

Лабораторная работа

ПОВЕРХНОСТНОЕ УПРОЧНЕНИЕ СТАЛЬНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Цель работы:

- 1) изучить основные методы поверхностной закалки и химико-термической обработки;
- 2) изучить изменение структуры и свойств углеродистой стали после высокочастотной закалки и цементации.

Студент должен знать сущность и методы поверхностной закалки сталей, химико-термической обработки.

Студент должен уметь назначить режимы поверхностного упрочнения стальных деталей.

Общие сведения

Большинство деталей современных машин работает под действием статических и динамических нагрузок при обычных и повышенных температурах, вызывающих быстрый износ, коррозию и разрушение поверхностных слоев деталей.

В связи с этим возникает необходимость изменения состояния поверхности металла для увеличения ее стабильности и повышения сопротивляемости разрушениям. Это достигается различными методами упрочнения поверхности деталей при их производстве и восстановлении. Классификация методов упрочнения поверхности деталей машин предусматривает две принципиальные группы методов упрочнения (восстановления):

- 1) упрочнение без изменения химического состава поверхности, но с изменением ее структуры;
- 2) упрочнение с изменением химического состава поверхности и ее структуры.

Упрочнение методами первой группы достигается поверхностной закалкой, поверхностной пластической деформацией и другими методами.

Вторая группа упрочнения осуществляется различными методами химико-термической обработки (ХТО) и методами наложения защитных слоев. Эти методы осуществляются многочисленными видами технологических процессов (плазменное упрочнение, лазерное, ионно-плазменное, электроискровое упрочнение и др.).

Из методов упрочнения без изменения химического состава поверхности, но с изменением ее структуры, наиболее распространены методы поверхностной закалки, а из способов упрочнения с изменением химического состава поверхности и ее структуры – методы ХТО.

Выбор метода поверхностного упрочнения детали зависит от условий ее эксплуатации, формы, размеров, марки выбранной стали и других факторов.

Поверхностная закалка

Сущность любого способа поверхностной закалки состоит в том, что поверхностные слои детали быстро нагревают выше критических точек, а затем охлаждают со скоростью выше критической. В результате слой металла, нагретый выше A_{c3} (I), получит полную закалку; слой, нагретый выше A_{c1} (II), но ниже A_{c3} (II), – неполную закалку, а сердцевина (III) (рисунок 8.1) или не нагреется, или нагреется ниже A_{c1} и закалки не произойдет.

Основное назначение поверхностной закалки: повышение твердости, износостойкости и предела выносливости поверхности при сохранении вязкой сердцевины детали.

Способы поверхностной закалки определяются методами нагрева, которые могут быть:

- 1) в расплавленных металлах или солях;
- 2) пламенем ацетилено-кислородной или газовой горелки (закалка с газопламенным нагревом);
- 3) в электролитах;
- 4) токами высокой частоты, индуцируемыми в поверхностных слоях детали (закалка токами высокой частоты);
- 5) лазерами (лазерная закалка) и др.

В промышленности самым распространенным способом является закалка нагревом токами высокой частоты (ТВЧ). Реже, в основном для крупных деталей, применяется закалка с газопламенным нагревом.

Закалка ТВЧ

Закалку с индукционным нагревом ТВЧ широко используют для повышения долговечности осей, пальцев, валов и других деталей цилиндрической формы. Толщина поверхностного слоя, обработанная на структуру мелкоигольчатого мартенсита, определяется условиями работы детали. Когда изделие работает только на износ

или в условиях усталости, толщину закаленного слоя чаще принимают 1,5–3,0 мм, в условиях высоких контактных нагрузок и возможной перешлифовки – 4,0–6,0 мм. В случае особо больших контактных нагрузок, например, для валков холодной прокатки, толщина закаленного слоя достигает 10,0–15,0 мм и выше. Обычно считают, что площадь сечения закаленного слоя должна быть не более 20 % всего сечения.

