

21 Стали и сплавы с особыми свойствами

Магнитные и электротехнические стали и сплавы

В зависимости от знака и степени магнитной восприимчивости материалов различают *диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики*.

Диамагнетики обладают отрицательной магнитной восприимчивостью. Они намагничиваются противоположно приложенному магнитному полю и таким образом, ослабляют его. К ним относят: полупроводники (Si, Ge), диэлектрики (полимеры), медь, серебро, бериллий.

Парамагнетики характеризуются слабой намагниченностью под действием внешнего поля. К ним относятся: K, Na, Al, Mo, W, Ti.

Ферромагнетики обладают высокой магнитной восприимчивостью. Из всех металлов только четыре: Fe, Co, Ni, гадолиний – обладают высокими ферромагнитными свойствами.

Для ферромагнитных материалов основными характеристиками являются:

- **остаточная индукция** B_r (Тл) – магнитная индукция, остающаяся в образце после его намагничивания и снятия магнитного поля;

- **коэрцитивная сила** H_c (А/м) – напряженность магнитного поля обратного знака, которая должна быть приложена к образцу для его размагничивания;

- **магнитная проницаемость** μ (Гн/м) – интенсивность намагничивания, определяющаяся как тангенс угла наклона к первичной кривой намагничивания $B = f(H)$.

В зависимости от формы гистерезисной кривой и значений основных магнитных характеристик различают магнитотвердые и магнитомягкие сплавы (**слайд**). Магнитотвердые материалы характеризуются широкой петлей гистерезиса (**слайд, а**), высоким значением коэрцитивной силы и применяются для изготовления постоянных магнитов. Магнитомягкие сплавы работают в условиях циклически изменяющихся магнитных полей и непрерывного перемагничивания. Они имеют узкую петлю гистерезиса (**слайд, б**), малые значения коэрцитивной силы и характеризуются небольшими потерями на гистерезис. Из них изготавливают сердечники трансформаторов, электродвигателей и генераторов, детали слаботочной техники, т.е. такие детали, которые подвергаются многократному переменному намагничиванию.

Магнитотвердые материалы

Для постоянных магнитов применяют высокоуглеродистые стали со структурой мартенсита, содержащего около 1 % C, дополнительно легированные хромом (3 %) EX3, а также одновременно хромом и кобальтом EX5K5, EX9K15M2. Легирующие элементы повышают магнитные характеристики, одновременно улучшая механическую и температурную стабильность постоянных магнитов. Эти стали подвергают нормализации, закалке и низкому отпуску.

Важнейшим легирующим элементом магнитных сплавов, способствующим максимальным значениям коэрцитивной силы, отсутствию размагничивания под действием вибрации и высоких температур, является **кобальт**.

Высокие магнитные свойства имеют сплавы системы Fe-Ni-Co, называемые альнико или ЮНДК (слайд).

Маркируются эти сплавы теми же буквами, что и стали, только: буквы в конце маркировки БА означают, что сплавы имеют столбчатую структуру, а буквы АА – монокристаллическую.

Недостатком этих сплавов является их высокая твердость, хрупкость и плохая обрабатываемость. Поэтому магниты из них изготавливают литыми и обрабатывают шлифованием. ТО: закалка с температуры 1250-1280 °С с определенной для каждого сплава скоростью охлаждения и отпуска 580-600 °С. Магнитные свойства можно улучшить, если охлаждение после закалки проводить в сильном магнитном поле.

Для изготовления небольших и точных по размерам магнитов из сплавов альнико применяют методы порошковой металлургии. Однако порошковые магниты уступают по магнитным свойствам литым.

Очень хорошие, но дорогие магниты изготавливают из сплавов с высоким содержанием кобальта (25-50 %), известные под названием **пермендур** (50 % Fe, 50 % Co), **перминвар** (45 % Ni, 25 % Co, 23 % Fe).

Для повышения магнитных свойств магнитотвердые сплавы должны иметь неравновесную структуру, сопровождающуюся значительными внутренними напряжениями и мелкое зерно.

