

Федеральное агентство по образованию
Волгоградский государственный технический университет
Кафедра «Материаловедение и композиционные материалы»

Материаловедение

**СОСТАВЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО
ПРОЦЕССА НА ПОВЕРХНОСТНОЕ
УПРОЧНЕНИЕ ДЕТАЛЕЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ И
ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

Методические указания к семестровой работе

Волгоград 2009

УДК 621.785

Методические указания к семестровой работе "Составление технологического процесса на поверхностное упрочнение деталей термической и химико-термической обработкой"/ Сост. Л.М.Гуревич;
Волгоград.гос.техн.ун-т. Волгоград, 2009. - 24 с.

Методические указания предназначены для студентов, выполняющих семестровую работу "Составление технологического процесса на поверхностное упрочнение деталей термической и химико-термической обработкой" по дисциплине "Материаловедение". Даны необходимые теоретические пояснения, изложен порядок выполнения работы, дан ряд типовых задач на термическую и химико-термическую обработку деталей.

Библиогр.: 5 назв.

Печатается по решению ред.-издательского совета Волгоградского государственного технического университета.

Рецензент канд. техн. наук, доцент Трудов А.Ф.

© Волгоградский
государственный
технический
университет, 2009

1.Цель работы

1.1.В процессе выполнения работы научиться обоснованному выбору состава стали, обеспечивающей при минимально возможной стоимости необходимую надежность и стойкость в эксплуатации.

1.2.Научиться обоснованному выбору вида термической и химико-термической обработки, назначению режимов обработок, обеспечивающих необходимый ресурс работы детали при минимальной себестоимости и энергоемкости.

2. Порядок выполнения работы

2.1. Студент выполняет семестровую работу по заданию, выданному преподавателем. Варианты заданий могут быть взяты из приведенных в разделе 8 настоящих методических указаний.

2.2. В процессе выполнения работы студенту необходимо:

выбрать вид технологического процесса упрочнения детали и толщину упрочненного слоя, позволяющие получить необходимые прочностные характеристики поверхностного слоя и сердцевины деталей;

выбрать марку стали, обеспечивающую при минимально возможной стоимости необходимую надежность и стойкость в эксплуатации;

выбрать вид заготовки;

рекомендовать вид и режимы предварительной термической обработки, обеспечивающей обрабатываемость резанием;

выбрать последовательность операций термической обработки и рекомендовать режимы их выполнения;

описать превращения в структуре, происходящие при каждой операции термической или химико-термической обработки;

указать микроструктуру сердцевины и упрочненного слоя после различных операций термической обработки;

определить твердость упрочненного поверхностного слоя и механические характеристики готового изделия.

2.3. Результатом выполнения семестровой работы должны явиться заполненная карта технологического процесса термической обработки и пояснительная записка. Пример заполненной карты и пояснительной записки приведен в разделе 7 настоящих методических указаний.

3.Выбор процесса поверхностного упрочнения деталей термической или химико-термической обработкой

3.1. Составление технологического процесса начинается с выбора способа упрочнения, обеспечивающего получение свойств стали, наиболее полно удовлетворяющих условиям эксплуатации. В зависимости от условий работы деталей машин их упрочнение может достигаться закалкой и отпуском, поверхностной закалкой или химико-термической обработкой (цементацией и нитроцементацией с последующей закалкой и низким отпуском, азотированием). При выборе технологического процесса необходимо учитывать как требования, предъявляемые к свойствам поверхности, так и к свойствам сердцевины детали. Зачастую, необходимый уровень свойств может быть получен несколькими видами термического или химико-термического упрочнения. В этом случае следует отдавать предпочтение процессам с наименьшей себестоимостью (трудоемкостью и энергоемкостью). Области применения способов упрочнения и получаемые при их использовании свойства стальных деталей приведены в пунктах 3.2 – 3.5.

3.2. Свойства стальных деталей после закалки и отпуска определяются при оптимальных режимах процесса, в основном, двумя факторами: содержа-

нием углерода в стали и температурой отпуска. Если критический диаметр стали в используемой закалочной среде превышает толщину или диаметр детали, свойства по сечению детали практически не изменяются, поэтому практически невозможно достичь одновременно необходимую износостойкость поверхности, которая обеспечивается высокой твердостью, и усталостную прочность. Закалку с высоким отпуском, позволяющие получить структуру сорбита отпуска, обычно используют как предварительную термическую обработку для улучшения обрабатываемости резанием. Повышение износостойкости поверхности может затем достигаться закалкой ТВЧ или азотированием, не изменяющими структуру сердцевины.

3.3. Поверхностная закалка при индукционном нагреве применяется для деталей машин, испытывающих в работе изгиб, кручение и высокие контактные напряжения, т.е. в тех случаях, когда рабочие напряжения максимальны на поверхности. Чаще закалка при индукционном нагреве применяется для валов машин, коленчатых и распределительных валов двигателей и многих других деталей машин. Индукционная закалка позволяет в зависимости от марки стали (содержания углерода) и предшествующей термической обработки получить твердость поверхности 45...63 HRC и показатели прочности сердцевины $\sigma_b = 700 - 1200$ МПа; $\sigma_t = 500 - 1000$ МПа; $\delta = 16 - 30\%$. Толщина упрочненного слоя обычно не превышает 5 мм, но для высоконагруженных крупногабаритных деталей может достигать 10-15 мм. Поверхностная закалка при индукционном нагреве по сравнению с химико-термической обработкой менее трудоемка и во многих случаях не уступает цементации (нитроцементации) по получаемым свойствам деталей, но предъявляет ряд требований к их конфигурации и размерам, например, закалка ТВЧ затруднена для шестерен с мелким модулем зуба.

