

ДОНЕЦКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

КАФЕДРА «ФИЗИЧЕСКОЕ МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ»

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО
ТЕХНОЛОГИИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Утверждено
на заседании кафедры
«Физическое материаловедение»
Протокол № 1 от « 31 » 08 2018г.

Донецк – 2018

УДК 669.01 (075.8)

Методические указания к лабораторным работам по технологии термической обработки металлов для студентов, обучающихся по направлению 22.04.01 и 22.03.01 «Материаловедение и технологии материалов» / Н.Т. Егоров – Донецк, ДонНТУ, 2018.

Описаны лабораторные работы по технологии предварительной обработки заготовок для деталей машин и инструментов, окончательной термической обработке с объемным нагревом и с поверхностным нагревом токами высокой частоты, цементации и термической обработке различных видов инструмента. Приведены задания для выполнения индивидуальной экспертизой работы.

Отв. за выпуск

Зав. каф. Н.Т. Егоров

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

В решении задач повышения качества, экономичности, надежности и производительности различных машин и механизмов большая роль принадлежит термической обработке металлов, являющейся важной составной частью общего цикла изготовления деталей машин и инструмента.

При разработке технологии термообработки от инженера-термиста требуются не только глубокие знания теории и практики термической обработки, но и умение самостоятельно выбирать рациональный, наиболее производительный и экономичный технологический процесс с использованием новейших достижений в этой области, механизации и автоматизации, опыта передовых рабочих - новаторов производства.

Разработка технологического процесса начинается с изучения чертежа обрабатываемого изделия и технических условий, которым оно должно удовлетворять, в результате чего определяются основные операции термообработки и рассчитываются или выбираются их параметры - температура и длительность нагрева, охлаждающая среда и др. Рациональность выбранного способа термической обработки должна быть технически и экономически обоснована.

После выбора основных операций термообработки устанавливают перечень подготовительных операций (укладка в приспособления, защита отдельных частей детали от цементации и т.д.), а также отделочных и контрольных операций (мойка, гидropескоструйная очистка, правка, контроль твердости, деформации и др.).

Главным технологическим документом, на основании которого выполняется термическая обработка, является технологическая карта. По форме и содержанию она должна соответствовать ГОСТ 3.1105-11.

Лабораторные работы по технологии термической обработки преследуют цель закрепления теоретических знаний, полученных в институте, приобретения студентами навыков разработки технологического процесса и умения его выполнить, обеспечив получение в стальном изделии требуемых свойств.

2. ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Предварительной термической обработкой называют такую обработку, которая предназначена для улучшения технологических свойств металлов, что имеет большое значение при изготовлении деталей, а также для повышения механических свойств готовых изделий.

Технологические задачи предварительной термической обработки в массовом машиностроении включают улучшение обрабатываемости при резании или при холодной деформации методом листовой или объемной штамповки, устранение дефектов, возникших в результате огневой зачистки, снятие внутренних напряжений в целях повышения точности готовых изделий и пр.

В отраслях машиностроения с единичным или мелкосерийным производством следует еще предусмотреть термическую обработку для предупреждения образования флокенов в крупных поковках, а также для гомогенизации химического состава металла. Особо необходимо отметить значение промежуточной термической обработки спеченных материалов из металлических порошков при изготовлении деталей двойным горячим прессованием или при последующей газостатической или гидростатической обработке. Предварительно подготовив структуру или субструктуру, можно ускорить или замедлить диффузионные процессы насыщения стали при химико-термической обработке, например углеродом, азотом и др.

2.1. Предварительная термическая обработка для улучшения обрабатываемости сплавов резанием

Наиболее трудоемкими операциями изготовления автомобильных деталей являются операции обработки резанием и холодным выдавливанием. Приблизительно такое же соотношение сохраняется и в других отраслях машиностроения. Поэтому проблема улучшения обрабатываемости металлов имеет решающее значение для увеличения производительности труда, особенно в условиях крупносерийного и массового производства.

Обрабатываемость материалов резанием является комплексным понятием, характеризующимся силой и скоростью резания, качеством обработанной поверхности, видом образующейся стружки и др. Все эти факторы зависят от свойств обрабатываемого материала, а следовательно, и от его структуры, созданной при предварительной термической обработке.

Микроструктура является основным фактором, влияющим на обрабатываемость. Можно подбирать новые инструменты, смазывающие и охлаждающие жидкости, однако правильно подобранный режим термообработки, позволяющей получать требуемую структуру, имеет большее значение, чем изменение условий резания. Например, конические муфты и чашки дифференциала заднего моста современных автомобилей часто изготавливают из ковкого чугуна. С целью улучшения его обрабатываемости обычно назначают максимально допустимую твердость, обеспечение которой достигается отжигом или отпуском. Вместе с тем при практически одинаковом уровне твердости структура чугуна может быть различной. Ферритная или перлитная структура металлической матрицы с грубыми карбидными частицами приводит к быстрому изнашиванию инструмента. Значительное количество феррита снижает износостойкость инструмента при работе и повышает склонность к налипанию. Чисто перлитная структура снижает обрабатываемость при резании, а грубые выделения графита способствуют быстрому выкрашиванию и ускорению износа. В этом случае оптимальные свойства должны быть регламентированы только структурными параметрами (формой и размерами графита, величиной карбидов и допустимым количеством феррита).

Подготовка структуры стальных заготовок (отливок, поковок, штамповок, проката) для последующей обработки резанием является трудной

задачей, так как для различных операций резания оптимальна своя структура: для обработки точением наиболее благоприятны сфероидизированные структуры, а для протягивания, сверления, расточки - структура дифференцированного пластинчатого перлита. При этом для хорошей обработки точением на сравнительно малых скоростях лучшей структурой является зернистый перлит, а на станках-автоматах - пластинчатый, так как в этом случае стружка становится ломкой.

При наличии в структуре стали грубых выделений феррита, обладающего высокой пластичностью, усиливается налипание на режущую кромку инструмента, в связи с чем сильно ухудшается качество поверхности, уменьшается теплоотдача, и в итоге снижается скорость резания и стойкость инструмента. Присутствие структурных составляющих с повышенной твердостью, например бейнита, затрудняет процесс резания и приводит к преждевременному выходу из строя инструмента. Все это является следствием неправильно подобранных режимов охлаждения при термообработке.

Значительное повышение обрабатываемости резанием при точении, особенно на скоростных станках-автоматах достигается в результате введения в сталь специальных присадок - свинца, селена, серы и др. в сочетании с рациональным режимом термообработки.

Большие трудности возникают при обработке резанием сложнолегированных, в частности хромоникелевых сталей и специальных сплавов. Все они имеют низкую теплопроводность, некоторые отличаются высокой пластичностью, другие - твердостью и т.д. Все это требует тщательной разработки режимов их предварительной термической обработки.

Рекомендуемые режимы предварительной термической обработки для оптимальной обрабатываемости резанием приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Рекомендуемые режимы предварительной термической обработки для оптимальной обрабатываемости резанием

Заготовки	Марки стали	Рекомендуемая обработка	Особенности структуры
Сортовой прокат, горячекатаный	08кп, 10кп	Без термической обработки	Исходная структура
	20	Нормализация	-
Поковки, штамповые заготовки, горячекатаный сортовой прокат	40, 45, 40Х, 30ХГТ, 40ХН, 25ХГМ, 40Р, 25ХГТ	Нормализация при 880-990°С,* изотермический отжиг	Пластинчатый перлит Частично сфероидизированный перлит
Поковки, штамповые заготовки	12ХН3А, 20Х2Н4А	Нормализация + отпуск 640-680°С	Пластинчатый перлит (сфероидизация перлита меньше 20%)
Штамповые заготовки, горячекатаный сортовой прокат	60С2	Нормализация + отпуск 650-680°С	Частично сфероидизированный перлит
Поковки, горячекатаный сортовой прокат	У8-У12, ШХ15	Маятниковый отжиг в районе А ₁	Зернистый перлит
Холоднокатаная полоса	65Г	Рекристаллизационный отжиг при 670-680°С	Частично сфероидизированный перлит (степень сфероидизации 30)

* Допустимо увеличение, если оно является окончательной термической обработкой

2.2. Предварительная термическая обработка и способность сплавов к холодной пластической деформации (штамповке, калибровке, выдавливанию, волочению и др). Особенности пластической деформации

Особенности пластической деформации при холодной листовой или объемной штамповке и других операциях в условиях двухосного и трехосного напряженных состояний и значительные степени деформации (больше 50%) предъявляют дополнительные требования к состоянию металла. Во-первых, к макроструктуре. Она должна характеризоваться высокой однородностью, отсутствием металлургических дефектов (пористости, рыхлот, расслоений и даже минимальных ликвационных зон), минимальным количеством неметаллических включений, желательной сферической формы. Во-вторых, значительно повышаются требования к однородности микроструктуры. Крайне нежелательны Выделения фаз по границам зерен матричной фазы в виде непрерывной сетки, например висмута в меди или цементитной сетки в сталях.

В остальных деталях решающее значение для улучшения штампуемости имеет сфероидизация цементита. При особо сложной объемной штамповке количество сфероидизированного цементита должно составлять больше 80%. Целесообразно оценивать состояние стали и ее способность к штамповке по величине допустимой осадки без разрушения до 1/4 высоты или по относительному сужению (больше 50%) при одноосном растяжении. Хорошей штампуемостью обладают материалы со структурами, обеспечивающими поперечное сужение (65-70%). Некоторые оптимальные режимы подготовки структуры листового и сортового металла, обеспечивающие хорошую пластичность, приведена в табл. 2.2.

Таблица 2.2

Режимы термической обработки¹ некоторых углеродистых и низколегированных сталей, обеспечивающие оптимальную штампуемость в условиях крупносерийного или массового производства

Марка стали	Режимы термической обработки	Поперечное сужение, % не менее
08кп	Отжиг 860°C, деформация с обжатием (10-30%) и рекристаллизационный отжиг при температуре, °C:	
	600	80
10кп	Отжиг при температуре, °C:	700
	640	83
20кп	Отжиг при температуре, °C:	680
	640	70
10	Отжиг на зернистый цементит при температуре, °C:	75
	660-670	66
20	Отжиг на зернистый цементит при температуре, °C:	740-760
	740-760	72
45	Нормализация при 780°C	72
09Г2С, 15Х	Отжиг при 850-870°C + отжиг на зернистый цементит 680-700°C	60
35Х, 30ХГСА	Ускоренное охлаждение ($v=10-20^{\circ}\text{C}/\text{c}$) с прокатного нагрева до температур 720-760°C	80
12ХНЗА	Закалка с 1150°C в масле и от пуск при 760°C 15 мин, охлаждение на воздухе	74
	Отжиг при 720°C	56
	Отжиг при 720°C, замедленное охлаждение (не более 40°C/c) до 500°C	73

¹Стальной лист шириной 600мм подвергают ТО на машиностроительных заводах

В ряде случаев при обработке изделий методами холодной пластической деформации предъявляются дополнительные требования к структуре поверхностных слоев, наличию на поверхности специальных покрытий (фосфатирование, опыление) и т.д. В этом случае обработка должна включать ряд технологических процессов (предварительная термическая и термомеханическая обработка и др.) с целью создания специальных свойств, структуры в объеме и на поверхности деталей. Например, технологическая схема подготовки высокоуглеродистых сталей к холодной высадке включает 17 операций, среди них отжиг, обезжиривание, фосфатирование, омыление, подкалибровка с обжатием 5-15%.