1.2 Магнитомягкие материалы

Основными требованиями являются:

- низкое значение коэрцитивной силы;
- высокая магнитная проницаемость;
- малые потери при перемагничивании и на вихревые токи.

Для удовлетворения этих требований металл должен обладать гомогенной структурой, быть чистым от примесей и включений и иметь крупнозернистое строение, свободное от внутренних напряжений.

В качестве магнитомягкого материала применяют технически чистое железо, в котором все примеси, особенно углерод, являются вредными. Содержание углерода не должно превышать 0,025 %. Для устранения наклепа и получения крупного зерна листовой металл подвергают высокотемпературному отжигу в безкислородной среде. Техническое железо применяют для изготовления реле, сердечников, электромагнитов постоянного тока. Низкое удельное электрическое сопротивление увеличивает потери при перемагничивании.

Более высокое электрическое сопротивление имеют электротехнические низкоуглеродистые стали, дополнительно легированные 0,8-4,8 % кремния. Благодаря более высокому электрическому сопротивлению снижаются потери на вихревые токи. Введение кремния одновременно повышает магнитную проницаемость, а благодаря росту зерна снижаются потери на

гистерезис. Однако, при содержании кремния 4 % происходит охрупчивание стали, что затрудняет получение тонколистового материала.

Листовую электротехническую сталь после прокатки подвергают высокотемпературному отжигу в вакууме или атмосфере сухого водорода при 1100-1200 °С.

Свойства стали представлены в таблице (слайд).

В России принята цифровая маркировка электротехнической стали. Первая цифра определяет структуру и вид проката: 1 – горячекатаная изотропная; 2 – холоднокатаная изотропная; 3 – холоднокатаная анизотропная с кристаллической структурой направления [100].

Вторая цифра определяет содержание кремния: 0 - < 0,4 %; 1 – 0,4-0,8 %; 2 – 0,8-1,8 %; 3 – 1,8-2,8%; 4 – 2,8-3,8 %; 5 – 3,8-4,8 %.

Третья цифра определяет потери на гистерезис и тепловые потери при определенном значении B и f ($P_{1,5/50}$ на примере первой строчки в таблице).

Четвертая цифра – код числового значения нормируемого параметра, чем больше цифра, тем меньше удельные потери $P_{1,5/50}$.

Кристаллы α -железа характеризуются ярко выраженной анизотропией магнитных свойств. Ребро куба является осью наиболее легкого намагничивания. Получение в стали такой кристаллической структуры с одинаковой ориентировкой всех кристаллов, способствует повышению магнитной проницаемости параллельно направлению прокатки.

В холоднокатаной листовой стали с высоким содержанием кремния можно получить такое расположение кристаллитов, когда направление прокатки будет совпадать с направлением легкого намагничивания (ребро куба), а направление поперек прокатки в плоскости листа будет совпадать с диагональю [100] плоскости элементарной кубической ячейки (слайд). По имени изобретателя такая текстура называется *текстурой Госсса*.

Современная технология производства высших сортов электротехнической стали предусматривает ее выплавку с минимальным содержанием углерода и заданным содержанием кремния, прокатку листа в горячем состоянии на толщину около 2,5 мм, отжиг 880 °С и холодную прокатку на толщину 0,35-0,5 мм. При большей холодной деформации (45-60 %) сталь получает текстурированную до 90 % структуру, при деформации около 10 % - малотекстурированную структуру. Если прокатка производится только в горячем состоянии, то текстура не образуется и магнитные свойства вдоль и поперек прокатки будут одинаковые.

Основными деталями электрических машин (электродвигатели, генераторы, трансформаторы и т.д.) являются магнитопроводы, составленные из тонких листов трансформаторной стали.

После механической обработки, необходимой для изготовления деталей магнитопровода, во избежание наклепа и для укрупнения зерна проводят отжиг при 1100-1200 °С в атмосфере водорода.