3.4. Цементация и нитроцементация применяется для деталей машин, которые должны сопротивляться износу при различных давлениях, обладать высокой прочностью при изгибе, а также высокими значениями сопротивления усталости при изгибе, контактных напряжениях. Цементация и нитроцементация рекомендуется для наиболее нагруженных деталей машин - зубчатые колеса, валы, шпиндели, вал-шестерни, крупногабаритные подшипники качения и др. Цементация и нитроцементация позволяет получить твердость поверхности 58...64 HRC и показатели прочности сердцевины в зависимости от марки стали до $\sigma_b = 1300$ МПа, $\sigma_T = 1200$ МПа, $\delta = 12\%$, $\psi = 55\%$. Толщина упрочненного слоя может достигать до 2,5 мм. Форма деталей практически не влияет на результаты цементации.

3.5. Азотирование применяется для склонных к короблению деталей машин, работающих на износ. Азотирование повышает прочность деталей машин в 5 - 10 раз, предел выносливости при изгибе на 30 - 60% и сопротивление коррозии. Твердость поверхности колеблется в широких пределах HV = 6500...12000 МПа в зависимости от состава стали и режима обработки. Показатели прочности сердцевины соответствуют прочности используемой стали при выбранном режиме предварительной термической обработки (обычно закалка с высоким отпуском) и могут составлять до $\sigma_b = 1100$ МПа, $\sigma_T = 950$ МПа, $\delta = 12\%$, $\psi = 50\%$. Азотирование используют для упрочнения шпинделей, направляющих скольжения и ходовых винтов металлорежущих станков, мало- и средненагруженных зубчатых колес, деталей топливной аппаратуры, клапанов, коленчатых и распределительных валов, гильз цилиндров двигателей, кулачков, копиров и ряда других.

3.6. Кроме закалки ТВЧ, цементации, нитроцементации, азотирования могут использоваться и другие виды поверхностного упрочнения - упрочнение пластическим деформированием, лазерная закалка, газопламенная закалка.

ка, закалка в электролитах, борирование, хромирование, алитирование, силицирование, напыление или наплавление износостойких или коррозионностойких покрытий. Подробная характеристика методов упрочнения приведена в [1,2,3].

4. Разработка технологического процесса поверхностной закалки с индукционным нагревом

4.1. Для поверхностной индукционной закалки применяют стали, содержащие 0,4-0,5%С, которые после закалки имеют высокую твердость (HRC 45...55), сопротивляемость износу и не склонны к хрупкому разрушению. В том случае, если наряду с требованиями к твердости поверхности необходима прочность и вязкость сердцевины, то используют среднелегированные стали типа 40X, 40XH, 40XHM ГОСТ 4543 с повышенной прокаливаемостью, изделия из которых предварительно подвергают улучшению. Выбор степени легированности стали в этом случае производится, исходя из соответствия диаметра (толщины) детали и прокаливаемости стали (таблица 1).

Таблица 4.1. Минимальные критические диаметры некоторых конструкционных сталей при закалке в масле [6]

Марка стали	40	40X	40XH	40XH2MA	38XH3MФА
Критический диаметр до 90% мартенсита, мм	5	6	18	100	150
Критический диаметр до 50% мартенсита, мм	8	16	37	114	

Для получения равномерного закаленного слоя на деталях сложной формы типа шестерни среднего модуля, колец подшипников используют стали пониженной прокаливаемости 55ПП и регламентированной прокаливаемости 47ГТ.

Марочный состав сталей приведен в [1, 4, 5, 6].

4.2. В зависимости от размеров и формы деталей и необходимых свойств заготовкой может служить прокат, поковка, отливка. Отливки позволяют достичь максимального приближения формы и размеров заготовки к конечному изделию, но содержат различные литейные дефекты (пористость, раковины), поэтому их механические свойства не высоки. Прокат (круглый, квадратный, сортовой, листовой, трубы) имеет высокие механические свойства, так как в процессе прокатки «залечиваются» литейные дефекты, но применение проката в качестве заготовок экономически целесообразно только для деталей простой формы, получаемых удалением в стружку относительно небольшого объема металла (ступенчатые валы с небольшим перепадом диаметров, плоские тонкие зубчатые колеса, втулки). Для деталей сложной формы обычно используют высокоплотные поковки или штамповки, приближающиеся по форме к готовой детали.

4.3. Технологический процесс поверхностного упрочнения термической обработкой ТВЧ включает предварительную термическую обработку, обеспечивающую необходимую обрабатываемость резанием и уровень механических свойств сердцевины, и поверхностную индукционную закалку с последующим низким отпуском.

4.4. Предварительная термическая обработка устраняет дефекты микроструктуры, возникшие в процессе кристаллизации или высокотемпературного нагрева при обработке давлением (штамповке, ковке, прокатке). Основными видами предварительной термической обработки, назначаемыми в зависимости от марки стали, вида полуфабриката и требований к прочностным характеристикам сердцевины, являются отжиг, нормализация и закалка с высоким отпуском (улучшение).

Отжиг позволяет получить мелкозернистую равновесную перлито-фер-

ритную структуру с хорошей обрабатываемостью, но низкими прочностными характеристиками. Как правило, прокат или поковки подвергается отжигу на заводе-производителе.

При повышенных требованиях к прочностным характеристикам сердцевин используют нормализацию, обеспечивающую показатели прочности и пластичности несколько ниже, чем при улучшении, но вероятность появления трещин при нормализации в отличие от закалки практически исключена.

Режимы отжига и нормализации, получаемые прочностные характеристики для различных марок сталей приведены в [4, 5, 6].

4.5. Закалка с последующим высоким отпускком (термическое улучшение) создает наилучшее соотношение прочности и вязкости стали, позволяя получить при твердости HB около 2550 МПа следующие показатели прочности $\sigma_B = 1100$ МПа, $\sigma_T = 950$ МПа, $\delta = 12\%$, $\psi = 50\%$.

Температура закалки выбирается для используемой марки стали по данным [4, 5, 6].

Общее время нагрева при предварительной термической обработке складывается из времени нагрева до данной температуры (τ_H) и времени выдержки при этой температуре (τ_B).