2.3. Предварительная термическая обработка для повышения точности размеров

В связи с протеканием фазовых и структурных превращений в сплавах при нагреве и охлаждении происходят изменения размеров и формы изделий. Причиной деформации и коробления являются напряжения, возникающие в деталях в процессе упругой и пластической деформации. Они складываются из термических напряжений, возникающих при нагреве и охлаждении деталей фазовых или структурных превращениях, также из напряжений, обусловленных собственной массой деталей, или унаследованных от предыдущих технологических операций (отливки,ковки и др.).

Исходное состояние металла, формируемое предварительной термической обработкой, оказывает значительное влияние на деформацию изделий после окончательной термообработки, особенно при кратковременных нагревах в соляных ваннах, токами высокой или промышленной частоты. Известно, что исходная структура зернистого перлита обеспечивает минимальную деформацию режущего инструмента.

В последние годы широко применяется нормализация или отжиг поковок с использованием тепла ковочного нагрева. Оптимальный режим для большинства конструкционных сталей включает ускоренное охлаждение от температуры конца горячей деформации до $700-500^{\circ}\text{C}$, изотермическую выдержку при температуре $600-680^{\circ}\text{C}$ продолжительностью не более 3 ч, замедленное охлаждение до 400°C и дальнейшее охлаждение на воздухе. Замедленное охлаждение с температур концаковки является нежелательным, особенно для цементуемых сталей, так как способствует коагуляции частиц карбидных и нитридных фаз, получение более крупного зерна и разнотерности усиливает коробление изделий.

Установлено, что достаточно большая и однородная пластическая деформация перед окончательным нагревом приводит к существенному уменьшению изменения размеров изделий, что объясняется созданием сильно развитой субструктуры и изменением в результате этого условий превращения γ - α . Поэтому для деталей, которые можно изготовить, используя достаточно однородную деформацию (например, нормалей, поршневых пальцев и др. на холодновысадочных автоматах), проведение предварительной термической обработки перед окончательной нецелесообразно, так как при этом

увеличиваются необратимые изменения размеров. В остальных случаях должна проводиться предварительная термообработка для снятия внутренних напряжений.

2.4. Подготовка к окончательной термической обработке и повышение свойств готовых изделий

Из теории термической обработки известно, что структурное состояние стали, сформированное предварительной термической обработкой, оказывает сильное влияние на поведение стали при окончательной термообработке изделий. Размер зерна феррито-перлитной структуры, строение феррито-цементитных смесей (пластинчатое или зернистое, степень измельченности) влияют на температурные интервалы превращений при нагреве, условия гомогенизации аустенита, размер его зерна, прокаливаемость и т.д. Следовательно, изменяются структура и свойства металла после закалки с отпуском и других операций окончательной термообработки.

Например, инструментальные стали для режущего и других видов инструментов согласно соответствующим ГОСТам поставляются потребителям со структурой зернистого перлита баллов 1-6. Это позволяет получить после закалки благоприятную структуру, состоящую из очень мелкоигльчатого мартенсита с равномерно рассредоточенными частицами карбидной фазы в виде отдельных зернышек и обеспечивающую высокую твердость, износостойкость, меньшую хрупкость изделий. В этом случае уменьшаются коробление изделий и опасность появления трещин.

Особое значение исходная структура имеет при режимах с кратковременных нагревом. Например, при закалке с нагревом токами высокой частоты деталей из среднеуглеродистых сталей, имеющих крупнозернистую феррито-перлитную структуру, наряду с мартенситом получаются участки со структурой троостита и даже свободного феррита. Это приводит к получению пятнистой твердости поверхности, что недопустимо.

Дополнительное упрочнение металлов после окончательной термообработки может быть достигнуто за счет формирования благоприятной субструктуры во время предварительной термической обработки. Для этого могут быть использованы все известные и применяемые на практике способы деформационно-термического воздействия на повышение механических свойств стали: предварительная термомеханическая обработка, предварительная закалка, предварительное улучшение и т.д.

2.5. Термическая обработка отливок

Цель работы: изучение влияние режима термической обработки на микроструктуру и твердость литой стали.

2.5.1. Структура и свойства отливок, применяемые виды термической обработки

Согласно ГОСТ 977-75 отливки изготавливаются из углеродистых сталей 15Л-55Л, легированных сталей 20ГЛ, 40ХЛ, 35ХГСЛ, 13ХВДСТЛ и других.

После медленного охлаждения отливок литая сталь имеет крупнозернистое строение. При ускоренном охлаждении получается так называемая видманштеттова структура. Характерным признаком этой структуры является ориентированное, направленное расположение пластин феррита (рис. 2.1).

Литая сталь обладает низкими механическими свойствами, главным образом низкой ударной вязкостью. В отливках возникают значительные внутренние напряжения, приводящие к появлению трещин. Кроме этого, отливки могут иметь повышенную твердость, особенно в случае изготовления из легированной стали. Это затрудняет обработку их на металлорежущих станках.

Поэтому все стальные отливки подвергаются термической обработке с целью повышения механических свойств по сравнению с литым состоянием, достигаемого за счет измельчения зерна, снятия внутренних напряжений и обеспечения хорошей обрабатываемости резанием.

Основными видами термической обработки отливок являются полный отжиг, нормализация с высоким отпуском, улучшение (закалка с высоким отпуском).

Температура нагрева при полном отжиге, нормализации и закалке назначается в зависимости от положения верхней критической точки стали и равна $A_{c3} + (30-50)^\circ\text{C}$. Если не требуется полной фазовой перекристаллизации, выполняют неполный отжиг, обеспечивающий снятие напряжений и снижение твердости стали. Температура нагрева при неполном отжиге равна $A_{c1} + (30-50)^\circ\text{C}$.

При отжиге отливки укладываются в несколько рядов (крупные внизу). Скорость нагрева мелких отливок не лимитируется, крупных - не должна превышать $100^\circ/\text{ч}$. Длительность выдержки зависит от марки стали и массы садки и колеблется от 0,2 до 1 ч/т. Отливки охлаждаются с печью до $400-500^\circ\text{C}$, далее - на воздухе. Структура после отжига получается близкой к равновесной, мелкозернистой, металл имеет низкую твердость, свободен от напряжений, хорошо обрабатывается резанием.

Нормализация - более производительная и экономичная операция по сравнению с отжигом. Вследствие более быстрого охлаждения металла (на воздухе) зерно в нормализованной стали мельче, чем в отожженной, твердость и прочность несколько выше. Так как легированные стали при нормализации приобретают повышенную или даже высокую твердость, этому виду термообработки подвергают в основном отливки из углеродистых сталей.

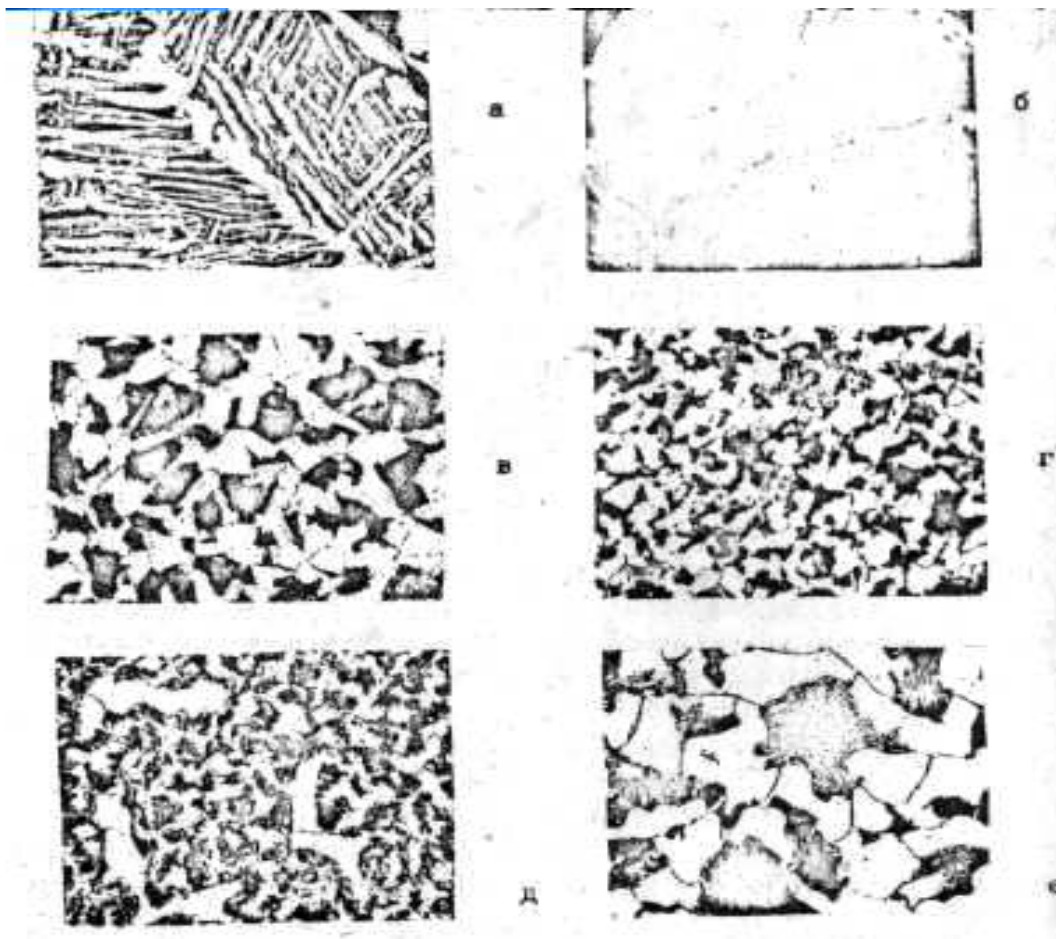


Рис.2.1 Микроструктура доэвтектоидной стали до и после предварительной термообработки, х100: а – видманштеттова структура литой стали; б – крупнозернистая структура литой стали; в – полный отжиг; г – нормализация; д – неполный отжиг; е – перегрев при полном отжиге.