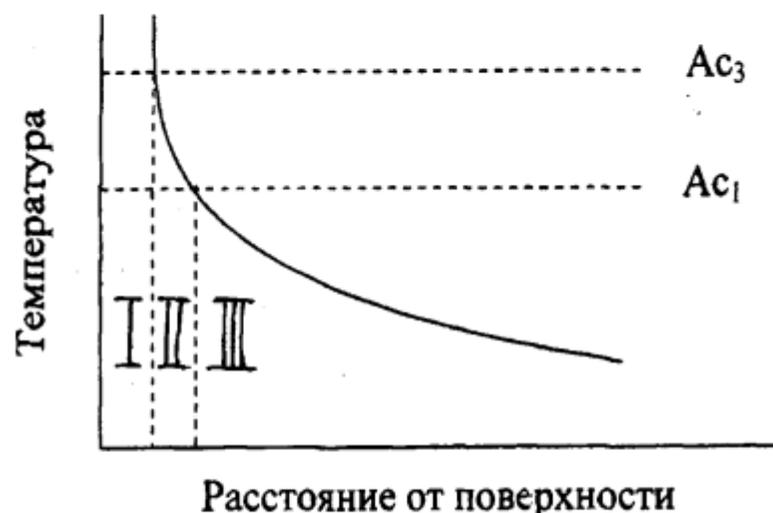


Рисунок 8.1. Распределение температуры от поверхности в глубину при поверхностной закалке

Индукционный нагрев происходит вследствие теплового действия тока, индуцируемого в изделии, помещенном в переменное магнитное поле высокой частоты.

Деталь 1 помещают внутри индуктора 2, представляющего собой один или несколько витков пустотелой водоохлаждаемой медной трубки или шины (рисунок 8.2). Переменный ток высокой частоты, протекая через индуктор, создает переменное магнитное поле. В результате индукции в поверхностном слое детали возникают вихревые токи, происходит выделение Джоулева тепла. Ток проходит, в основном, в поверхностном слое проводника (детали). Это явление называется поверхностным эффектом.

Около 90 % тепла выделяется в слое толщиной y , которая определяется по уравнению (1):

$$y = 4,46 \cdot 10^5 \sqrt{\frac{\rho}{\mu \cdot f}}, \text{ (м)}. \quad (1)$$

Толщина слоя зависит от частоты тока f , Гц, а также магнитной проницаемости μ , Г/м и удельного электросопротивления ρ , Ом·м нагреваемого металла.

Для получения закаленного слоя толщиной 1,0 мм частота тока составляет 50–60 кГц, для слоя 2,0 мм частота тока – 15 кГц.

Источником ТВЧ служат машинные или ламповые генераторы. Машинные генераторы вырабатывают ток частотой от 1000 до 15000 Гц; ламповые – до 100 000 Гц. В последнее время широко применяют тиристорные и транзисторные преобразователи частоты, обеспечивающие плавное регулирование частоты тока в заданном режиме.

Охлаждающую жидкость (воду, масло) подают через душевое устройство (спрейер). Спрейер часто совмещают с индуктором. После закалки с индукционным нагревом изделия подвергают низкому отпуску при 160–200 °С, иногда самоотпуску.

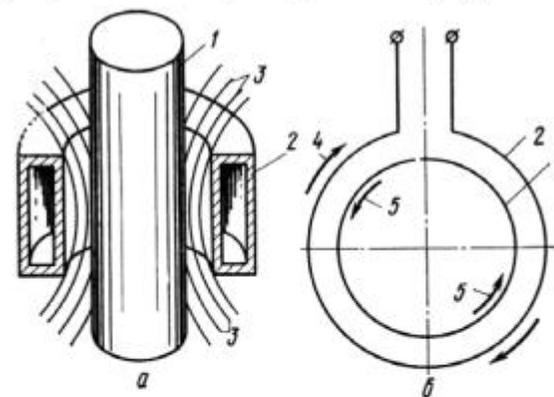


Рисунок 8.2. Схема высокочастотной установки:
а – распределение магнитного потока в индукторе; *б* – направление токов в индукторе и детали; 1 – нагреваемая деталь; 2 – виток индуктора;
 3 – магнитные силовые линии; 4 – направление тока в индукторе;
 5 – направление тока в детали

Для поверхностной индукционной закалки применяют стали содержащие 0,4–0,5 % углерода (40, 45, 40X, 45X, 40XH, 50XФА, 50Г, 50XM и др.).