Величина τ_H зависит от нагревающей способности среды, от размеров и формы деталей, от их укладки в печи; τ_B зависит от скорости фазовых превращений, которая определяется степенью перегрева выше критической точки и дисперсностью исходной структуры. Практически величина может быть принята равной 1 мин для углеродистых сталей и 2 мин для легированных сталей. Точно установить время нагрева можно лишь опытным путем для данной детали в данных конкретных условиях, а приближенно - способом расчета. Один из возможных расчетов проводится по формуле

$$\tau_H = 0,1 \times D \times K_1 \times K_2 \times K_3,$$

где D - размерная характеристика изделия (минимальный размер максимального поперечного сечения) в мм; K_1 – коэффициент среды (для газа - 2, соли - 1, металла - 0,5); K_2 – коэффициент формы (для шара - 1, цилиндра - 2, параллелепипеда - 2,5, пластины - 4); K_3 - коэффициент равномерности нагрева (всесторонний - 1, односторонний - 4).

Для предохранения изделий от окисления и обезуглероживания в рабочее пространство печи вводят защитную газовую атмосферу (эндотермическую или экзотермическую).

Охлаждающие среды при закалке должны обеспечить скорость охлаждения выше критической скорости закалки в интервале температур аустенитно-перлитного превращения и замедленное охлаждение в интервале температур мартенситного превращения. Чаще для закалки углеродистых сталей используют воду или водные растворы солей, для закалки легированных сталей - минеральные масла или водные растворы полимеров.

Температуру отпуска определяют, исходя из необходимого уровня показателей прочности и марки стали [4, 5, 6]. Длительность высокого отпуска составляет 1 - 6 часов в зависимости от габаритов изделия и марки стали (большая длительность для крупногабаритных деталей из средне-легированных сталей). Для деталей среднего размера из углеродистых сталей время отпуска 1 ч, из легированных сталей – 2ч. Охлаждение после отпуска во избежание отпускной хрупкости II рода у изделий из легированных сталей производится быстро в воде или масле. Структура стали после улучшения – сорбит отпуска.

4.6. Выбор оптимальной толщины упрочненного слоя при индукционной закалке определяется условиями работы детали. Когда изделие работает только на износ или в условиях усталости, толщину закаленного слоя принимают 1,5 - 3 мм; в условиях высоких контактных нагрузок - 4 - 5 мм. В случаях

особо больших контактных нагрузок, например для валков холодной прокатки, толщина закаленного слоя достигает 10 - 15 мм. Для получения слоя толщиной 1 мм оптимальная частота тока составляет 50 - 60 кГц, для слоя толщиной 2 мм - 15 кГц, для слоя толщиной 4 мм - 4 кГц.

В связи с высокими скоростями нагрева превращение перлита в аустенит сдвигается в область высоких температур, что приводит к повышению температуры закалки, по сравнению с определяемой по данным [4, 5, 6] на 100-150°C, но из-за кратковременности нагрева это не приводит к заметному росту зерна аустенита, а затем иглы мартенсита.

Охлаждающую жидкость (воду, водные растворы полимеров) для закалки обычно подают через душевые устройства (спрейеры), но может проводиться и закалка в баке с закалочной жидкостью.

После закалки с индукционным нагревом детали подвергают низкому отпуску при температуре 160 - 200°C в течение 1 ч для углеродистых сталей или 2 ч для легированных сталей, но иногда используют отпуск за счет собственного тепла детали (самоотпуск).

4.7. В графе "Структура после каждой операции термической обработки" приводятся отдельно структура поверхностного слоя (мелкоигольчатый мартенсит) и структура сердцевины (феррит+перлит, если в качестве предварительной термообработки использовалась нормализация, или сорбит отпуска после улучшения).

5. Разработка технологического процесса цементации и нитроцементации

5.1. Выбор марки стали производят исходя из размеров детали и требований к ее прочностным характеристикам. Для изделий небольших размеров, работающих на износ и не требующих высокой усталостной прочности сердцевины, применяют углеродистые стали марок 10, 15, 20 ГОСТ 1050.

Детали малых и средних размеров, работающие при повышенных удельных нагрузках изготавливают из малолегированных хромистых 15Х, 20Х, марганцовистых 15Г, 20Г сталей (ГОСТ 4543). Уровень легирования обеспечивает закалку деталей на глубину до 10-15 мм.

Детали средних размеров, работающие при высоких удельных нагрузках, изготавливаются из сложнолегированных хромоникелевых 12ХН3А, хромомарганцевых 18ХГТ, 25ХГТ, 18ХГМ сталей (ГОСТ 4543). Стали с добавкой титана или молибдена наследственно мелкозернисты. При закалке в масле закалка обеспечивается для деталей на глубину до 15-20 мм.

Детали больших сечений, работающие при высоких удельных нагрузках, изготавливают из высоколегированных хромоникелевых 12Х2Н4А, хромоникельвольфрамовых 18Х2Н4ВА и хромоникельмолибденовых 18Х2Н4МА сталей. Вследствие высокой устойчивости переохлажденного аустенита детали сечением до 150-200 мм из сталей 18Х2Н4ВА и 18Х2Н4МА закаляются при охлаждении на воздухе.

Марочный состав сталей приведен в [1-6].

5.2. В зависимости от размеров и формы деталей заготовкой может служить прокат, поковка, отливка. Выбор типа заготовки аналогичен описанному в пункте 4.2.

5.3. Технологический процесс химико-термической обработки цементованных деталей состоит из предварительной термической обработки, обеспечивающей необходимую обрабатываемость резанием, операции насыщения углеродом до заданной концентрации в поверхностном слое на заданную глубину (собственно цементацию) и окончательной термической обработки, целью которой является создание в изделии необходимого сочетания структуры и свойств.

5.4. Основными видами предварительной термической обработки, назначаемыми в зависимости от марки стали и вида полуфабриката являются отжиг, нормализация и высокий отпуск.