Нормализация с высоким отпуском и улучшение, применяемые чаще для легированных сталей, обеспечивают получение более высоких механических свойств, чем при отжиге. В этом случае сохраняется достаточно хорошая обрабатываемость резанием. Указанные виды обработки используются для более ответственных деталей и часто являются одновременно режимами окончательной термообработки. Учитывая более низкую теплопроводность легированных сталей (и то, что в результате этого при нагреве возникают более сильные внутренние напряжения), скорость их нагрева должна быть меньшей, чем углеродистых сталей. Длительность выдержки по сравнению с углеродистыми увеличивается, так как легирующие элементы тормозят происходящие при нагреве процессы.

Режимы нагрева некоторых сталей при нормализации с высоким отпуском и при улучшении показаны в табл. 2.4.

Таблица 2.4

Температуры нагрева при нормализации с отпуском и улучшении

Марка стали	Температура, °С			
	Нормализация	Отпуск	Закалка	Отпуск
35Л, 40Л	860-880	600-650	860-880	600-650
40ХЛ	-	-	-	-
20ГСЛ	870-890	570-600	-	-
20МЛ	900-920	650-670	880-920	620-640

2.5.2. Методика выполнения работы

Влияние термической обработки на структуру и твердость изучают на образцах из литой стали 25Л-40Л размером 10x15x15мм. Прежде всего маркируют образцы и в дальнейшем фиксируют какой образец какому виду термообработки подвергался.

Изучают микроструктуру образцов в литом состоянии и измеряют твердость по шкале А. Роквелла.

Затем образцы подвергают отжигу, нормализации или улучшению. Температуру нагрева определяют относительно критических точек, положение которых находят в справочной литературе.

Образцы загружают в печь, нагретую до заданной температуры. Время нагрева определяют из расчета 1 мин на 1 мм толщины образца, выдержка должна составлять примерно 1/5 времени нагрева. Скорость охлаждения зависит от выполняемого режима (вместе с печью до 500°C, на воздухе или в воде). Закаленный образец подвергают высокому отпуску при температуре 650 ±10°C.

После термической обработки измеряют твердость образцов по НРА, изготавливают микрошлифы и изучают структуру металла.

Травление микрошлифов производят в 4-процентном растворе азотной кислоты в спирте. Микроструктуру изучают с помощью оптического микроскопа при увеличениях в 100 и 500 раз.

2.5.3. Содержание отчета

Цель работы.

Основные положения технологии термообработки отливок.

Химический состав изучаемой стали по ГОСТ 977-75, положение критических точек, технологические свойства, применение, рекомендуемая термообработка.

Применяемые режимы термообработки, полученная твердость и микроструктура (табл. 2.5).

Таблица 2.5

Влияние термообработки на микроструктуру и твердость образцов из стали

Режим термообработки	Температура нагрева, °С	Способ охлаждения	Твердость, НРА	Микроструктура
Без термообработки (в литом состоянии)				
Отжиг				
Нормализация				

Зарисовки микроструктур.

Обсуждение полученных данных.

Выводы о влиянии термической обработки на структуру и твердость литой стали.

3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Цель работы: изучение влияния режима окончательной термической обработки на структуру и свойства стали, приобретение навыков разработки технологического процесса термообработки для получения в деталях требуемых свойств и его выполнения.

Наиболее распространенными видами окончательной термической обработки деталей машин являются объемная закалка с последующим отпуском, химико-термическая обработка, термическая обработка с нагревом т.в.ч.

Окончательная термообработка имеет целью придать деталям свойства, требующиеся по условиям эксплуатации. После нее выполняются, если требуется, шлифовка, полировка или другие операции для получения точных размеров, затем детали направляются на сборку. От того, насколько грамотно и качественно выполнена термическая обработка (наряду с выбором материала и конструктивными особенностями) зависит надежность и долговечность детали и всей машины в целом.

3.1. Термообработка деталей машин с объемной закалкой

Большинство деталей машин, работающих при динамических нагрузках, изготавливают из улучшаемых сталей: углеродистых с содержанием углерода от 0,35 до 0,55% и легированных среднеуглеродистых 35Х-55Х, 40ХН, 40ХНМА, 30ХГС, 38ХС, 34ХНЗМ и других.

Улучшению, сочетающему закалку с последующим высоким отпуском, подвергается обширная номенклатура изделий: полуоси, валы, штоки, муфты, рычаги, многие виды шестерен, крепежные детали и т.д. Такие детали должны обладать высоким комплексом механических свойств: повышенной прочностью, сопротивлением усталости, высокими пластичностью и вязкостью. Твердость после улучшения обычно находится в пределах НВ22Q-350.

Если по условиям эксплуатации требуются более высокие износостойкость, твердость и прочность, выполняется средний и низкий отпуск. При этом детали могут изготавливаться из эвтектоидных и заэвтектоидных инструментальных сталей (У7, У8, ШХ15) и даже из быстрорежущих, например детали топливной аппаратуры трактора.

Температура нагрева под закалку зависит от положения критических точек стали (назначается на 20-30°С выше точки Ас3 для доэвтектоидной и точки Ас1 для заэвтектоидной стали), а выдержка - от толщины сечения детали. Углеродистые стали охлаждаются в воде, легированные - в масле, при этом закалочную среду необходимо энергично перемешивать.

Из всех сред, обеспечивающих скорость охлаждения выше критической скорости закалки, выбирается самая мягкая во избежание появления трещин и чрезмерного коробления деталей. Для получения точной формы изделий применяют различные виды закалки, охлаждение в штампах и т.д.

Температуру отпуска для получения требуемых свойств определяют по кривым отпуска (свойства - температура отпуска). Длительность высокого отпуска обычно на 30-50%, а низкого на 50-100% превышает время нагрева под закалку при той же массе садки.

Нагрев под закалку должен производиться в защитной атмосфере для предохранения деталей от окисления и обезуглероживания. По опыту завода ЗИЛ количество подаваемого в печь в течение часа эндогаза равно пятикратному рабочему объему печи.

Высокий отпуск деталей производится либо без применения защитных атмосфер, либо в среде экзогаза.

Средний и низкий отпуск выполняют в обычной воздушной среде, желательно с ее принудительной циркуляцией, что обеспечивает более быстрый и равномерный прогрев.

При разработке технологического процесса нужно предусмотреть выполнение всех необходимых вспомогательных операций (мойка деталей, гидropескоструйная очистка, дробеструйный наклеп, правка). В технологическую карту заносятся также виды контроля и процент отбираемых для контроля деталей.

Типовые режимы термической обработки деталей некоторых машин приведены в табл. 3.1.

Пружины, рессоры и другие пружинящие детали широко применяются в различных машинах и приборах. Стали и сплавы, предназначенные для их изготовления, должны обладать высокими пределом упругости, релаксационной стойкостью, усталостной прочностью для длительной работы при многократных знакопеременных нагрузках, достаточной вязкостью во избежание поломок. Предел текучести после окончательной термической обработки должен превышать 800 Н/мм^2 для углеродистых и 1000 Н/мм^2 для легированных сталей. При этом относительное удлинение при испытании пятикратных образцов должно составлять более 5%, относительное сужение поперечного сечения - более 20%. Твердость пружин и рессор в зависимости от марки стали находится в пределах НРС 37-49. В ряде случаев пружинные стали должны быть коррозионно- или теплоустойчивыми, немагнитными, с низкой или высокой теплопроводностью и т.д.

Используется две группы пружинных сталей: общего (ГОСТ 14959-79) и специального назначения (ГОСТ 5632-72). К первой группе, относятся, например, стали 65-85, 65Г, 55С2А, 50ХГ, 50ХФА, 60С2Н2А, ко второй - 20Х13, 40Х13, 14Х17Н2, 12Х18Н9Т, 08Х18Н10Т, 09Х15Н810.

Углеродистые стали для пружин и рессор марок 65-85 имеют пониженный предел упругости и невысокую релаксационную стойкость.

Таблица 3.1

Типовые режимы термической обработки деталей

Детали	Сталь	Зкалка		Отпуск		Твердость, НВ(НРС)
		Темпера- тура, °С	Охлаждаю- щая среда	Темпера- тура, °С	Охлаждаю- щая среда	
Врубовая машина						
Зубчатое колесо	40ХН	820-840	Масло	600-650	Масло	230-260
Сегмент	45	820-840	Вода	250-270	Воздух	(40-45)
Сухарь	ШХ15	820-840	Масло	180-200	Воздух	(55-60)
Брус бара	45	820-840	Вода	650-680	Воздух	(197-229)
Утюг бара	45	820-840	Вода	200-220	Воздух	(50-55)
Стопор	40ХН	820-840	Масло	250-270	Масло	(40-45)
Кулак	35ХНЛ	840-860	Масло	480-500	Масло	(285-307)
Шестерня ($z=20, m=7$)	45	820-840	Вода	250-270	Воздух	(40-45)
Проходческая лебедка						
Пальцы	45	840-860	Вода	250-270	Воздух	(40-45)
Вал червячного колеса	40Х	850-870	Масло	220-260	Масло	(40-45)
Захват	45	840-860	Вода	600-650	Воздух	(217-241)
Серьга	45	840-860	Вода	620-650	Воздух	(217-241)
Ось	40Х	850-870	Масло	620-650	Масло	(241-276)
Металлорежущие станки						
Шестерни, работающие при больших скоростях и больших усилиях при отсутствии динамических нагрузок	40Х, 35ХМА	820-840	Масло	180-220	Воздух	(45-50)
Шестерни крупные тяжелых станков	45Г2, 50Г2	820-840	Масло	580-600	Масло	(245-282)
Шпиндели малонагружен- ные небольшого сечения, установленные в подшипниках качения	45, 50	820-840	Вода	520-550	Масло	(220-250)
Червяки, работающие при средних нагрузках	40Х	820-840	Масло	600-650	Вода	(230-260)
Цанги	9ХС	840-870	Масло	230-260	Воздух	(55-62)
Ролики, копиры	ШХ15	835-850	Масло	200-220	Воздух	(59-63)
Крепежные детали						
Болт	40ХС	860-880	Масло	560-600	Вода	(231-269)
Болт	18Х2Н4 МА	860-890	Масло	170-200	Воздух	(300-444)
Гайка	45	810-830	Вода	530-570	Воздух	(24-30)
Гайка	40ХН	790-810	Масло	540-560	Масло	(27-32)
Винт	40Х	840-860	Масло	590-630	Вода	(241-285)

По свойствам в состоянии поставки их делят на две группы: предварительно подготовленную (патентированную) и отожженную. Пружины из патентированной проволоки подвергаются только низкотемпературному (около 300°) отпуску для снятия напряжений, возникающих при навивке нахолодно.