Обладая высокой производительностью, метод поверхностной закалки ТВЧ в то же время мало эффективен для деталей сложной формы, для которых, в силу их конструктивных особенностей, возможно только местное упрочнение. Этого недостатка не наблюдается при газопламенной обработке, обеспечивающей для деталей сложной формы равномерное упрочнение.

Кроме поверхностного нагрева, описанного выше, получила распространение поверхностная закалка при глубоком индукционном нагреве (объемно-поверхностная закалка). В этом случае глубина прогрева до критических температур больше, чем глубина закаленного слоя. Для получения поверхностного закаленного слоя используются стали *с пониженной прокаливаемостью*. В этих сталях при охлаждении после нагрева на поверхности образуется мартенсит (60 HRC), а в сердцевине, поскольку скорость охлаждения меньше критической, образуется сорбит или троостит (30–40 HRC). В этом случае применяются специальные стали пониженной (55ПП, 60ПП) или регламентированной (47ГТ) прокаливаемости. Сталь 55ПП используют для деталей, у которых глубина закаленного слоя должна быть меньше 2–3 мм. В стали регламентированной прокаливаемости получение закаленного слоя глубиной 7–8 мм обеспечивает марганец, а мелкое зерно – титан.

Химико-термическая обработка стали

Химико-термической обработкой (ХТО) называется термическая обработка, заключающаяся в сочетании термического и химического воздействий с целью изменения состава, структуры и свойств поверхностного слоя стали.

ХТО заключается в насыщении поверхностного слоя стали различными элементами (*C, N, Al, Cr, Si, B* и др.) путем их диффузии в атомарном состоянии из насыщающей среды (твердой, газовой, жидкой, паровой) при высокой температуре.

Физические основы химико-термической обработки заключаются в следующем:

- 1) образование насыщающего элемента в атомарном состоянии (**диссоциация**);
- 2) поглощение (растворение) атомов насыщающего элемента поверхностью металла (**адсорбция**);
- 3) проникновение насыщающего элемента вглубь (**диффузия**).

В результате образуется диффузионный слой, на поверхности которого концентрация диффундирующего элемента наибольшая.

В зависимости от насыщающего элемента существуют следующие разновидности химико-термической обработки:

цементация – насыщение стали углеродом;

азотирование – насыщение стали азотом;

цианирование – одновременное насыщение стали углеродом и азотом;

борирование – насыщение стали бором и т.д.

Насыщение стали металлами называется **диффузионной металлизацией**. В зависимости от насыщающего металла существуют процессы:

алитирование – насыщение алюминием;

хромирование – насыщение хромом;

силицирование – насыщение кремнием и т. д.

Практическое значение для сельхозмашиностроения имеют технологические процессы цементации, азотирования, цианирования, борирования, алитирования, диффузионного хромирования. Однако наиболее широко используется цементация (вследствие экономичности, не дефицитности насыщающей среды).

Цементация

Цементация заключается в насыщении стальных деталей углеродом для придания высокой твердости и износостойкости их поверхности при сохранении вязкой и пластичной сердцевины. Окончательные свойства цементированные изделия приобретают после закалки и низкого отпуска. Цементации обычно подвергаются детали, изготовленные из сталей с содержанием углерода 0,1–0,3 %, работающие в условиях контактного износа и приложения знакопеременных нагрузок: среднеразмерные зубчатые колеса, втулки, поршневые пальцы, кулачки, валы коробок передач автомобилей, отдельные детали рулевого управления и т.д.

В зависимости от состояния насыщающей среды, называемой **«карбюризатором»**, различают цементацию в твердом, газовом и жидком карбюризаторах. Температура цементации изменяется в интервале 880–1000 °С.