Для низкоуглеродистых нелегированных и низколегированных сталей механические свойства и структура после отжига и нормализации близки. Для среднелегированных сталей типа 25ХГТ, 18ХН3А следует предпочесть изотермический отжиг, так как при нормализации этих сталей возникает более труднообрабатываемая сорбитная структура. Для высоколегированных сталей типа 18Х2Н4ВА используют высокий отпуск при 630-640°С, так как при отжиге эта сталь не снижает твердости.

Режимы отжига, нормализации, высокого отпуска и получаемая твердость приведены в [4 - 6]. Свойства готовых деталей практически не зависят от вида и режимов предварительной термической обработки.

5.5. Собственно цементация может проводиться в твердом карбюризаторе, в газовой эндотермической атмосфере с добавлением природного газа или в газовых продуктах разложения жидкого карбюризатора (керосина, синтина). Преимущества газовой цементации (возможность регулирования содержания углерода в поверхностном слое, меньшая длительность процесса, возможность механизации и автоматизации, более простая окончательная термическая обработка) привели к ее широкому применению на заводах с крупносерийным и массовым производством. Газовую цементацию выполняют при температуре 930-950°С. Продолжительность насыщения определяется температурой процесса и необходимой толщиной слоя (табл. 5.1.).

Толщина цементованного слоя для деталей из стали с содержанием углерода менее 0,17%, составляет до 15% от наименьшей толщины или диаметра цементуемого сечения. При содержании в стали более 0,17%С толщину слоя уменьшают до 5-9%, а для деталей, работающих на износ, не

испытывающих больших удельных нагрузок, до 3-4% от наименьшей толщины или диаметра цементуемого сечения (но не менее величины допустимого износа). Чаще всего толщина цементованного слоя 0,5-2,0 мм.

Таблица 5.1. Средние значения скорости газовой цементации при различных температурах

Глубина слоя, мм	Скорость цементации (мм/ч) при температуре °С			
	900	925	950	975
До 0,5	0,45	0,55	0,75	---
0,5-1,0	0,30	0,40	0,55	0,75
1,0-1,5	0,20	0,30	0,40	0,55
1,5-2,0	0,15	0,20	0,25	0,35
2,0-2,5	0,12	0,15	0,20	0,25

Концентрация углерода в поверхностном слое обычно составляет 0,8-1,0%С. Для шестерней глубина слоя должна составлять 0,125 – 0,175 толщины зуба. Рекомендуемые значения эффективной толщины цементованного слоя до твердости 50 HRC в зубчатых колесах приведены в табл. 5.2. Для обеспечения максимальной прочности на изгиб рекомендуемое содержание углерода на поверхности 0,8 -1,0%, а для колес, работающих в условиях максимальных контактных напряжений концентрация углерода может повышаться до 1,2%.

5.6. Окончательные свойства цементованных изделий достигаются в результате термической обработки, выполняемой после цементации. Этой обработкой можно измельчить зерно сердцевины и цементованного слоя, увеличивающееся во время длительной выдержки при высокой температуре, устранить карбидную сетку в цементованном слое, которая может возник-

нута при насыщении углеродом до заэвтектоидной концентрации, получить высокую твердость цементованного слоя и хорошие механические свойства сердцевины.

Таблица 5.2. Рекомендуемые значения эффективной толщины цементованного слоя до твердости 50 HRC в зубчатых колесах

Модуль зуба, мм	Эффективная толщина цементованного слоя, мм	Отношение модуля к эффективной толщине цементованного слоя
1,5	0,4	0,27
4,0	0,95	0,24
5,0	1,1	0,22
7,0	1,4	0,20
10,0	1,8	0,18

Наиболее простым видом термической обработки является закалка непосредственно из цементационной печи после подстуживания изделия до 840-860°C и отпуск при 180-200°C. Такой способ позволяет уменьшить коробление деталей, не требует дополнительной печи. Способ может быть применим только для наследственно мелкозернистой стали, так как не приводит к измельчению иглы мартенсита.

При использовании наследственно крупнозернистых сталей при газовой цементации детали после насыщения охлаждают до 400-500°C, а затем производят нагрев и закалку при температуре 820-850°C (т.е. полная закалка для упрочненного слоя и неполная закалка сердцевины) и отпуск при температуре 180-200°C. Такой вид обработки позволяет получить мелко-игольчатый мартенсит на поверхности и частично измельчает зерно

сердцевины, получая там для легированных сталей структуру мартенсита и небольшого количества феррита.

При проведении цементации в твердом карбюризаторе иногда используют двойную термическую обработку и отпуск. После охлаждения деталей их снова нагревают в печи до температур 880-900°C (выше A_{C3} для сердцевины) и нормализуют. В результате сердцевина становится мелкозернистой. Температура 880-900°C значительно выше A_{C3} для науглероженной поверхности, поэтому зерно на поверхности вновь может вырасти. Для его измельчения деталь вновь подвергают закалке от температуры 760-780°C. При этом получают структуру мелкоигльчатого мартенсита на поверхности и мелкозернистую сердцевину со структурой неполной закалки (мартенсит+феррит). Недостаток такой термической обработки – сложность технологического процесса, повышение коробления изделий сложной формы, возможность окисления и обезуглероживания.

При закалке высоколегированных сталей типа 18Х2Н4ВА в структуре цементованного слоя сохраняется до 50-60% остаточного аустенита, снижающего твердость. Такие стали после закалки обрабатывают холодом, что способствует переводу большей части остаточного аустенита в мартенсит. Для разложения остаточного аустенита после цементации таких сталей часто применяют высокий отпуск при 630-640°C, после чего следует закалка с пониженной температуры и низкий отпуск.

Время нагрева до температур закалки и время выдержки при отпуске определяется по методике, приведенной в п.4.5. Закалка изделий из сталей 10, 15, 20 производится в воду, из легированных сталей - в масло. Температура закалки приведена в [4 - 6].