Пружины из отожженной стали (диаметр проволоки до 6 мм) после навивки подвергаются закалке в масле и среднему отпуску.

Легированные стали являются предпочтительными для изготовления пружин и рессор, так как обеспечивают высокие упругость, прокаливаемость, вязкость, сопротивление хрупкому разрушению и релаксационную стойкость, а также возможность их закалки в масле и даже на воздухе.

Рекомендуемые режимы термической обработки пружин и рессор представлены в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Рекомендуемые режимы термообработки пружин и рессор

Сталь	Температура навивки, °С	Закалка		Температура отпуска, °С	Твердость, НВ
		Температура нагрева, °С	Охлаждающая среда		
Пружины					
50С2, 55С2	850-900	830-860	Вода, масло	420-450	431-455
60С2	850-950	850-870	Масло	430-460	388-477
50ХФА	-	860-870	Масло	420-450	388-477
60С2ХФА	850-900	850-860	Масло	410-420	400-450
Рессоры					
50ХГ	-	840-860	Масло	420-470	387-418
60С2А	-	850-870	Масло	460-480	387-418
50ХФА	-	860-880	Масло	400-450	387-418

Вместо закалки с отпуском пружинно-рессорные стали могут подвергаться изотермической закалке с выдержкой при 280-350°С.

Для повышения эксплуатационных свойств рессор и пружин металл для их изготовления целесообразно подвергать предварительной термомеханической обработке в процессе прокатки.

Срок службы пружинящих деталей резко снижается при наличии обезуглероженного слоя и дефектов поверхности, служащих концентраторами напряжений. Предел выносливости пружин и рессор значительно повышается после дробеструйной или гидроабразивной обработки, создающей наклеп на глубину 1-1,5 мм и улучшающей состояние поверхности изделий.

3.2. Методика выполнения работы

Студенты получают образцы одной из марок конструкционных углеродистых или легированных сталей им сообщается, какое изделие изготовлено из данной стали.

По справочной литературе находят химический состав стали, положение критических точек, диаграмму изотермического распада, механические свойства в состоянии поставки с указанием вида обработки, технологические свойства, области применения, рекомендуемые режимы окончательной термической обработки и механические свойства после нее.

Зная условия службы и предъявляемые к детали требования, студенты разрабатывают технологический процесс термообработки и оформляют его в виде технологической карты согласно ГОСТ 3.1405-74. После проверки разработок преподавателем студенты на образцах выполняют основные операции термической обработки: изучают микроструктуру и измеряют твердость образцов в исходном состоянии, после закалки и отпуска. Если твердость образцов отличается от заданной, режим корректируют, термообработку повторяют.

3.3. Содержание отчета:

Цель работы.

Краткие сведения о назначении окончательной термической обработки деталей, применяемых видах и режимах ее.

Характеристика изучаемой стали и условий службы заданной детали. Методика выполнения работы.

Технологическая карта термической обработки детали.

Свойства и микроструктура стали до и после каждой операции термообработки.

Обсуждение полученных результатов.

4. ПОВЕРХНОСТНАЯ ЗАКАЛКА С НАГРЕВОМ ТОКАМИ ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЫ

Цель работы: изучение технологии закалки токами высокой частоты (ТВЧ), микроструктуры поверхностно закаленных деталей и распределения твердости по сечению детали.

4.1. Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ

Многие детали машин работают на истирание, испытывая одновременно ударные воздействия. В этих условиях деталь должна иметь высокую твердость поверхности при вязкой сердцевине. Для получения таких свойств широкое распространение в промышленности получила поверхностная закалка с нагревом токами высокой частоты (закалка ТВЧ).

Индукционный нагрев основан на использовании поверхностного эффекта (рис. 4.1). При прохождении переменного тока по проводнику - медному индуктору 1 - вокруг него образуется переменное магнитное поле, силовые линии которого 3 пронизывают деталь 2. В детали индуктируются вихревые токи, вследствие чего и происходит ее разогрев.

На рис. 4.2 показаны закаливаемая деталь 1, многовитковый индуктор 2, спрейер 3.

Для получения закаленных слоев толщиной до 2-3 мм используют ламповые генераторы, вырабатывающие ток частотой 50-100 тыс. Гц, а при большей глубине - машинные генераторы (2-10 тыс. Гц).

Распределение температур по сечению деталей при нагреве ТВЧ более благоприятное по сравнению с нагревом в среде, имеющей высокую температуру: при правильных режимах отсутствует перегрев поверхности (рис. 4.3, а).

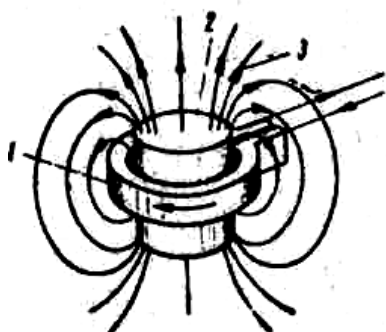


Рис. 4.1. Схема индукционного нагрева

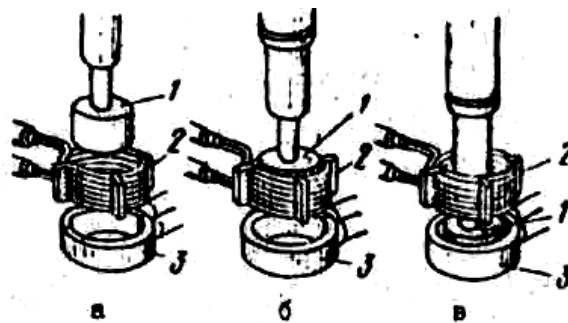


Рис.4.2. Закалка цилиндрической детали с нагревом ТВЧ:
а - положение до нагрева;
б - нагрев;
в – охлаждение

Вследствие высоких скоростей нагрева ТВЧ (время нагрева измеряется секундами) фазовые превращения смещаются в область более высоких температур. Поэтому температура высокочастотной закалки обычно выше, чем при печном нагреве. Например, температура закалки стали 40 при печном нагреве равна 830-860°С, а при индукционном нагреве со скоростью 250°С/с и 400°С/с соответственно 880-920°С и 930-980°С.

Строение закаленного ТВЧ слоя соответствует распределению температур по сечению изделия при нагреве (рис. 4.3,а): у самой поверхности, там, где температура превышала A_{c3} , располагается зона полной закалки 1 со структурой мартенсита и остаточного аустенита, далее - зона неполной закалки 2 и незакаленная сердцевина 3.

При правильных режимах нагрева ТВЧ образуется мелкоигльчатый или бесструктурный мартенсит, так как, несмотря на значительный перегрев, вследствие кратковременности нагрева и уменьшения критического размера зародыша зерно аустенита получается очень мелким.

Отсутствие выдержки при нагреве ТВЧ ухудшает условия гомогенизации аустенита. Поэтому мартенсит получается неоднородным по содержанию углерода, а там, где при нагреве получились участки низкоуглеродистого аустенита, во время охлаждения может произойти его распад с образованием троостита и даже феррита. Таким образом, структура поверхностно закаленного слоя отличается неоднородностью по сравнению со структурой после объемной закалки.

Соответственно микроструктуре изменяется по сечению детали твердость (рис. 4.3,б). Твердость поверхности получается на 2-3 единицы выше, чем при объемной закалке стали с тем же содержанием углерода (явление «сверхтвердости»).

От обычного распределения твердости (сплошная линия) могут наблюдаться следующие отклонения:

- 1 - постепенное снижение твердости к поверхности, что объясняется повышением количества остаточного аустенита при перегреве;

- 2 - резкое снижение твердости, обусловленное наличием обезуглероженного слоя;
- 3 - повышенная твердость сердцевины, снижение твердости в слое, нагревавшемся до температур примерно от 650°C до A_{c1} . Наблюдается, если изделие перед закалкой ТВЧ подвергалось улучшению.

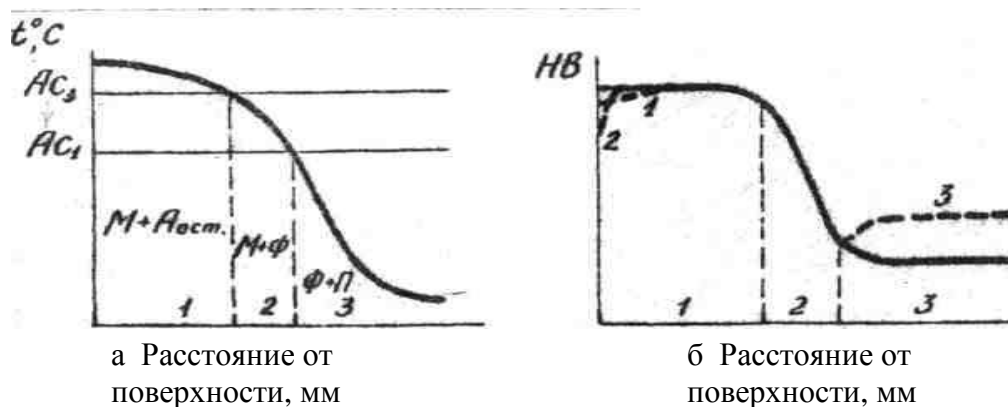


Рис. 4.3. Распределение температур, микроструктура (а) и твердость (б) по сечению детали при закалке с нагревом ТВЧ

Детали, подлежащие закалке с индукционным нагревом, изготавливаются из среднеуглеродистых сталей, чаще марок 40, 45. Легированные стали обычно не применяются, так как не используются их основное преимущество - более глубокая прокаливаемость. Поверхностной закалке подвергаются также инструмент, изготовленный из сталей У7-У12, валки холодной прокатки из стали 9ХС и другие изделия.

После поверхностной закалки производят низкий отпуск для снятия внутренних напряжений и сохранения высокой твердости порядка НРС 54-60.

Применяется отпуск трех видов: печной, самоотпуск и электроотпуск (кратковременный нагрев в том же индукторе, где производилась закалка). Для получения одинаковых результатов температура самоотпуска и электроотпуска должна быть выше температуры печного отпуска (около 300°C вместо 160-200°C).