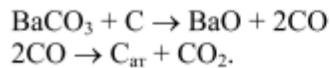
Цементация в твердом карбюризаторе

Цементируемые детали вместе с карбюризатором загружают в ящики, герметически упаковывают, выдерживают при 930 °С. Скорость насыщения 0,1–0,2 мм/ч. После цементации ящики охлаждают на воздухе до 400–500 °С, а затем раскрывают. В качестве карбюризатора применяют смесь древесного угля или каменноугольного полукокса с углекислым барием и кальцием. Для контроля за протеканием процесса и толщиной цементуемого слоя в ящик закладывают свидетели – образцы диаметром 10–15 мм из той же марки стали, которые периодически вынимают и определяют глубину слоя. Широко применяют карбюризатор, состоящий из древесного угля, 20 – 25 % BaCO₃ и 3,5 % CaCO₃. Рабочая смесь, применяемая для цементации, состоит из 20–25 % свежего карбюризатора и 80–75 % отработанного.

В цементационном ящике имеется воздух, кислород которого при высокой температуре взаимодействует с углеродом карбюризатора, образуя оксид углерода. Оксид углерода в присутствии железа диссоциирует по уравнению



Механизм действия активизатора сводится к увеличению количества в ящике CO:



Существенным недостатком цементации в твердом карбюризаторе является большая длительность процесса, невозможность регулирования содержания углерода в слое, необходимость прогрева малотеплопроводной массы карбюризатора, высокая стоимость подготовительных операций (ручная укладка деталей в ящики, приготовление карбюризатора и т. д.). Однако универсальность и простота цементации в твердом карбюризаторе обуславливает применение ее в мелкосерийном и единичном производствах.

Газовая цементация

Этот процесс осуществляют нагревом изделия в среде газов, содержащих углерод. Газовая цементация имеет ряд преимуществ по сравнению с цементацией в твердом карбюризаторе. В этом случае можно получить заданную концентрацию углерода в слое, скорость процесса составляет $\approx 0,2$ мм/ч, что сокращает длительность процесса.

При этом обеспечивается возможность полной механизации и автоматизации процессов, включая и последующую термическую обработку деталей.

При газовой цементации в качестве карбюризатора используют природные газы, состоящие из метана (CH₄) и пропанбутановых смесей. Также применяют жидкие углеводороды (керосин, синтин, спирты и др.), каплями подаваемые в печь. Углеводородные соединения при высокой температуре разлагаются с образованием атомарного углерода и водорода.

В серийном производстве газовую цементацию обычно проводят в шахтных печах. В крупносерийном и массовом производствах газовую цементацию проводят в безмуфельных печах непрерывного действия.

Разработаны новые методы цементации: высокотемпературная вакуумная цементация; цементация в тлеющем разряде (ионная цементация); цементация в кипящем слое; цементация в расплавленных солях (жидкостная цементация); цементация пастами. В то же время самым распространенным промышленным методом является газовая цементация.

Структура цементационного слоя

Цементационный слой имеет переменную концентрацию углерода по толщине, уменьшающуюся от поверхности к сердцевине детали. Различают три основные зоны в слое (рисунок 8.3):

- 1 – заэвтектоидная зона, состоящая из перлита и цементитной сетки;
- 2 – эвтектоидная зона, представляющая собой перлит;
- 3 – доэвтектоидная зона, в которой по мере приближения к сердцевине уменьшается количество углерода, перлита, а количество феррита возрастает.

За глубину цементационного слоя принимают сумму заэвтектоидной, эвтектоидной и половину доэвтектоидной зоны, где количество феррита и перлита составляет по 50 %.

Термическая обработка цементованной стали и свойства упрочненных деталей

Окончательные свойства стальных деталей достигаются в результате термической обработки, выполняемой после цементации. Этой обработкой можно исправить структуру и измельчить зерно сердцевины и цементационного слоя, получить высокую твердость в поверхностном слое 56–60 HRC и хорошие механические свойства сердцевины 26–40 HRC; устранить карбидную сетку в поверхностном

слое, которая может возникнуть при насыщении его углеродом до заэвтектоидной концентрации.