5.8. Процесс нитроцементации проводится при температуре 840-860°C в газовой среде из эндотермического газа с добавкой природного газа и

аммиака. Одновременная диффузия углерода и азота ускоряет диффузию углерода. Скорость роста нитроцементованного и цементованного слоя на глубину до 0,5 мм практически одинакова, хотя температура нитроцементации почти на 100°C ниже температуры цементации. Толщина нитроцементованного слоя составляет до 1,2 мм. Для нитроцементации используют те же стали, что и для цементации.

После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи для наследственно мелкозернистых сталей или после повторного нагрева. После закалки проводят отпуск при 160-180°C. Структура нитроцементованного слоя - мелкоигльчатый мартенсит, мелкие карбонитриды и остаточный аустенит. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска 58-64 HRC. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, например шестерни, склонные к короблению.

6. Разработка технологического процесса азотирования

6.1. В том случае, если главным требованием, предъявляемым к азотированному слою, является высокая твердость на поверхности и износостойкость, то применяют сталь 38X2MЮА. Одновременное присутствие алюминия, хрома и молибдена позволяет получить твердость поверхности HV до 12000 МПа.

В связи с тем, что алюминий придает азотированному слою повышенную хрупкость, все шире применяют стали, легированные 1-3% хрома, 0,2-0,4% молибдена, до 1,2% ванадия. Эти стали имеют пониженную твердость на поверхности HV=7000-9000МПа, но позволяют получить большую толщину азотированного слоя. Для повышения коррозионной стойкости можно азотировать и углеродистые стали.

6.2. В зависимости от размеров и формы деталей заготовкой может служить прокат, поковка, отливка. Выбор типа заготовки аналогичен описанному в пункте 4.2.

6.3. Технологический процесс химико-термической обработки азотированных деталей предусматривает предварительную термическую обработку, обеспечивающую как необходимую обрабатываемость резанием, так и прочностные характеристики сердцевины, и насыщение деталей азотом (собственно азотирование).

6.4. Предварительная термическая обработка включает отжиг (нормализацию) проката, производимый на металлургическом заводе-изготовителе и улучшение (закалку и высокий отпуск) стали для получения повышенной прочности и вязкости в сердцевине изделия, производимые на машиностроительном предприятии. Для экономии можно проводить только улучшение на металлургическом заводе-изготовителе. Режимы отжига (нормализации) и свойства материала приведены в [4 - 6].

Выбор температурно-временных режимов закалки производится по методике, приведенной в п.4.5. Закалка осуществляется в масле, так как для азотирования используют среднелегированные стали. Отпуск проводят при температуре 600-675°C, превышающей температуру последующего азотирования и обеспечивающей получение твердости, при которой сталь можно обрабатывать резанием. Структура стали после отпуска - сорбит.

6.5. Азотирование изделий из стали 38Х2МЮА рекомендуется выполнять при 500-520°C. Длительность процесса зависит от требуемой толщины азотированного слоя [1, 4, 5]. Чем выше температура азотирования, тем ниже твердость азотированного слоя и больше его толщина. Снижение твердости связано с коагуляцией нитридов легирующих элементов. Обычно при азотировании желательно иметь слой 0,3-0,6 мм. Процесс азотирования при 500-

520°C в этом случае является продолжительным и составляет 24 – 90 ч. Для ускорения процесса азотирования применяют двухступенчатый процесс: сначала при температуре 500-520°C, а затем при 540-560°C. При двухступенчатом процессе сокращается продолжительность процесса и сохраняется высокая твердость азотированного слоя. Стали, не содержащие алюминий, азотируют при 570°C в течение 6-10 часов, что обеспечивает толщину слоя 0,3 - 0,4 мм и твердость HV=8000 МПа. Охлаждение после азотирования проводят вместе с печью в потоке аммиака во избежание окисления.

Механические свойства в сердцевине готового изделия приведены в [4,5].

6.6. В графе "Структура после каждой операции термической обработки" приводятся отдельно структура поверхностного слоя (дисперсные нитриды легирующих элементов и бронуид) и структура сердцевины, зависящая от вида предварительной термической обработки.

7. Пример выполнения семестровой работы

7.1. Задание: "Предприятие изготавливает роликовые подшипники диаметром 100 мм, работающие в условиях значительных динамических нагрузок. Подберите сталь и режим упрочняющей обработки для изготовления наружного кольца подшипника толщиной 8 мм (заполняется левый верхний угол карты технологического процесса термической обработки (КТП ТО)).

7.2. Для изготовления колец подшипников диаметром 40 - 150 мм, работающих в условиях высоких контактных напряжений и значительных динамических нагрузок используем сталь 18ХГТ ГОСТ 4543, подвергаемую для получения необходимой твердости 61-65 HRC цементации на глубину не менее 15% от толщины детали (1,2 - 2,0 мм) [1]. Сталь 18ХГТ. пред-

назначена для улучшаемых или цементируемых деталей ответственного назначения, от которых требуется повышенная прочность и вязкость сердцевины, а также высокая поверхностная твердость, работающих под действием ударных нагрузок. В ее состав входят 0,17-0,37% Si, 0,8-1,1% Mn, 0,17-0,23% C, 0,03-0,09% Ti, не более 0,3% Cu, 0,3% Ni, 0,035% S, 0,035% P. (Заполняются графы "Марка и состав стали", "Термическая операция", "Контроль после термической обработки. Глубина упрочненного слоя" КТП ТО).

7.3. В качестве заготовки используется прокат (труба), обеспечивающий минимальный расход металла и высокие прочностные характеристики. Для обеспечения обрабатываемости резанием прокат поставляется в отожженном состоянии. Отжиг проводится при температуре 900 - 930°C, твердость HB менее 2170 МПа [4] (заполняются графы "Вид заготовки", "Состояние заготовки", "Твердость" КТП ТО).