Поверхностная закалка с нагревом ТВЧ повышает твердость, износостойкость, предел выносливости изделий и во многих случаях успешно заменяет цементацию. Кроме резкого сокращения цикла и большей экономичности, закалка ТВЧ имеет еще такие преимущества: значительно меньшую деформацию изделий, так как нагревается тонкий слой, отсутствие окисления и обезуглероживания, возможность механизации и автоматизации процесса, незначительное тепло- и газовыделение, возможность установки оборудования и выполнения термообработки в потоке механических цехов.

Однако по сравнению с цементацией закалка ТВЧ имеет некоторые недостатки. Закаленный и отпущенный поверхностный слой в деталях из среднеуглеродистой стали имеют меньшую твердость (нижняя допустимая граница для стали 40 НРС 40-52, для стали 45 НРС 45-64), чем после цементации, в процессе которой происходит насыщение поверхности углеродом до 0,8-1,2%. Твердость готовых цементованных изделий чаще всего достигает НРС 58-62.

Износостойкость и контактная прочность цементованных изделий также несколько выше. Закалке ТВЧ подвергают только изделия простой, а цементации - любой формы.

Оценка достоинств и недостатков индукционной закалки по сравнению с цементацией показала целесообразность параллельного использования обоих процессов, причем цементацию и другие виды химико-термической обработки необходимо применять для наиболее ответственных тяжело нагруженных деталей.

Недостатками заделки с нагревом ТВЧ являются также сложность и высокая стоимость оборудования, необходимость изготовления для каждой детали собственного индуктора, повторяющего ее форму (зазор между индуктором и деталью составляют 2-3 мм). Поэтому закалка с индукционным нагревом рентабельна только в условиях массового производства однотипных деталей.

4.2. Материал и методика выполнения работы

Работу выполняют на образцах из сталей 40 или 45, закаленных с нагревом ТВЧ.

Изучают и зарисовывают макроструктуру образцов. Закаленная зона выявляется на макрошлифе в виде темной каемки. По ее ширине примерно определяют глубину закаленного слоя.

Изучают микроструктуру образцов от поверхности к сердцевине, описывают и зарисовывают структуру зоны полной закалки, зоны неполной закалки и сердцевины. Определяют вид обработки до закалки ТВЧ, примерное содержание углерода в стали. Под микроскопом точно определяют глубину закаленной зоны (обычно за глубину принимают расстояние от поверхности до полумартенситной зоны).

На приборе Роквелла измеряют твердость поверхности и сердцевины, а также твердость или микротвердость на различных расстояниях от поверхности. По полученным данным строят кривую "твердость - расстояние от поверхности".

4.3. Содержание отчета

Цель работы.

Назначение поверхностной закалки, принцип и особенности индукционного нагрева.

Строение и свойства закаленного слоя, достоинства и недостатки по сравнению с химико-термической обработкой, области применения.

Описание исследуемого образца, указание содержания углерода в стали, вида предварительной обработки.

Описание и зарисовка макроструктуры закаленных ТВЧ образцов.

Описание и зарисовка микроструктуры поверхности, переходной зоны и сердцевины.

Распределение твердости по сечению образца.

Выводы о глубине закаленного слоя, структуре и свойствах металла.

5. ЦЕМЕНТАЦИЯ СТАЛИ

Цель работы: изучение технологии цементации и последующей термообработки цементованных деталей, Их микроструктуры и твердости в поверхностном слое и сердцевине.

5.1. Процесс цементации

Одним из наиболее распространенных видов химико-термической обработки является цементация.

Цель цементации - получение в сочетании с последующей термообработкой твердой износостойкой поверхности при сохранении вязкой и пластичной сердцевины. Такие свойства требуются, если деталь работает при динамических нагрузках с одновременным истиранием поверхности.

Цементации подвергают детали из углеродистых и низколегированных сталей с содержанием углерода 0,12-0,30% (Ст3, 20, 15Х, 18ХГТ, 25ХГМ, 30ХГТ, 12Х2НЧА, 18Х2НЧВА и др.) после механической обработки с припуском на шлифование 0,05-0,10 мм или без него. Участки, не подлежащие упрочнению, защищают тонким слоем меди или покрывают специальными обмазками. В индивидуальном и мелкосерийном производстве на участках, не подлежащих цементации, оставляют припуск, толщина которого в 1,5-2 раза превышает глубину цементованного слоя, а затем удаляют его путем обработки резанием.

Наибольшее распространение в промышленности получила цементация в твердом карбюризаторе и газовая. Науглероживающим веществом в первом случае является твердый карбюризатор, в состав которого входит древесный уголь с добавками от 20 до 25% от массы угля солей BaCO_3 , CaCO_3 , Na_2CO_3 , K_2CO_3 , ускоряющих процесс насыщения.

Детали укладывают в ящик из жаростойкого чугуна или низкоуглеродистой стали и засыпают карбюризатором. Расстояние между деталями, стенкой ящика и деталью должно быть равно 20-30 мм. Карбюризатор слегка утрамбовывают, ящик изолируют от атмосферы, закрывая крышкой и замазывая щели огнеупорной глиной. Последний помещают в печь, подогретую до 600°C , и нагревают до температуры цементации ($910-930^\circ\text{C}$). Время цементации ориентировочно устанавливают из расчета 0,1 мм глубины насыщения за 1 ч. После цементации ящики охлаждают на воздухе до $400-500^\circ\text{C}$ и затем распаковывают.

Газовую цементацию осуществляют путем нагрева деталей в газовой среде, содержащей соединения углерода: природный газ, светильный газ, продукты гидролиза керосина, бензола и др. Основной составляющей этих газов является метан CH_4 . Для обеспечения требуемой активности среды в печь подается эндогаз. Слой глубиной 1 мм получается за 7 часов.

Газовая цементация имеет ряд преимуществ: высокую производительность за счет сокращения длительности процесса (отпадает необходимость прогрева ящиков, наполненных малотеплопроводным карбюризатором); удобство регулирования и контроля толщины цементован-

ного слоя и содержания в нем углерода; возможность осуществления полной механизации и автоматизации процесса; значительное упрощение последующей термической обработки деталей, так как создается возможность применения непосредственной закалки.

Газовую цементацию в серийном и массовом производстве проводят в шахтных муфельных печах, камерных печах с герметизированной форкамерой и безмуфельных печах непрерывного действия. Во единичном и мелкосерийном производстве часто экономически более эффективно применять цементацию в твердом карбюризаторе.

Структура цементованного слоя после медленного охлаждения от температуры цементации показана на рис. 5.1. Поверхностная зона 1 - заэвтектоидная, содержит углерода, больше 0,8%. Ее структура состоит из перлита и вторичного цементита. Цементацию рекомендуется вести так, чтобы содержание углерода в этой зоне не превышало 1,0-1,1%. Более высокое содержание углерода сообщает слою повышенную хрупкость. Затем следует эвтектоидная зона 2 с содержанием углерода около 0,8% и, наконец, доэвтектоидная зона 3, содержащая углерода менее 0,8%. Последняя зона плавно переходит в структуру сердцевины.

За толщину цементованного слоя принимают расстояние от поверхности до половины доэвтектоидной зоны или глубину распространения контрольной твердости (НРС 50) после термообработки.

5.2. Термическая обработка после цементации

Окончательные свойства цементованных изделий достигаются в результате термической обработки после цементации, целью которой является: получение высокой твердости цементованного слоя, измельчение зерна сердцевины и цементованного слоя, неизбежно перегреваемых в процессе продолжительной выдержки при высокой температуре цементации; устранение карбидной сетки, которая может образовываться при медленном охлаждении и пересыщении слоя углеродом.

Поскольку готовые цементованные детали должны иметь высокую твердость, термообработка после цементации состоит в закалке и низком отпуске. Закалка сопряжена с определенными трудностями, связанными с тем, что высокоуглеродистая поверхность и низкоуглеродистая сердцевина требуют различных температур нагрева под закалку (соответственно на 20~30°C выше A_{c1} и выше A_{c3}).

Чаще всего при термообработке цементованных изделий применяется двойная, одинарная или непосредственная закалка.

Двойная закалка (рис. 5.2,в). Первая закалка преследует цель измельчить зерно сердцевины, поэтому температуру нагрева назначают выше A_{c0} соответственно исходному содержанию углерода в стали (обычно 920-950°C). При таком нагреве растворяется также цементитная сетка в поверхностном слое.

Охлаждение производится в масле или на воздухе (нормализация), поскольку первая закалка еще не формирует окончательных свойств изделия.

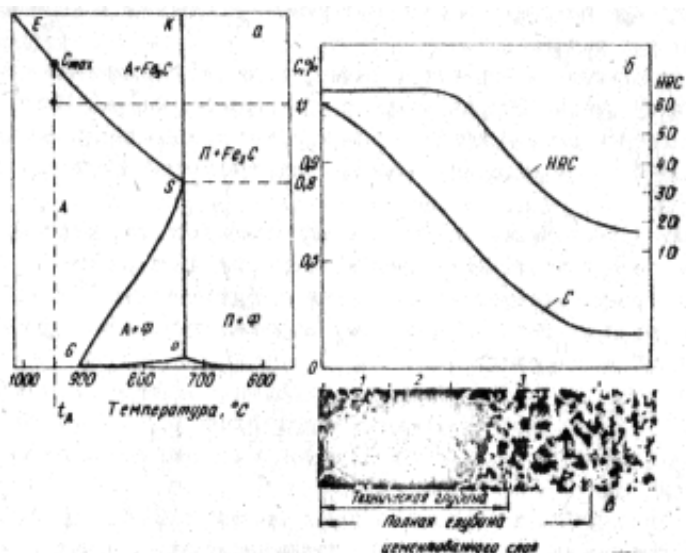


Рис. 5.1 Содержание углерода, микроструктура после медленного охлаждения и твердость после закалки по глубине цементованного слоя

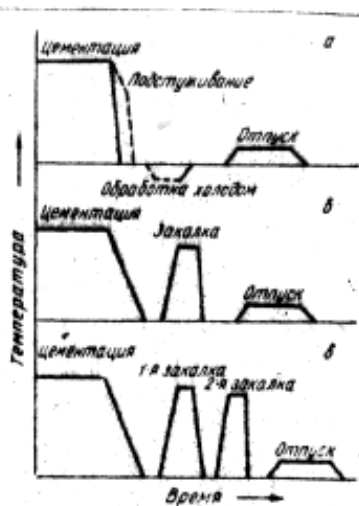


Рис. 5.2 Режимы термообработки цементованных изделий

Важно, чтобы охлаждение было достаточно быстрым во избежание выделения вторичного цементита в виде сетки.

