя жидкого цинка, наносимого способом горячего цинкования.

Подшипники и другие детали из цинковых сплавов употребляются в литом и обработанном давлением (прокатка, прессование) состояниях.

Особенностью цинковых сплавов в отличие от алюминевых и бронз является повышение прочности и пластичности сплавов после горячей обработки давлением при 250–300 °С. Это сказывается и на показателях усталостной прочности. Так, например, для литого сплава ЦАМ9-1,5 предел выносливости при переменном изгибе вращающихся круглых образцов 5,0 кгс/мм2, а для прессованного металла — 10–11 кгс/мм2.

Цинковые сплавы в качестве антифрикционных материалов больше всего используют в нашей стране, причем опыт их массового применения накоплен на железнодорожном транспорте. В других странах цинковые сплавы используют в сравнительно небольших количествах.

**Сплавы на железной основе**

Как антифрикционные материалы стали используют сравнительно редко и при очень легких условиях работы (при небольших удельных давлениях и невысоких скоростях скольжения). Будучи твердыми и имея высокую температуру плавления, стали плохо прирабатываются, сравнительно легко схватываются с сопряженной поверхностью цапфы и образуют задиры. Обычно используют так называемые «медистые стали», содержащие малое количество углерода, либо «графитизированные стали», имеющие включения свободного графита.

Чугуны применяют для подшипников и других трущихся деталей в большем количестве и ассортименте, чем стали.

Чугун с глобулярной формой графита и с тол-стыми пластинками более износостоек, чем чугун с тонкими пластинками. В структуре антифрикционного чугуна желательно иметь минимальное количество свободного феррита (не более 15 %) и должен отсутствовать свободный цементит.

**Сплавы, изготовляемые методом порошковой металлургии**

Изготовляемые методом порошковой металлургии подшипниковые материалы выполняются путем спекания заготовок, спрессованных предварительно (в пресформах) из надлежащим образом обработанных металлических порошков, часто с добавкой небольшого количества графита. Степень пористости обычно около 25 %. В качестве обязательной добавки к железным и медным пористым изделиям, помимо графита, используют самосвязывающие порошки дисульфита молибдена, нитрита бора и др.

Готовые втулки калибруются обжатием (резанием со стороны рабочей поверхности не обрабатываются) и пропитываются в вакууме маслом. Главное их назначение — подшипники малого размера, работающие при малых нагрузках, без подвода смазки. Срок службы ограничен запасом смазки в слоях, прилегающих к поверхности трения.