7.4. Технологический процесс упрочнения состоит из насыщения углеродом (цементации), закалки и низкого отпуска. Цементация в связи с массовым производством подшипников проводится в газовой атмосфере эндотермического газа с добавкой природного газа в проходных агрегатах

Сталь 18ХГТ содержит титан, обеспечивающий мелкозернистость, поэтому процесс цементации ведут при температурах 940- 960°C, приводящих к высоким скоростям насыщения - при толщине слоя 1,4- 2,0 мм скорость насыщения 0,25 мм/ч (см. табл. 5.1).

При нагреве до температуры цементации при переходе через линию A_{c1} перлит превращается в аустенит, а при дальнейшем нагреве феррит постепенно переходит в аустенит, завершая превращение выше A_{c3} . Структура слоя и сердцевины при температуре насыщения – аустенит. При

Карта технологического процесса термообработки				Марка и состав стали				
Предприятие изготавливает роликовые подшипники диаметром 100 мм, работающие в условиях значительных динамических нагрузок. Подберите сталь и режим упрочняющей обработки для изготовления наружного кольца подшипника толщиной 8 мм.				18ХГТ	0,17-0,37% Si; 0,8-1,1%Mn; 0,17-0,23%C; 0,03-0,09%Ti; ≤0,3%Cu, ≤0,3%Ni, ≤0,035%S, ≤0,035%P, остальное Fe.			
				Вид заготовки	Состояние поставки		Твердость	
				Прокат (труба)	Отожженная, t = 900°C		HB < 2170 МПа	
				Термическая операция				
				Цементация				
Номер операции	Наименование операции	Структура после каждой операции термообработки	Температура операции, °C	Время выдержки, ч	Среда охлаждения	Контроль после термообработки		
						Твёрдость		Глубина слоя
						61...65 HRC		
1	Цементация	Поверхность – перлит + карбиды. Сердцевина – феррит + перлит	940 – 960	7	Эндогаз	Механические свойства сердцевины готового изделия		
2	Закалка	Поверхность – мартенсит + карбиды. Сердцевина – низкоуглеродистый мартенсит+феррит	810 – 830	0,14	Масло	σ _Т = 1300 МПа; σ _в = 1100 МПа; δ=12%; ψ = 60%; KCV = 0,8 МДж/м ²		
3.	Низкий отпуск	Поверхность – отпущенный мартенсит + карбиды. Сердцевина – отпущенный низкоуглеродистый мартенсит +феррит	150 – 170	4 – 5	Эндогаз	Технологический процесс	Ф.И.О.	Группа
						Составил	Иванов А.А.	АТ-212
						Проверил		

средней толщине слоя 1,7 мм время цементации - 7 часов. Содержание углерода в поверхностном слое после окончания насыщения 0,8-1,0%, так как при высоких контактных напряжениях в поверхностном слое подшипника цементитная сетка недопустима. При медленном охлаждения в атмосфере агрегата ниже линии $A_{г3}$ начинает выделяться цементит в поверхностном слое с содержанием углерода свыше 0,8% или феррит в более глубоких слоях при содержании углерода менее 0,8%. При достижении $A_{г1}$ аустенит превращается в перлит. Структура поверхности после охлаждения - перлит (0,8% углерода) или перлит+цементит (0,8-1,0% C), сердцевины - феррит+перлит, так как в стали 0,18% углерода (заполняется строка 1 граф "Наименование операций", "Структура после термической обработки", "Температура операции", "Время выдержки", "Условия охлаждения (среда)" КТП ТО).

7.5. Для гарантированного получения мелкоигльчатого мартенсита детали после цементации охлаждают до температуры ниже 600°C, а затем повторно нагревают под закалку до температуры 810 - 830°C. Закалку для легированной стали 18ХГТ производят в масле. Время нагрева колец толщиной 8 мм $\tau_H = 0,1 \times D \times K_1 \times K_2 \times K_3 = 0,1 \times 8 \times 2 \times 4 \times 1 = 6,4$ мин (расчет времени нагрева кольца ведется как для пластины по методике, приведенной в п.4.5.), время выдержки τ_B для легированных сталей 2 мин. Общее время нагрева - 8,4 мин. Нагрев под закалку проводится в защитной атмосфере. При нагреве до температуры закалки при переходе через линию $A_{с1}$ перлит превращается в аустенит, а при дальнейшем нагреве цементит на поверхности и феррит в более глубоких слоях постепенно переходит в аустенит, завершая превращение выше $A_{с3}$. Структура поверхностного слоя при нагреве под закалку - аустенит или аустенит+карбиды (при неполной закалке), структура сердцевины в зависимости от температуры закалки - аустенит или аустенит+феррит. Структура поверхностного слоя после закалки - мартенсит или мартенсит+карбиды, структура

сердцевины в зависимости от температуры закалки - низкоуглеродистый мартенсит или низкоуглеродистый мартенсит+феррит (заполняется строка 2 графа "Наименование операций", "Структура после каждой операции термической обработки", "Температура операции", "Время выдержки", "Условия охлаждения" КТП ТО).

7.6. После закалки детали подвергаются низкому отпуску при температуре 150-170°C [1]. Учитывая заниженную температуру отпуска, время операции увеличивается до 4-5 часов. Низкий отпуск и охлаждение проводятся в защитной эндотермической атмосфере. При низком отпуске часть растворенного в мартенсите углерода выделяется в виде карбидов, что приводит к уменьшению тетрагональности мартенсита и внутренних напряжений. Структура поверхностного слоя после отпуска - отпущенный мартенсит или отпущенный мартенсит + карбиды, структура сердцевины - низкоуглеродистый отпущенный мартенсит или низкоуглеродистый отпущенный мартенсит и феррит (заполняется строка 3 графа "операций", "Структура после каждой операции термической обработки", "Температура операции", "Время выдержки", "Условия охлаждения" КТП ТО).

7.7.Твердость поверхности 61-65 HRC, сердцевины 30 - 40 HRC [6] (заполняется графа "Контроль после термической обработки. Твердость" КТП ТО).

7.8.Механические свойства в сердцевине готового изделия: - 1300 МПа; $\sigma_B = 1100$ МПа; $\sigma_T = 12\%$; $\delta = 60\%$; KCV = 0,8МДж/м² [6] (заполняется графа "Механические свойства готового изделия" КТП ТО).