Для высокоуглеродистой поверхности температура первой закалки соответствует перегреву стали. Вторая закалка преследует цель устранить перегрев в поверхностном слое и придать ему высокую твердость, поэтому температура нагрева берется выше A_{c1} , как для заэвтектоидной стали ($760-780^{\circ}C$).

Двойная закалка обеспечивает наивысшее качество металла, поэтому применяется для особо ответственных изделий. Этот вид закалки используется сравнительно редко вследствие сложности и трудоемкости. Кроме этого, двойной нагрев приводит к повышенному короблению изделий, усиливается опасность обезуглероживания.

Одинарная закалка (рис. 5.2,б) производится от температуры $840-870^{\circ}C$, находящейся между температурами A_{c1} и A_{c3} . Она обеспечивает достаточно хорошее качество изделий и широко применяется в термических цехах.

Если детали изготовлены из хромоникелевых сталей 20ХН3А, 18Х2Н4ВА и других, то даже при медленном охлаждении после цементации в них сохраняется большое количество остаточного аустенита. Для его разложе

ния рекомендуется перед закалкой проводить высокий отпуск при температуре 600-650°C.

Непосредственная закалка (рис. 5.2,а) выполняется с цементационного нагрева после предварительного подстуживания до 780-840°C в зависимости от марки стали. Этот вид закалки является наиболее простым и экономичным. К его достоинствам следует отнести меньшее коробление изделий, отсутствие окисления и обезуглероживания, облегчение механизации и автоматизации процесса, а также совмещение операций (цементация, непосредственная закалка, мойка, отпуск) в одном агрегате.

Непосредственная закалка широко применяется при газовой цементации деталей из наследственно мелкозернистых сталей 18ХГТ, 30ХГТ и др. Вследствие того, что в таких сталях роста зерна аустенита при цементации не происходит, перекристаллизации не требуется и качество деталей после закалки с цементационного нагрева получается высоким. Это позволяет использовать непосредственную закалку при термообработке ответственных деталей, например шестерен коробки перемены передач тракторов и автомобилей.

Если же детали изготовлены из сталей СтЗ, 10, 20, 20Х и других, не являющихся наследственно мелкозернистыми, непосредственной закалке подвергаются лишь неответственные детали, для которых важно только соблюдение достаточной поверхностной твердости, а остальные механические свойства не имеют большого значения.

На некоторых заводах в последние годы цементованные изделия подвергаются поверхностной закалке с индукционным нагревом ТВЧ. Достоинствами этого метода являются резкое сокращение цикла термической обработки, снижение себестоимости и меньшее коробление изделий по сравнению с другими видами закалки.

Микроструктура поверхности цементованных изделий после закалки состоит из мелкоигльчатого мартенсита с небольшим количеством глобулярных вторичных карбидов и остаточного аустенита (за исключением деталей из обычных сталей, не являющихся наследственно мелкозернистыми и подвергающихся непосредственной закалке).

Твердость поверхности для углеродистой стали составляет НРС 60-64, для легированной - несколько ниже (НРС 58-61), что связано с образованием повышенного количества остаточного аустенита. Для превращения остаточного аустенита в мартенсит и повышения твердости может применяться обработка холодом (рис. 5.2,а). Например, твердость хромоникелевой стали после цементации и закалки составляла НРС 52, а после обработки холодом возросла до НРС 60-62.

Структура сердцевины изделий зависит от состава стали и принятого режима термической обработки. В углеродистых сталях вследствие их низкой прокаливаемости после одинарной и двойной закалки сердцевина состоит из феррита и перлита(сорбита),а при малой толщине изделия -из феррита и мартенсита.

В структуре сердцевины деталей из легированных сталей после одинарной и двойной закалки образуются феррит и мартенсит, после

непосредственно закалки - бейнит или низкоуглеродистый мартенсит, что обеспечивает повышенную прочность и достаточную вязкость сердцевин. Сохранение обособленных участков или сетки феррита нежелательно, так как это приводит к сокращению срока службы деталей. Твердость сердцевин обычно составляет НРС 20-35.

Заключительной операцией термической обработки после закалки по любому режиму является низкий отпуск при температуре 170-220°C в течение 1,5-2 ч для снятия внутренних напряжений.

Контроль качества изделий, прошедших химико-термическую обработку, осуществляется на самих изделиях и контрольных образцах ("свидетелях"), которые подвергались цементации с данной партией деталей. Определяются техническая глубина слоя, твердость поверхности и сердцевин, изучается микроструктура (размер игл мартенсита, количество остаточного аустенита, количество, форма и распределение избыточных карбидов) и оценивается в баллах по соответствующим шкалам.

Цементация с последующей термической обработкой обеспечивает повышение износостойкости, контактной прочности, предела выносливости (вследствие образования сжимающих напряжений до 400-450 Н/мм²) и снижение чувствительности к концентраторам напряжений. Дополнительно предел выносливости может быть увеличен дробеструйным наклепом.

5.3. Материал и методика выполнения работы

Студенты получают образцы из различных марок цементуемых сталей (Ст3, 15, 20, 15Х, 18-30ХГТ, 25ХГМ, 20ХГНР, 12Х2НЧА, 20Х2НЧВА и других), разрабатывают режим цементации в твердом карбюризаторе для получения слоя толщиной 1-1,5 мм и режим последующей закалки с отпуском (по указанию преподавателя могут изменяться температура и длительность цементации), производят упаковку образцов и выполняют цементацию с непосредственной, одинарной и двойной закалкой.

Изучают микроструктуру и твердость образцов в исходном состоянии, после медленного охлаждения с температуры цементации и различных видов закалки (сердцевина и поверхность). Определяют глубину цементованного слоя

Полученные всей подгруппой данные заносят с табл. 5.1, 5.2.

Таблица 5.1

Микроструктура и твердость стали после цементации

Сталь	Режим цементации			Глубина слоя, мм	Твердость, НВ		Микроструктура	
	Температура, °С	Выдержка, ч	Охлаждение		Поверхность	Сердцевина	Поверхность	Сердцевина

Таблица 5.2

Влияние режима закалки на микроструктуру и твердость цементованной стали

Сталь	Двойная закалка 1-930°C; 2-780°C, вода				Одинарная закалка 850°C, вода				Непосредственная закалка в воде			
	Твердость, НВ		Микроструктура		Твердость, НВ		Микроструктура		Твердость, НВ		Микроструктура	
	Поверхность	Сердцевина	Поверхность	Сердцевина	Поверхность	Сердцевина	Поверхность	Сердцевина	Поверхность	Сердцевина	Поверхность	Сердцевина

5.4. Содержание отчета

Цель работы, основные положения технологии цементации и последующей термообработки.

Материал и подробная методика выполнения работы.

Зарисовки микроструктур после различной термообработки.

Таблицы с данными по всем использованным сталям.

Обсуждение полученных результатов.

Выводы.

6. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА ИНСТРУМЕНТ

Цель работы; разработка технологического процесса термической обработки инструмента, приобретение навыков его выполнения.

По назначению инструмент можно разделить на три основные группы: режущий, штамповый и измерительный. Условия службы этих видов инструмента значительно отличаются, вследствие чего они изготавливаются из разных сталей и подвергаются термической обработке по различным режимам.

6.1. Режущий инструмент

Режущий инструмент - резцы, сверла, метчики, плашки, фрезы, развертки, зенкеры - должен обладать высокими твердостью (порядка НРС 60-65) и износостойкостью (для сохранения геометрии режущей кромки), достаточной вязкостью во избежание поломок, способностью сохранять режущие свойства при разогреве режущей кромки инструмента во время работы, т.е. теплостойкостью.

В зависимости от условий службы, интенсивности процесса резания и связанного с ним разогрева инструмент изготавливается из различных материалов. Углеродистые (У10, У12), а также низколегированные (Х, ХВГ, 9ХС, ШХ15) стали обладают низкой теплостойкостью, поэтому из них изготавливают инструмент для ручных работ, деревообделочный инструмент и инструмент для выполнения чистовых операций на металлорежущих станках, например протяжки (стали 9ХС, ХВГ и др.), когда не происходит сильного разогрева режущей кромки.

В остальных случаях для работы на металлорежущих станках инструмент изготавливается из быстрорежущих сталей или оснащается твердыми сплавами.

Технологические процессы окончательной термической обработки режущего инструмента и оборудование для их выполнения выбирают с учетом химического состава стали, вида инструмента, способа его изготовления, характера производства (мелкосерийное, массовое).

Нагрев инструмента под закалку целесообразно производить в соляных ваннах, так как это обеспечивает интенсивный равномерный прогрев,

отсутствие окисления и обезуглероживания, возможность местного нагрева, что очень важно для инструмента с хвостовиками.

Чтобы уменьшить внутренние напряжения, деформацию и опасность появления трещин для инструмента из углеродистых сталей при сечении более 30-40 мм применяют подогрев при 600°C, из легированных - при 650-700°C. Для инструмента из быстрорежущей стали выполняют два-три подогрева. Первый - при температуре 200~500°C в воздушной среде (сушка), второй - при 850°C в ванне, содержащей BaCl₂ и NaCl. В случае обработки в агрегатах второй подогрев чаще выполняется при 1050°C в расплаве одного BaCl₂ чтобы не заносить в ванну окончательного нагрева NaCl, который вызывает большое дымообразование и мешает точному измерению и регулировке температуры. Для крупногабаритного инструмента (диаметр более 60 мм) применяют трехступенчатый подогрев: 200-250, 850 и 1050°C.

Отношение времени выдержки при первом, втором и третьем подогревах ко времени выдержки при окончательном нагреве составляет 3:1, 2:1 и 1:1 соответственно.

Инструмент из углеродистых и низколегированных сталей под закалку нагревают до температуры $A_{c1} + (20-30)^\circ\text{C}$, выдержка, при нагреве в соляных ваннах составляет 35-40 с/мм. Инструмент из сталей У10, У12 охлаждается через воду в масле, из легированных - в масле. Рекомендуется ступенчатая закалка в средах с температурой 150-220°C в течение времени, равного выдержке при нагреве под закалку, дальнейшее охлаждение осуществляется на воздухе.

Температура отпуска в интервале 150-200°C, продолжительность его обычно составляет 1,5-2 ч плюс 1,0-1,5 мин/мм для крупногабаритного инструмента.

Быстрорежущие стали относятся к ледебуритному или карбидному классу. Для получения высокой вторичной твердости и теплостойкости при удовлетворительной прочности и вязкости закалку инструмента из сталей проводят от высоких температур порядка 1200-1280°C, но при этом размер зерна аустенита не должен превышать в вольфрамowych и высокованадиевых сталях 10-11 балла, а в сталях с молибденом, обладающих более высокими механическими свойствами, 9-11 балла. Повышение температуры закалки увеличивает теплостойкость за счет более полного растворения карбидов, но в то же время в результате роста зерна приводит к значительному снижению прочности и сопротивления разрушению.