Для работы в слабых магнитных полях (телекоммуникации) применяют *пермаллои*, представляющие собой Fe-Ni сплавы с определенными узкими пределами содержания никеля (~79 %). Иногда их дополнительно легируют

Мо и Сг, улучшающими способность сплавов к пластической деформации и их магнитную проницаемость. Высоконикелевые пермаллои 79НМ, 81НМА характеризуются очень высокой магнитной проницаемостью в слабых полях. Их получают вакуумным переплавом, прокатывают на ленты и листы магнитопроводов, отжигают при 1100-1300 °С в вакууме или водороде.

Для работы в слабых полях (радио, телефон) разработан заменитель дорогих пермаллоев – сплав *альсифер*, содержащий 5,4 % Al, 9,6 % Si, остальное железо. Из-за хрупкости альсифера изделия из него изготавливают в виде тонкостенных отливок или методом порошковой металлургии.

Для высокочастотной техники необходимы материалы с чрезвычайно высоким электросопротивлением, сохраняющие высокую магнитную проницаемость в широком частотном диапазоне. Этим требованиям отвечают *ферриты*, являющиеся полученной спеканием магнитной керамики, состоящей из Fe₂O₃ и следующих оксидов: MnO, MgO, ZnO, Li₂O.

Электротехнические сплавы

Стали и сплавы этого типа используют либо для преобразования электрической энергии в тепловую, либо, наоборот, в качестве материалов, имеющих минимальное электросопротивление. Первая группа электротехнических сплавов имеет высокое электросопротивление и используется для изготовления электронагревательных элементов и реостатов.

В качестве реостатных сплавов применяют сплавы на основе меди с добавками Ni, Mn, Zn. Медноникелевые сплавы с 40-50 % Ni (*константан* МНМц40-1,5, *копель* МНМц45-0,5) имеют максимальное сопротивление, которое почти не меняется с температурой. Максимальная температура – 500 °С.

Окалиностойкость определяет срок службы нагревательных элементов печей и приборов, имеющих значительно более высокую температуру. Для нагревателей применяют ферритные стали, легированные Сг и Al (*хромали*), а также уже известные нихромы.

Для изготовления термопар необходима проволока не только с высокой жаростойкостью, но и с прямолинейной зависимостью электродвижущей силы от температуры. В качестве материала для изготовления термопар применяют проволоку из платины (первый электрод) и сплава платины с родием (10 %). Такие термопары можно использовать для измерения высоких температур вплоть до температуры жидкой стали. Для измерения более низких температур (до 1000 °С) применяют сплавы Ni с 2 % Al (*алюмель*) и Ni с 10 % Сг (*хромель*).

Термопары используются для измерения температуры. Когда между соединениями разнородных электрических проводников существует разница температур, создается разность потенциалов. В схеме возникает электрический ток. Измеритель, показывающий величину тока, снабжен соответствующей температурной шкалой. Обозначения: А) оба соединения находятся в тепловом равновесии, ток через измеритель не течет В) разница температур вызывает ток, который фиксируется измерителем. 1) «горячий контакт» 2) «холодный контакт» 3) висмутовая проволока 4) медная проволока 5) электрический ток

Сверхпроводимость и сверхпроводящие материалы

С понижением температуры, как правило, наблюдается монотонное падение электросопротивления. Вблизи абсолютного нуля у многих металлов и сплавов происходит резкое падение электросопротивления, и они становятся сверхпроводниками (*слайд*).

Сверхпроводимость – способность материала не оказывать сопротивление электрическому току при температурах ниже характерной для них критической температуры T_k .

Впервые сверхпроводимость обнаружил в 1911 г. голландский ученый Гейке Камерлинг-Оннес, который наблюдал скачкообразное исчезновение сопротивления ртути до неизмеримо малой величины при температуре 4,2 К (*слайд*).

К настоящему времени сверхпроводимость обнаружена у большинства чистых металлов. Открыто и изучено около трех тысяч сверхпроводящих сплавов и интерметаллических соединений, и их число непрерывно растет. Существует два рода сверхпроводящих материалов:

- 1 рода – чистые металлы;
- 2 рода – сплавы и соединения.