8.Варианты заданий семестровых работ

1). Коленчатые валы диаметром 80 мм, работающие при повышенных напряжениях, изготавливают на одном заводе из качественной углеродистой стали, а на другом - из легированной. Укажите сталь, которую следует предпочесть, ее марку и химический состав, рекомендуйте режим термической обработки и сопоставьте

механические свойства в готовом изделии из качественной углеродистой и легированной сталей.

2). Подобрать марку стали для изготовления тяжело нагруженных коленчатых валов двигателей диаметром 60 мм; предел прочности стали должен быть не ниже 750 МПа. Рекомендовать химический состав стали, режим термической обработки, микроструктуру и механические свойства после упрочнения.

3). Ось вагонной тележки диаметром 100 мм, работающей на абразивный износ и изгиб, можно изготовить из стали обыкновенного качества, из углеродистой качественной или легированной стали. Указать марки и химический состав сталей этого класса, применяемых для изготовления осей. Рекомендовать режим термической обработки и сопоставить механические свойства и структуру стали выбранных марок в готовой оси.

4). На заводе изготавливаются коленчатые валы для двигателей внутреннего сгорания диаметром 60 мм. Указать марку стали, ее химический состав и микроструктуру после окончательной термической обработки, обеспечивающие получение следующих свойств: а) предел текучести σ_T не ниже 600 МПа и ударная вязкость 0,6 МДж/м²; б) предел текучести σ_T не ниже 800 МПа и ударная вязкость 0,8 МДж/м²; в) предел текучести σ_T не ниже 250 МПа и относительное удлинение $\delta = 20-22\%$.

5). Для некоторых мощных механизмов изготавливают валы большого диаметра, которые должны обладать высокой прочностью не только в поверхностных слоях, но и в сердцевине. Выберите марку конструкционной легированной стали с содержанием углерода 0,4% для изготовления вала диаметром 100 мм. Предложите технологический процесс ее упрочнения, обеспечивающий твердость на поверхности не менее 50 HRC и предел прочности σ_B не менее 750 МПа на глубине от поверхности 35 мм при структуре сорбита.

6). Коленчатый вал мощного двигателя диаметром 90 мм должен иметь высокую прочность по всему сечению и предел текучести не менее 750 МПа. Выберите марку стали, отвечающую заданным требованиям и рекомендуйте режим упрочнения, обеспечивающий, кроме того, высокую износостойкость шеек.

7). Червяк редуктора диаметром 35 мм должен иметь в сердцевине предел прочности σ_B не менее 600 МПа и высокую износостойкость поверхности. Выберите марку стали и режимы упрочняющей обработки.

8). Цех изготавливает зубчатые колеса диаметром 50 мм из цементируемой стали. Подобрать марку стали, указать химический состав, рекомендовать режимы обработки : а) для зубчатых колес, работающих в условиях обычного износа и удара; б) для зубчатых колес, работающих в условиях обычного износа, удара при повышенных удельных нагрузках.

9). Конические зубчатые колеса диаметром 50 мм в электротележке работают в условиях динамических нагрузок и повышенного износа. По требованию конструктора сталь должна обладать высокой вязкостью в сердцевине. Укажите необходимую марку стали, ее химический состав, рекомендуйте режимы упрочняющей обработки.

10). Палец шарнира диаметром 30 мм работает на изгиб и срез и должен, кроме того, обладать высокой износостойкостью на поверхности и высокой вязкостью в сердцевине. Укажите необходимую марку стали, ее химический состав, рекомендуйте режимы упрочняющей обработки.

11). Заводу поручили изготовление зубчатых колес сложной формы диаметром 500 мм и высотой 100 мм, которые должны обладать твердостью на поверхности не ниже 58 HRC, а в сердцевине пределом прочности σ_B не ниже 400 МПа и ударной вязкостью не ниже 0,5 МДж/м². Подберите марку стали и рекомендуйте режимы термической обработки. Укажите микроструктуру стали в сердцевине и на поверхности.

12). Стаканы цилиндров мощных моторов должны обладать особо высокой износостойкостью на рабочей поверхности и поэтому твердостью $HV=9500...10000$ МПа. Одновременно требуются высокие механические свойства в сердцевине (предел текучести σ_T должен быть не менее 750 МПа). Укажите необходимую марку стали, ее химический состав, рекомендуйте режимы упрочняющей обработки.

13). Завод изготавливает коленчатые валы диаметром 35 мм, сталь в готовом изделии должна иметь предел текучести σ_T не ниже 300 МПа и ударную вязкость не ниже $0,5$ МДж/м². Кроме того вал должен обладать повышенной износостойкостью не по всей поверхности, а только в шейках. Подберите марку стали и рекомендуйте режимы термической обработки. Укажите микроструктуру стали в сердцевине и на поверхности.

14). Поршневые пальцы диаметром 30 мм и длиной 150 мм должны иметь по условиям работы вязкую сердцевину и твердую поверхность, хорошо сопротивляющуюся износу (58...62 HRC). Укажите вид и режимы упрочняющей обработки, если пальцы изготавливаются массовыми партиями: а) из стали марки 20; б) из стали марки 45, в) из стали марки 45ХН.

15). Тракторный завод выпускает большие бортовые шестерни, передающие значительные крутящие моменты. Диаметр шестерни 350 мм, высотой 70 мм, модуль $m=12$ мм. Укажите вид и режимы упрочняющей обработки, марку стали, обеспечивающие получение твердости на поверхности не менее 58 HRC и высокую усталостно-изгибную прочность зуба.

16). Комбинат по производству силикатного кирпича прессует брикет в штампах, состоящих из пластин размером 300x150x12 мм. Пластины, в основном, работают в условиях абразивного износа без значительных изгибающих и сжимающих нагрузок. Подберите марку стали и рекомендуйте режимы

термической обработки. Укажите микроструктуру стали в сердцевине и на поверхности.