Выдержка при температуре закалки составляет 10-15 с/мм диаметра или толщины инструмента. Охлаждение в условиях мелкосерийного производства выполняется в масле (кроме мелкого инструмента и тонких дисковых фрез, которые охлаждаются на воздухе). При массовом производстве применяется ступенчатая закалка с охлаждением в жидких средах с температурой 500-560°C или 610-650°C, дальнейшее охлаждение осуществляется на воздухе. Время выдержки при ступенчатой закалке равно времени окончательного нагрева.

Для инструмента из быстрорежущей стали выполняется 2-3-кратный отпуск при 550-570°C с выдержкой по 1 ч и охлаждением до комнатной температуры. Для ускорения процесса применяют кратковременный отпуск в течение 15 мин при 620°C. С целью сокращения числа отпусков до 1-2 после

закалки выполняют обработку холодом. Разработан режим отпуска с предварительным нагревом при 350°C. Считают, что образовавшиеся при этом дисперсные карбиды цементитного типа обеспечивают более равномерное и дисперсное выделение специальных карбидов в процессе последующего обычного отпуска, что приводит к повышению твердости и механических свойств.

Режимы окончательной термообработки инструмента из различных сталей представлены в табл. 6.1.

С целью экономии дорогих, дефицитных быстрорежущих сталей инструмент с хвостовиками (сверла, развертки и т.д.) изготавливают сварным: рабочая часть - из быстрорежущей стали, хвостовик - из сталей 45, 40X, У7. Каждая часть обрабатывается отдельно в соляных ваннах. Твердость хвостовиков - в пределах НРС 30-35.

Все виды инструмента рекомендуется после шлифовки подвергать низкому отпуску для снятия возникших напряжений.

Инструмент из быстрорежущих сталей для повышения твердости, износостойкости, коррозионной стойкости подвергают цианированию, азотированию, обработке паром, сульфидированию, лазерной закалке.

Таблица 6.1

Режимы термической обработки инструмента

Сталь	Закалка			Отпуск		Теплостойкость (НРС 58), °С
	Температура, °С	Охлаждающая среда	Твердость, НРС	Температура, °С	Твердость, НРС	
У10, У10А	760-780	Вода-масло	64-66	150-160 200-250	62-63 58-59	200
У12, У12А	760-780		64-66	150-160	62-63	-
9ХС	840-860	Масло	62-63	180-250	58-62	-
ХВГ (малодеформируемая)	830-850		62-63	150-200 200-300	62-63 58-62	-
Х	840-860		62-63	130-150 170-210	62-65 58-60	-
Р9	1210-1240		-	550-570	62-64	620
Р6М5	1220-1230	Расплавы солей или щелочей	-	540-560	63-65	620
Р6М3	1200-1230		-	540-560	62-64	620
10Р6М5	1190-1220		-	540-560	63-66	625
Р18Ф2	1260-1290		-	560-580	63-66	630
Р18Ф2К5	1260-1290		-	560-580	64-67	640
Р18Ф2К8М	1240-1270		-	560-580	64-68	640
Р10МЧФЗК10	1220-1250		-	540-570	65-69	640

Примечание: Отпуск быстрорежущей стали 2-3-кратный по I ч; теплостойкость определялась температурой нагрева, при которой сохранялась твердость не ниже НРС 58

6.2. Штамповый инструмент для холодного деформирования

К инструменту, деформирующему металл в холодном состоянии, относятся вытяжные, гибочные, высадочные, дыропробивные пуансоны и матрицы, волочильные доски, фильеры, накатные ролики, ножи холодной

резки металла и др. Он работает в условиях повышенного износа, при плавном или ударном нагружении, значительных нагрузках (до 2200-2500 Н/мм²). При деформировании высокопрочных материалов или высокой интенсивности штамповки штампы разогреваются до 300-400°С.

Штампы должны обладать высокими твердостью, износостойкостью, достаточной прочностью и вязкостью, повышенным сопротивлением, хрупкому разрушению и усталости; при тяжелых условиях штамповки - теплостойкостью. В зависимости от вида операции, свойств штампуемого материала, состояния оборудования какие-то из перечисленных факторов оказываются важнейшими, например, для вырубных штампов - вязкость, прочность и износостойкость. Получению именно этих свойств подчинены выбор стали и режим термической обработки.

Для изготовления штампов холодной штамповки используют стали с высоким содержанием углерода: углеродистые У10, У12 (при небольших размерах и простой форме инструмента), легированные 9ХФ, Х, 9ХС, ХВГ, стали высокой износостойкости Х12М, Х12Ф1, Х6ВФ.

Если по условиям работы требуется повышенная вязкость (ножи холодной резки проката, накатные ролики, вырубные, дыропробивные пуансоны и матрицы), применяются стали с более низким содержанием углерода: 6ХС, 5ХВ2С, 6ХВ2С: 6Х3ФС, 7ХГ2ВМ.

Некоторые виды инструмента, от которых требуется особо высокая износостойкость, изготавливают из быстрорежущих сталей и твердых сплавов, например, фильеры для волочения проволоки, калибровки прутков.

Термическая обработка инструмента холодного деформирования обычной износостойкости из углеродистых и низколегированных сталей заключается в закалке от оптимальных температур и низком отпуске в интервале 150-250°С на твердость НРС 56-63.

Штампы из сталей повышенной износостойкости (из сталей типа Х12) обрабатывают:

- на первичную твердость. Температура закалки 1000-1050°С с охлаждением в масле, на воздухе или в горячих средах (400°С)..Отпуск 150-230°С для разных видов инструмента. Твердость НРС57-61. При этом благодаря наличию в структуре определенного количества остаточного аустенита, наблюдается повышенная вязкость;

- на вторичную твердость. Закалка от 1100-1150°С, твердость после закалки НРС 45-50. Отпуск 2-3-кратный при 500-520°С. В этом случае твердость повышается до НРС 61-63. Штампы имеют высокие твердость и износостойкость, но пониженную вязкость.

На вторичную твердость обрабатываются дисперсионно-твердеющие стали Х6Ф4М, 6ХМ2ФС и другие.

Для повышения стойкости штампы подвергаются азотированию, борированию, хромированию.

Режимы термообработки штампов холодной штамповки представлены в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Режимы термообработки штампов холодной штамповки

Сталь	Закалка			Отпуск		
	Температура, °С		Балл зерна аустенита	НРС	Температура, °С	НРС
	подогрева	окончательно го нагрева				
У8, У8А	-	780-800	-	63-65	200-220	57-59
У10, У12, У10А, У12А	600	760-780	-	64-66	1150-160 200-250	62-63 58-59
9ХС	650-700	840-860	-	62-63	180-250	58-62
ХВГ	650-700	830-850	-	62-63	150-200 200-300	62-63 62-58
Х12М	650-700	1000-1030	10-11	63-65	190-210	60-62 57-58
Х12Ф1	650-700	1030-1050	10-11	62-64	180-200 400-420	60-62 56-58
Х6ВФ	650-700	980-1000	11	63-65	150-170 280-300	62-63 56-58
Х6ФЧМ	650-700	980-1020	11-12 10	63-65 61-62	180 550 3-крат.по 1ч	61-64 62-64
8ХЧВ2С2МФ	700-750	1060-1090	10-11	62-64	530-540 3-крат.по 1ч	62-63

6.3. Штампы горячего деформирования

Инструмент этой группы предназначен для горячей объемной штамповки, высадки, прошивки, резки и вытяжки, горячего прессования, литья под давлением цветных сплавов.

В связи с условиями службы штампы горячего деформирования должны обладать:

- повышенной прочностью (пределом текучести), необходимой для сохранения формы инструмента при высоких давлениях во время деформирования;
- теплостойкостью, обеспечивающей сохранение необходимых прочностных свойств при нагреве до 400-700°С;
- достаточной вязкостью для предупреждения поломок и выкрашивания, особенно инструментов, работающих в условиях динамических нагрузок;
- высоким сопротивлением термической и термомеханической усталости (разгаростойкостью) в условиях циклических нагревов и охлаждений;
- износостойкостью при повышенных температурах;
- окалиностойкостью (если поверхностные слои инструментов нагреваются выше 600°С ;
- хорошей теплопроводностью для лучшего отвода, тепла, передаваемого деформируемой заготовкой;
- глубокой прокаливаемостью, так как многие штампы имеют большие размеры и высокие прочностные свойства должны обеспечиваться на большой

глубине во избежание продавливания рабочей поверхности.

Наряду с перечисленными выше свойства стали, предназначенные для прессформ литья под давлением цветных сплавов, должны обладать устойчивостью против химического взаимодействия с расплавами.

По уровню основных свойств (теплостойкость, вязкость и др.), определяемому характером легирования и термической обработкой, штамповые стали для горячего деформирования условно разделяют на несколько основных групп:

- I - повышенной вязкости и невысокой теплостойкости (типа 5ХНМ);
- II - повышенной вязкости и средней теплостойкости (типа 4Х5МФС);
- III - повышенной теплостойкости (3Х2В8Ф, 5Х3В3МФС);
- IV - высокой теплостойкости (2Х6В8М2К8).

Стали I группы по структурному признаку могут быть отнесены к доэвтектоидным (при 0,35-0,40%) или близким к эвтектоидным (при 0,5-0,6%С), а II и III групп - к заэвтектоидным.

После закалки структура штамповых сталей I группы представляет собой мартенсит с небольшим количеством избыточных карбидов и остаточного аустенита. Содержание последних зависит от суммарного легирования стали и возрастает при переходе от I группы к IV. После отпуска, который приводят чаще всего для получения твердости НРС 40-80, сталь имеет структуру троостита.

Стали II-IV групп после отпуска в интервале температур 500-550°С дополнительно упрочняются (вторично твердеют) вследствие выделения дисперсных карбидов.

Температура нагрева рабочих частей штампов под закалку выбирается с учетом получения максимальной теплостойкости, т.е. максимального легирования твердого раствора после закалки при сохранении величины аустенитного зерна не крупнее 8-10 балла по шкале, приведенной в ГОСТ 5639-65. Однако для некоторых групп штампов, к коим предъявляются повышенные требования по ударной вязкости и сопротивлению хрупкому разрушению, величину зерна необходимо ограничивать 10-12 баллом.