Напряженность магнитного поля в объеме сверхпроводников при температуре ниже критической равна нулю. Металл становится диамагнетиком – материалом, приобретающим во внешнем магнитном поле магнитный момент, направленный против намагничивающего поля. Поэтому при переходе материала в сверхпроводящее состояние внешнее магнитное поле выталкивается из его объема и остается лишь в тонком поверхностном слое толщиной около 10^{-5} мм. Это явление называется *эффектом Мейсера* (*слайд*).

Сверхпроводящее состояние может быть разрушено как при нагреве материала до температуры выше критической, так и в результате воздействия сильных внешних магнитных полей с напряженностью H_k , превышающей критическое состояние. Критическое магнитное поле подобно критической температуре является основной характеристикой сверхпроводящего материала. При повышении T_k или H_k происходит скачкообразное восстановление электросопротивления, и магнитное поле проникает в металл.

Одним из преимуществ сверхпроводников является возможность достижения высоких плотностей тока. Чем выше плотность тока, тем компактнее прибор, меньше расход дорогостоящих сверхпроводниковых материалов и меньше масса, которую необходимо охлаждать.

Сверхпроводящие материалы и технология их производства

Из всех чистых металлов, способных переходить в сверхпроводящее состояние, наивысшую критическую температуру перехода имеет ниобий ($T_{кр} = 9,2$ К). Однако для ниобия характерны низкие значения критического магнитного поля ($\sim 0,24$ Тл), что недостаточно для его широкого применения. Хорошим сочетанием критических параметров обладают следующие соединения ниобия (*слайд*).

К наиболее распространенным сверхпроводящим материалам относится сплав ниобия с 46,5 % Ti. Этот сплав отличается высокой технологичностью, из него обычными методами плавки, обработки давлением и термической обработки можно изготавливать проволоку, кабели, шины. Интерметаллиды, хотя и обладают более высокими критическими параметрами, имеют высокую хрупкость, что затрудняет изготовление из них длинномерных проводов традиционными методами металлургической технологии.

При изготовлении сверхпроводящего кабеля в бруске меди просверливают множество отверстий и в них вводят Nb-Ti тонкие стержни. Брусек протягивают в тонкую проволоку, вновь нарезают его на куски, которые снова вводят в новые бруски. Повторяя многократно эту операцию, получают кабель с большим числом сверхпроводящих жил, из которого делают катушки для электромагнитов (слайд).

Если в какой-либо жиле сверхпроводимость случайно нарушится, то высокая электро- и теплопроводность медной матрицы дает возможность осуществить термическую стабилизацию сверхпроводника в диэлектрическом режиме.

В конце 1980-х годов была открыта высокотемпературная сверхпроводимость в керамических материалах.

В 1986 г. швейцарские физики Дж. Беднорц и К. Мюллер впервые получили сверхпроводящие керамические оксидные образцы системы La-Ba-Cu-O с температурой перехода в сверхпроводящее состояние 35 К. За это открытие они были удостоены Нобелевской премии по физике.

Керамика на основе соединений оксида меди с оксидом стронция, висмута и щелочноземельных элементов имеет еще более высокую T_k – до 100-115 К. В настоящее время исследователями ряда стран разработано большое число керамических материалов с переходом при температурах 250 К и даже при комнатной температуре. Динамика разработок сверхпроводящих материалов представлена на слайде.

Перспектива использования сверхпроводящих материалов

Наиболее важными областями применения сверхпроводников является создание сильных магнитных полей, получение и передача энергии.

Преимущества:

- соленоид из сверхпроводящего материала может работать без подвода энергии извне сколь угодно долго, поскольку однажды возбужденный в нем ток не затухает;
- поддержание соленоида в сверхпроводящем состоянии не требует больших энергетических затрат;
- сверхпроводящие магниты намного компактнее обычных.