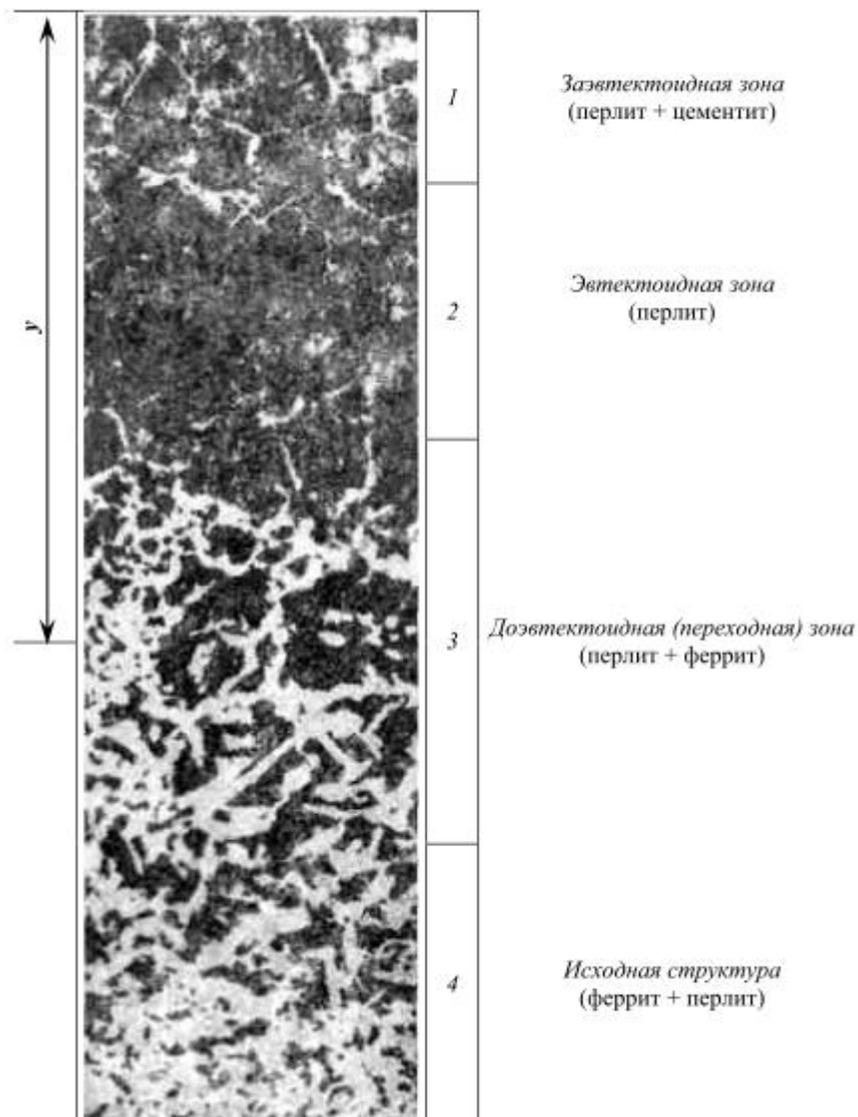


Рисунок 8.3. Структура стали после цементации

В большинстве случаев, особенно при обработке наследственно мелкозернистых сталей, применяют закалку выше точки A_{c3} (сердцевины) при 820–850 °С. Это обеспечивает измельчение зерна и полную закалку цементированного слоя и частичную перекристаллизацию и измельчение зерна сердцевины. После газовой цементации часто применяют закалку без повторного нагрева, а непосредственно из цементационной печи после подстуживания изделий до 840–860 °С, для уменьшения коробления обрабатываемых изделий. Такая обработка не исправляет структуры цементированного слоя и сердцевины, поэтому непосредственную закалку применяют только в том случае, когда изделия изготовлены из наследственно мелкозернистой стали. Для уменьшения деформации цементированных изделий выполняют также ступенчатую закалку в горячем масле (160–180 °С).