Нагрев штампов небольших размеров (диаметром до 100 мм и длиной до 250 мм) под закалку производится в соляных ваннах, более крупных - в камерных печах. В последнем случае рабочая поверхность штампа надежно предохраняется от окисления. Нагрев производится медленно или с подогревом при 750°С. Охлаждение осуществляется в масле, крупных штампов - на воздухе.

Температура отпуска назначается в зависимости от требуемой твердости. Штампы из сталей II-IV групп подвергаются для повышения ударной вязкости повторному отпуску; его температура на 20-40°С ниже температуры первого отпуска. Длительность отпуска - из расчета 2 ч + 1,5 мин/мм толщины штампа при загрузке в один ряд.

Для повышения стойкости штампов применяется азотирование, цианирование, борирование, хромирование.

Режимы термической обработки штампов из некоторых сталей приведены в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Режимы термообработки штампов горячего деформирования

Сталь	Закалка		Отпуск		Теплостойкость, °С
	Окончательный нагрев	НРС	Температура, °С	НРС	
5ХНМ	850-860	Более 55	480-550	41-46	
5ХНВС	800-880	Более 56	560-600	38-41 42-46	
4Х5В2ФС	1030-1050	53-56	1. 560-580 2. 530-540	47-49	630
4Х5МФС	1000-1020	50-52	1. 530-560 2. 500-520	47-49	600
3Х2В8Ф	1130-1150	49-52	1. 640-660 2. 600-620	42-46	650
5Х3В3МФС	1120-1150	53-56	1. 660-680 2. 600-620	42-46	685
2Х6В8М2К8	1190-1200	52-54	1. 650-670 2. 600-620	51-53	720

6.4. Измерительный инструмент

Измерительный инструмент (калибры гладкие и резьбовые, плитки, скобы, шаблоны, линейки и т.д.) служит для проверки размеров изготавливаемых деталей. Он должен обладать высокими твердостью, износостойкостью и стабильностью размеров, т.е. сохранять постоянство размеров и формы в течение длительного времени. Изменение размеров становится заметным через 3-6 мес. после выполнения окончательной термической обработки.

Инструмент высоких классов точности изготавливают из заэвтектидных низколегированных сталей X, ХВГ, ШХ15, инструмент простой формы и пониженных классов точности - из сталей У10-У12.

Термическая обработка точного измерительного инструмента - сложная задача. Кроме закалки и низкого отпуска при температурах 130-180°С, обеспечивающих получение максимальной твердости до НРС 62-65, выполняется ряд дополнительных операций для стабилизации инструмента: обработка холодом при температурах от -50 до -70°С непосредственно после закалки, вследствие чего твердость в зависимости от марки стали повышается на 1,5-10 единиц НРС; старение при 120-160°С длительностью 5-24 ч после низкого отпуска и шлифовки инструмента. Частичный распад остаточного аустенита, уменьшение степени тетрагональности мартенсита и дополнительное снятие напряжений способствуют сохранению инструментом формы и размеров. Обработка холодом и старение могут повторяться 2-3 раза.

Большое значение для уменьшения деформации инструмента при закалке имеет предварительная термическая обработка заготовок. Наилучшие результаты дает закалка, с отпуском при 650-680°С (улучшение), которая выполняется после черновой обработки на металлорежущих станках.

Плоские скобы, угольники и шаблоны изготавливаются из цементуемых сталей 15, 20, 15Х. Они подвергаются цементации при 900-930°С на глубину

0,3-1,5 мм. После цементации выполняется закалка от 780-800°C; если требуется улучшение структуры сердцевины, осуществляется двойная закалка от температур 850-880°C и 780-800°C. Для уменьшения количества остаточного аустенита в цементованном слое инструмента повышенной точности производится обработка холодом при температуре -50°C. Отпуск – при 150-180°C в течение 1~3 ч, для точного инструмента - старение при 120-130°C в течение 6-9 ч.

Некоторые виды инструмента изготавливаются из сталей 45-55 и подвергаются, объемной закалке или закалке рабочих поверхностей ТВЧ с последующим отпуском при 160-180°C.

6.5. Методика выполнения работы

Работу выполняют на образцах из углеродистых и легированных инструментальных сталей У8-У12, Х, ХВГ, 9ХС, ШХ15, Х12М, Х12Ф1, 5ХНМ, 5ХГС, 30ХГС, 7Х3, 3ХВ2С, 4ХЗВНФ и других.

По справочникам находят химический состав исследуемой стали, положение критических точек, технологические свойства, условия службы и применение, рекомендуемые режимы термообработки. Разрабатывают технологический процесс термообработки применительно к заданному преподавателем виду инструмента.

Затем выполняются закалка, и отпуск инструмента. Измеряется твердость и изучается микроструктура до и после термической обработки.

Если позволяет отведенное для занятия время, закаливают по несколько образцов сталей для изготовления режущего, штампового инструмента, а затем для определения устойчивости против отпуска (теплостойкости) производят отпуск при температурах 200-650°C через 50°C.

6.6. Содержание отчета

Цель работы. Характеристика исследованной стали.

Технологическая карта термообработки заданного инструмента.

Методика выполнения работы.

Зарисовки микроструктур и твердость до и после термообработки.

Кривые изменения твердости стали в зависимости от температуры отпуска.

Обсуждение полученных результатов.

Выводы.

7. ИНДИВИДУАЛЬНАЯ ЭКСПЕРТИЗНАЯ РАБОТА

Цель работы: приобретение навыков самостоятельного решения практических задач, связанных с термической обработкой стали; проверка усвоения студентами основных положений термической обработки.

7.1. Методика выполнения работы

Работу выполняет каждый студент индивидуально по заданию преподавателя. Характер заданий может быть различным: оценка качества термически обработанного изделия, определение вида термической обработки, выяснение причин брака и разработка рекомендаций по его устранению, получение в стали заданных структуры и свойств.

Для выполнения работы студентам выдают образцы, забракованные изделия или шлифы, сообщают о них необходимые сведения, предоставляют термические печи, микроскопы, приборы для измерения твердости и микротвердости и др.

При выполнении работы следует обращаться к специальной литературе, справочникам, соответствующим ГОСТам. Прежде всего хорошо изучают исследуемую марку стали (химический состав, положение критических точек, механические свойства в состоянии поставки и после термической обработки, технологические свойства, применение, рекомендуемые режимы термической обработки).

Для решения поставленной задачи тщательно изучают макро- и микроструктуру исследуемых образцов, измеряют твердость и микротвердость (в необходимых случаях для уточнения природы наблюдаемых структур), изучают распределение твердости по сечению изделия и др. При оценке качества металла, определении величины зерна, загрязненности неметаллическими включениями и т.д. обязательно используют ГОСТы или отраслевые стандарты.

Для получения в стали заданной структуры и свойств разрабатывают соответствующий режим термической обработки и согласовывают его с преподавателем. Изучают микроструктуру и измеряют твердость металла в исходном состоянии, выполняют термическую обработку, после чего снова изучают микроструктуру и измеряют твердость. В отчете дают полное описание режима термообработки (температура и время нагрева, длительность выдержки, охлаждающая среда и т.д.) и происходящих в стали превращений.

7.2. Содержание отчета

Цель работы.

Материал и методика выполнения работы.

Полученные результаты и их обсуждение.

Выводы или заключение.

Список использованной литературы.

В отчете приводятся подробные сведения по исследуемой марке стали, режиму термической обработки (если он выполняется), описание и зарисовка макро- и микроструктур, излагаются данные, полученные при измерении твердости, оценке величины зерна, определении глубины цементованного слоя, и все другие необходимые сведения. Полученные сведения анализируются, сравниваются с литературными данными. В заключение делаются выводы и даются практические рекомендации.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Большаков Вл.И.Оборудование термических цехов, технологии термической и комбинированной обработки металлопродукции [Электронный ресурс] : учебник для вузов / Вл. И. Большаков, И. Е. Долженков, А. В. Зайцев. - Изд. 2-е, перераб. и доп. - 17 Мб. - Днепропетровск : РИА "Днепр-VAL", 2010. - 1 файл.
2. Башния Ю.А., Ушаков В.К., Секей А.Г. Технология термической обработки. - М.: Metallurgia, 1986. - 424 с.
3. Новиков И.И. Теория термической обработки металлов. - М.: Metallurgia, 1978. - 287 с.
4. Носков Ф. М. Технология и оборудование термической и химико-термической обработки. Теория и технология термической обработки металлов и сплавов [Электронный ресурс]: учеб.пособие / Ф.М.Носков, Л.И.Квеглис, М.В.Носков.–Красноярск :Сиб.федер.ун-т,2018.– 1 файл.
5. Лахтин Ю.М. Металловедение и термическая обработка металлов. - М.: Metallurgia, 1976. -С. 248-249.
6. Геллер Ю.А. Инструментальные стали. - М.: Metallurgia, 1975. - С. 273-275.
7. Самохоцкий А.И., Парфеновская Н.Г. Технология термической обработки металлов. - 2-е изд., перераб. и доп. - М.: Машиностроение, 1976. - 311с.
8. Николаев Е.Н., Коротин И.И. Термическая обработка токами высокой частоты. - М.: Высш. шк., 1970. - С. 202-203, 214-217, 260-270.
9. Сагарадзе В.С. Повышение надежности цементуемых деталей. - М.: Машиностроение, 1975. - С. 5-33, 164-208.
10. Металловедение и термическая обработка стали: Справочник. - М.: Metallurgиздат, 1962. - Т.2. - С. 812-813, 817-818, 820-831, 869-874, 874-882, 1011-1016.
11. Филинов С.А., Фиргер И.В. Справочник термиста. - М.: Машиностроение, 1975. -С. 143-146.
12. Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. Ю.М. Лахтина и А.Г. Рахштадта. - М.: Машиностроение, 1980. - 230 с.
13. Тылкин М.Е. Справочник термиста ремонтной службы. - М.: Metallurgia, 1981. - 486 с.
14. Соколов К.Н., Коротич И.К. Технология термической обработки металлов и проектирование термических цехов. -М.: Metallurgia, 1988. -364с.
15. Смольников Е.А. Термическая и химико-термическая обработка инструмента в соляных ваннах. - М.: Машиностроение, 1989. — 311 с.
16. Асонов А.Д. Технология термической обработки деталей машин. -М.: Машиностроение, 1969. - 263 с.
17. Сергейчев И.М., Печковский А.М. Термическая обработка режущего и измерительного инструмента. - М.; Машгиз, 1960. - 305 с.
18. Солодихин А.Г. Технология, организация и проектирование термических цехов: Учеб. пособие. - М.: Высш. шк., 1987. - 296 с.
19. Райцес В.Б., Литвин В.М. Техника безопасности в термических цехах. - Киев: Техніка, 1988. - 159 с.