Применение:

- используют для исследований в области физики высоких энергий, создания мощных магнитных кольцевых ускорителей частиц и систем управления движением пучков частиц на выходе из ускорителя;

- для осуществления управляемого термоядерного синтеза (ядра гелия из ядер дейтерия и трития необходимо удерживать в реакционном пространстве горячую плазму, нагретую до 10^8 - 10^9 °C);

- для изготовления сверхпроводящих генераторов электроэнергии значительно большей мощности, чем применяемые генераторы традиционной конструкции (по расчетам – по сверхпроводящему кабелю толщиной с руку можно пропускать всю пиковую мощность, вырабатываемую всеми электростанциями США);

- для создания поезда без колес с магнитной подвеской и тягой – поезд на магнитной подушке (**слайд**). Колеса в поезде на магнитной подушке (*магнитоплан*) используются, как в самолете, только для разгона и торможения, развиваемая скорость ~ 500 км/ч.

Сплавы с особыми тепловыми и упругими свойствами

Для ряда отраслей машиностроения и приборостроения необходимо применение материалов со строго регламентированными значениями в определенных температурных интервалах эксплуатации таких физических свойств, как температурные коэффициенты линейного расширения (ТКЛР) и модуля нормальной упругости β (ТКМУ). Эти коэффициенты определяют характер изменения размеров детали и модуля упругости сплавов при нагреве.

Согласно правилу Курнакова, в том случае, если компоненты образуют твердые растворы, ТКЛР сплава изменяется по криволинейной зависимости внутри пределов, ограниченных значениями ТКЛР этих чистых компонентов. Коэффициент линейного расширения α возрастает с повышением температуры (**слайд**). Однако сплавы Fe-Ni не подчиняются общим закономерностям. В области концентраций от 30 до 45 % Ni для них характерны аномалии (**слайд**). Самое низкое значение ТКЛР наблюдается у сплава с содержанием никеля 36 %, его открыл Гийом в 1897 г. и назвал *инвар* (лат. Invariabilis - неизменный).

Кроме того, для этих сплавов характерна еще одна аномалия – аномалия термического коэффициента модуля упругости (ТКМУ). В любых твердых телах, в том числе и в металлах, при нагреве наблюдается уменьшение модуля упругости, являющегося мерой сил межатомных связей. В сплавах с инварным эффектом модуль упругости растет или остается постоянным с повышением температуры (**слайд**). И опять сплав с 36 % никеля. Подбор определенного химического состава позволяет разработать сплавы, модуль упругости которых практически не зависит от температуры. Сплавы, сохраняющие постоянство модуля упругости в широком интервале температур, называются *элинварами*.

Для обеспечения стабильности ТКЛР и ТКМУ для каждого конкретного случая необходимо применение сплавов строго определенного химического состава. Такие сплавы обычно называют прецизионными сплавами (фр. Precision - точность), т.е. отличающимися высокой точностью химического состава.

Области применения представлены в таблице (**слайд**).

Инвар 36Н благодаря высокому уровню механических свойств и технологичности используется в качестве конструкционного материала для деталей, от которых требуется постоянство размеров при меняющихся температурных условиях эксплуатации (жесткозакрепленные трубопроводы сложной пространственной конфигурации, перекачивающие сжиженные газы в криогенных установках). Для обеспечения необходимых ТКЛР и ТКМУ содержание углерода в инварных сплавах не должно превышать 0,05 %.

В таблице представлены составы и свойства сплавов, нашедших наибольшее применение (слайд). Значения ТКЛР приведены в состоянии после отжига при температуре $\sim 900^{\circ}\text{C}$ с последующим медленным охлаждением. Минимальное значение α инвара достигается после закалки от 830°C , в результате которой примеси переходят в твердый раствор, и отпуска при 315°C . Холодная деформация также способствует снижению ТКЛР. В результате комбинации обеих обработок α снижается почти до нуля.

Суперинвар – сплав, в котором часть никеля заменена равным количеством кобальта и дополнительно легированный малыми добавками меди.