17).Предложите сталь и вид упрочнения, которые следует выбрать для изготовления поршневого пальца двигателя внутреннего сгорания диаметром 35мм, если материал детали должен иметь не менее 600 МПа, 40%, твердость 60HRC.

18).Выберите материал и режим упрочнения для изготовления шестерен коробки передач легкового автомобиля, если толщина зуба 6 мм. Твердость в поверхностном слое глубиной 1,5 мм должна быть не ниже 60HRC. Изгибающее усилие в зубе может достигать до 500 МПа.

19).Иглы форсунок жидкого топлива должны иметь очень точные размеры и высокую износостойкость и коррозионную стойкость в потоке топлива, что определяет качество распыла топлива при сжигании. Предложите материал и термообработку для их изготовления?

20).Какой из материалов и в состоянии какой термической обработки можно использовать для изготовления шестерен коробки перемены передач грузовых автомобилей, если необходимо при модуле зуба 5 мм иметь твердость поверхности не менее 57 HRC, а сердцевины 35-45 HRC?

21).Завод металлорежущих станков использовал копиры (кулачки) из стали 45 после закалки ТВЧ, но они имели низкую износостойкость. Предложите материал и вид термической обработки, обеспечивающие повышенный срок службы копиров диаметром до 60мм и толщиной до 40мм.

22).Предложите материал и режимы упрочнения для особонапряженных зубчатых колес металлорежущих станков модулем 4 мм, если изгибающие напряжения в них 500-700 МПа.

23).Коленчатые валы тепловозных двигателей с диаметром шейки 150 -300 мм должны обладать высокой износостойкостью и сопротивлением усталости при

незначительной деформации. Выберите материал и режимы упрочнения, удовлетворяющие этим требованиям.

24). Втулки звеньев гусениц промышленных тракторов должны обеспечивать высокую износостойкость при абразивном износе. Изгибающие напряжения во втулке достигают 400 МПа. Предложите сталь и вид упрочнения для втулок диаметром 70 мм и толщиной стенок 20 мм.

25). Предложите сталь и вид упрочнения для средненагруженных зубчатых колес металлорежущих станков, модуль которых 5 мм, а изгибающие напряжения достигают 450 МПа.

26). Предложите марку стали и технологию упрочнения колец роликового подшипника с наружным диаметром 800 мм и толщиной стенки 40 мм.

27). Шпиндели обрабатывающих центров Ø120 мм ранее изготавливали из стали 45 и подвергали индукционной закалке, но в процессе работы станки требовали частого ремонта из-за повышенного износа шпинделей. Предложите новые марку стали и технологию упрочнения шпинделей, обеспечивающие повышение межремонтного периода в несколько раз.

28). Ходовые винты металлорежущих станков обычно изготавливают из стали 8ХФ и подвергают индукционной закалке до твердости 56-62HRC, что часто приводит к перегреву вершин витка и их выкрашиванию. Предложите новые марку стали и технологию упрочнения, позволяющие повысить срок службы валов, учитывая, что длина ходового винта до 2 м, а диаметр 60-80 мм.

29). Средненагруженные зубчатые колеса металлорежущих станков с внутренним зацеплением изготавливают из стали 25ХГТ и подвергают цементации. Трудности шлифовки поверхностей внутренних зубьев не позволяет достичь требуемой точности зубчатого колеса. Дайте рекомендации по изменению марки стали и технологии упрочнения, обеспечивающих снижение трудоемкости механической обработки и повышения точности зубчатого профиля.

30). Выберите марку стали и технологию упрочнения для плунжеров диаметром 12 мм топливной аппаратуры дизельного двигателя большегрузного автомобиля.

31). Распределительные валы автомобильных двигателей изготавливают из стали 45 и упрочняют шейки и кулачки закалкой при индукционном нагреве. Для тонкостенных валов это может приводить к значительному короблению. Предложите новые марку стали и технологию упрочнения, обеспечивающие высокую износостойкость шеек и кулачков, отсутствие коробления и прочность сердцевины $\sigma_B = 800$ МПа.

32). Какую сталь следует выбрать для изготовления поршневого пальца двигателя внутреннего сгорания диаметром 35 мм, если материал детали должен иметь $\sigma_T \geq 600$ МПа; $\psi \geq 40\%$; $KCV \geq 1$ МДж/м², твердость 60 HRC?

33). Какой материал необходимо использовать для изготовления вала зубчатой передачи диаметром 45 мм, чтобы получить $\sigma_T \geq 600$ МПа; $\psi \geq 30\%$. Какая должна быть термообработка, обеспечивающая требуемые свойства и твердость поверхности шейки вала 48...52 HRC?

34). Предложите сталь и способ упрочнения для изготовления шестерен коробки передач с толщиной зуба 6 мм. Изгибающее усилие в ножке зуба достигает 500 МПа. Твердость в поверхностном слое глубиной 1,5 мм должна быть не ниже 60 HRC?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.А. Материаловедение. - М.: Металлургия, 1990.- 528с.
2. Гуляев А.П. Металловедение.- М.: Металлургия, 1977.- 640с.
3. Материалы в машиностроении. Т. 1 - 5.- М.: Машиностроение, 1969 – 1970с.

4.Термическая обработка в машиностроении. Справочник.- М.: Машиностроение, 1980.-780с.

5.Шмыков А.А. Справочник термиста. - М.:Машиностроение,1961.- 496 с.

6. Марочник сталей и сплавов. Под общ. ред. В.Г. Сорокина. – М.: Машиностроение, 1989. - 640 с.

Составитель: канд.техн.наук, доцент ВолгТУ Гуревич Леонид Моисеевич

Методические указания к семестровой работе "Составление технологического процесса на поверхностное упрочнение деталей термической и химико-термической обработкой".

Редактор

Темплан 2009 г., поз.

Волгоградский государственный технический университет.

400131, Волгоград, просп. Ленина, 28