Состав сплавов для пайки и сварки со стеклом подбирают таким образом, чтобы ТКЛР стекла и металла были близки во всем интервале температур вплоть до размягчения стекла. *Ковар* применяют для соединения с термостойкими стеклами, а *платинит* – с обычными легкоплавкими стеклами.

Стали с определенным тепловым расширением служат также для изготовления термобиметаллов, когда слой с низким ТКЛР («пассивный слой») путем прокатки соединяют с другим слоем, обладающим более высоким ТКЛР («активный слой»). Биметаллические пластины используют в качестве терморегуляторов в приборостроении. Нагрев такой пластины приводит к ее искривлению, позволяющему разомкнуть электрическую цепь.

Сплавы с заданными свойствами упругости, помимо низких значений ТКМУ должны обладать высоким сопротивлением малым пластическим деформациям и релаксационной стойкостью в условиях статического и циклического нагружения.

Элинвар, содержащий 36 % никеля и 12 % хрома характеризуется теми же значениями ТКМУ, что и инвар, но менее зависит от возможных отклонений в концентрации никеля. Однако, он имеет более низкие механические свойства, кроме того точка Кюри этого сплава составляет 100°C , что ограничивает его температурный интервал применения.

В связи с этим в элинварах увеличивают концентрацию никеля, а для улучшения механических свойств их дополнительно легируют титаном, алюминием или бериллием, подвергают двойной закалке от $900-950^{\circ}\text{C}$ в воду и старению при $600-700^{\circ}\text{C}$ в течение 4 ч.

После первой закалки элинвары очень пластичные, в этом состоянии их подвергают штамповке и механической обработке. После повторной закалке и последующего старения происходит выделение упрочняющих фаз из аустенита, что приводит к упрочнению. К наибольшему упрочнению

приводит сочетание низкотемпературной термомеханической обработки с последующим старением. Благодаря этому увеличивается температура эксплуатации данных сплавов до 450 °С.

Элинварные дисперсионно-твердеющие сплавы применяют для изготовления упругих чувствительных элементов прецизионных приборов: расходомеры, регуляторов скорости и датчиков линейных ускорений, динамометров электронных весов, волосковых спиралей часовых механизмов.

Металлы с памятью формы *Механизм эффекта памяти формы*

Долгое время неупругую деформацию считали полностью необратимой. В начале 60-х годов XX в. был открыт обширный класс металлических материалов, у которых элементарный акт неупругой деформации осуществляется за счет структурного превращения. Такие материалы обладают обратимостью неупругой деформации. Явление самопроизвольного восстановления формы – эффект памяти формы (ЭПФ) – может наблюдаться как в изотермических условиях, так и при температурных изменениях. При теплосменах такие металлические материалы могут многократно обратимо деформироваться.

Металлы, обладающие ЭПФ, относятся к числу наиболее ярких представителей материалов со специальными свойствами. Повышенный интерес к этому металлическому феномену обусловлен уникальным сочетанием высоких обычных механических характеристик, сопротивления усталости, коррозионной стойкости и необычных свойств, таких как термомеханическая память, реактивное напряжение, основанных на термоупругом мартенситном превращении, происходящих в интервале температур от -150 до +150 °С.

Из большого числа сплавов с ЭПФ наиболее перспективными для практического применения являются сплавы Ti-Ni (50:50 %), обычно называемые никелидом титана или нитинолом. Реже используются более дешевые сплавы на основе меди: Cu-Al-Ni, Cu-Al-Zn.

Эффект памяти формы состоит в том, что образец, имеющий определенную форму в аустенитном состоянии при повышенной температуре, деформируют при более низкой температуре мартенситного превращения. После перегрева, сопровождающегося протеканием обратного превращения, исходная характерная форма восстанавливается. ЭПФ проявляется в сплавах, характеризующихся термоупругим мартенситным превращением, когерентностью решеток исходной аустенитной и мартенситной фаз, а также малыми изменениями объема при превращениях. В никелиде титана объемные изменения составляют около 0,3 %, что на порядок меньше, чем в сталях (около 4 %).

В этих условиях при деформации образуются когерентные с исходной структурой двойниковые мартенситные кристаллы, а при отогреве и обратном превращении эти мартенситные кристаллы исчезают и плавно переходят в решетку исходной фазы. Обратимое движение когерентных

межфазных границ при обратном превращении приводит к восстановлению первоначальной формы.

Схема влияния температуры на фазовый состав сплавов с обратимым мартенситным превращением приведена на **слайде**.

При охлаждении материала из аустенитного состояния мартенсит начинает образовываться с некоторой температуры M_n . При дальнейшем охлаждении количество мартенситной фазы увеличивается, и полное превращение заканчивается при некоторой температуре M_k . Ниже этой температуры термодинамически устойчивой остается только мартенситная фаза.

При нагреве превращение мартенсита в аустенит начинается с некоторой температуры A_n и полностью заканчивается при температуре A_k . При полном термоциклировании получается гистерезисная петля. Размеры этой петли могут быть разными.

Кроме этих температур обычно рассматриваются еще три характеристических температуры: T_0 – температура термодинамического равновесия, M_d – температура, ниже которой мартенсит может возникнуть не только вследствие понижения температуры, но и под действием механического напряжения, A_d – температура, выше которой аустенит может появиться не только под воздействием температуры, но и под действием внешних нагрузжений. Расположение этих температур относительно петли гистерезиса оказывает влияние на поведение материала при термосиловом воздействии. В случае узкого гистерезиса температура M_d может оказаться правее температуры конца аустенитного превращения A_k , а при широком гистерезисе – левее этой температуры.

Тогда для материала с узким гистерезисом наведенный механомартенсит будет термодинамически неустойчивым и при разгрузке он должен исчезнуть. В таких материалах будет наблюдаться эффект сверхупругости.

В случае широкого гистерезиса наведенный механомартенсит будет термодинамически устойчивым и сохраняется при разгрузке. Деформация в этом случае исчезнет только после нагрева, т.е. после завершения реакции мартенсит-аустенит.

Характеристические температуры превращений ряда двойных сплавов никелида титана разного состава приведены на **слайде**.

Таким образом, варьируя соотношение титана и никеля можно существенно менять температуры фазовых переходов и влиять на ширину гистерезиса фазовой диаграммы. В разных сплавах с эффектом памяти формы интервал температур фазовых переходов может находиться в пределах от 4,2 до 1300 К.

Технология производства и свойства сплавов с эффектом памяти формы

Никелид титана в жидком состоянии легко поглощает газы и взаимодействует со многими веществами. Поэтому его выплавка производится в вакууме или атмосфере чистого инертного газа. К слиткам

предъявляются высокие требования по однородности химического состава и чистоте от примесей.

Никелид титана подвергают обработке давлением в интервале температур 700-900 °С. Нагрев до более высоких температур опасен из-за сильного окисления и образования хрупкого газонасыщенного поверхностного слоя.

Особенно важную роль играет технологическая операция термофиксации. Сложность этой операции обусловлена проявлением эффекта памяти формы после придания заготовке из никелида титана требуемой формы. Заготовку деформируют при комнатной температуре. Для сохранения формы и размеров проводят жесткое фиксирование по всем степеням свободы (заневоливание) с последующим нагревом в вакууме до температуры 650-700 °С, т.е. до аустенитного состояния. В результате такой операции достигается стабильное состояние структуры и формы, которые объект «запоминает».

Сплавы на основе никелида титана плохо поддаются механической обработке (особенно те, у которых интервал мартенситного превращения находится вблизи комнатной температуры). В процессе резания происходят структурные изменения в поверхностном слое, приводящие к проявлению эффекта памяти и резкому изменению механических свойств. Для осуществления операции резания необходимо применять специальные твердосплавные резцы и специальные охлаждающие среды.

Промышленностью освоен выпуск сплавов на основе никелида титана. Отечественные марки представлены на **слайде**.

Никелид титана в зависимости от состава и условий деформирования может иметь как однократный, так и многократно обратимый эффект памяти формы. Многократно обратимый эффект проявляется при термоциклировании через интервалы прямого и обратного мартенситного переходов.

Кроме никелида титана широкое применение имеют сплавы с эффектом памяти формы на основе меди, которые в разы дешевле (стоимость медного сплава составляет 10 % от стоимости никелида титана). Основным недостатком этих сплавов является их высокая хрупкость. Сплав никелида титана может деформироваться до разрушения приблизительно на 50 %. Сплавы на основе меди разрушаются после деформации 2-3 %. Этот недостаток чрезвычайно затрудняет обработку давлением сплавов с эффектом памяти формы на основе меди при комнатной температуре. Кроме того, эти сплавы могут менять температуру превращения и свойства в результате старения при температурах ниже эксплуатационных. Сплавы на основе меди характеризуются низким сопротивлением усталости.

Применение сплавов с эффектом памяти формы

Сплавы с эффектом памяти формы относят к так называемым интеллектуальным материалам, позволяющим создавать принципиально новые конструкции и технологии в разных отраслях машиностроения,

авиакосмической и ракетной техники, приборостроения, энергетики, медицины.

1. При освоении космического пространства необходимо создание громоздких сооружений, таких как солнечные батареи и космические антенны. Антенна состоит из листа и стержня из сплава никелида титана, которые свернуты в виде спирали и помещены в углубление в искусственном спутнике. После запуска спутника и выведения его на орбиту антенна нагревается с помощью специального нагревателя или тепла солнечного излучения, в результате чего она выходит в космическое пространство и разворачивается.

2. Строительство громоздких сооружений в космосе и на больших глубинах морских подводных конструкций, где невозможно применить традиционные способы сборки (сварки, пайки, склеивания, клепки и др.). Для этих целей создана в нашей стране уникальная технология соединения элементов в открытом космосе с использованием муфты из сплава ТН-1 (слайд). Преимуществом такого рода муфт помимо их высокой надежности, является отсутствие высокотемпературного нагрева (как при сварке). Поэтому свойства материалов вблизи соединения не ухудшаются. Муфты такого типа применяются для трубопроводов атомных подводных лодок, надводных кораблей, для ремонта трубопроводов для перекачки нефти со дна моря.

3. Для неподвижного соединения деталей обычно используют заклепки и болты. Однако, если невозможно осуществить какие-либо действия на противоположной стороне скрепляемых деталей (например, в герметичной пустотелой конструкции), выполнение операций крепления вызывает трудности. Стопоры из сплава с эффектом памяти формы позволяют в этих случаях осуществить крепление с использованием пространственного восстановления формы. Стопор в исходном состоянии имеет раскрытый торец (слайд). Перед осуществлением операции крепления стопор погружается в сухой лед или жидкий азот и в достаточной степени охлаждается, после чего выпрямляются торцы (слайд). Стопор вводится в отверстие для крепления, при повышении температуры до комнатной происходит восстановление формы, торцы штифта расходятся, и операция крепления завершается (слайд).

4. Сплавы с эффектом памяти формы используют в силовых конструкциях прессов, домкратов, причем особенностью исполнительных элементов из этих сплавов является их миниатюрность. На действие таких исполнительных элементов не влияет среда или атмосфера, а влияет только температура. Следовательно, возможна установка этих элементов в таких средах как вакуум или вода, при этом нет необходимости в герметизированном подвижном узле, как при установке двигателей или гидропневматических цилиндров.

5. Медицина. Свойства никелида титана, позволяющие использовать его в медицинских целях: не подвергается коррозии в биологической среде, обладает большой совместимостью с тканями

человеческого организма, отсутствие токсичности, канцерогенности, высокое сопротивление образованию тромбов, причем с сохранением всех этих свойств длительное время (**слайд**).