В результате термической обработки поверхностный слой приобретает структуру мелкоигльчатого мартенсита и изолированных участков остаточного аустенита (не более 15–20 %). Большое значение имеет **прокаливаемость**, под которой понимают способность стали образовывать структуру мартенсита с HRC 59–62 на заданном расстоянии от поверхности (толщина слоя до 0,8–1,1 мм). Карбиды уменьшают прокаливаемость, играя роль готовых центров распада аустенита, снижая его устойчивость.

Заключительной операцией термической обработки стальных деталей после цементации во всех случаях является низкий отпуск при 160–180 °С, переводящий мартенсит закалки в поверхностном слое в отпущенный мартенсит, снимающий напряжения.

Углеродистые качественные стали, содержащие $\leq 0,25\%$ С (стали 10, 15, 20, 25), применяются для изготовления цементированных деталей, от которых требуется высокая поверхностная твердость и допустима невысокая прочность сердцевины, и используются сравнительно редко.

Хромистые стали 15Х, 20Х, 20ХФ применяются для небольших деталей, работающих на износ в условиях трения, при средних удельных давлениях и скоростях.

Хромомарганцевые стали – марок 18ХГТ, 25ХГТ, 20ХГР дополнительно легированные Ti, Mn, В – применяются для изготовления ответственных деталей, работающих при больших скоростях, средних и высоких удельных давлениях, при наличии ударных нагрузок. Стали склонны к внутреннему окислению при газовой цементации, что снижает прокаливаемость слоя и предел выносливо-

сти. Марганец повышает прокаливаемость цементируемого слоя, устраняет вредное влияние внутреннего окисления.

Азотирование

Азотированием называется процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали азотом. Азотирование чаще всего проводится при температурах 500–600 °С. Азотирование повышает твердость поверхностного слоя деталей, износостойкость, сопротивление коррозии в атмосфере, воде, паре.

Свойства азотированного слоя выше, чем цементированного, и сохраняются до температур 450–550 °С. Азотированию подвергают легированные стали, содержащие хром, ванадий, молибден и другие элементы (например, 20Х13, 30Х13, 30ХМЮА, 30ХЗМФ1, 25ХЗНЗМФ и др.). Их применяют для изготовления шестерен, колечатых валов, клапанов, гильз цилиндров мощных двигателей, кулачков, втулок, деталей топливной аппаратуры и паровых турбин. Азотируются детали, работающие в условиях трения скольжения, склонные к короблению (деформации) и испытывающие небольшие контактные нагрузки. Азотированию могут подвергаться практически все легированные стали. Износостойкость азотированной стали в 2–4 раза выше износостойкости цементированной стали.

При азотировании в качестве карбюризатора применяют аммиак. Получившийся при диссоциации аммиака атомарный азот диффундирует в сталь, образуя твердые растворы в α и γ железе (азотистый феррит и аустенит) и химические соединения – нитриды. Данный процесс длительный, для получения глубины слоя 0,1 мм необходимо 24 часа. Для ускорения процесса азотирования сначала азотирование проводят при 500–520 °С, затем при 540–560 °С. Перед азотированием проводят улучшение (закалку и высокий отпуск).

Азотирование изделий является одним из основных методов повышения предела выносливости. Надрезы, царапины, резкие переходы сечений, отверстия и другие концентраторы напряжений, понижающие предел выносливости, после азотирования практически не оказывают ослабляющего влияния. Влияние азотирования тем сильнее, чем меньше поперечное сечение детали и больше конструктивные или технологические концентраторы напряжений.

Азотирование широко применяют для мало- и средненагруженных зубчатых колес сложной конфигурации, например, с внутренними зубьями и др., шлифование которых трудно осуществить. В этом случае зубчатые колеса изготовливают из стали 40Х (кони-

ские) или 40ХФА (цилиндрические). После азотирования на глубину 0,10–0,13 мм, в результате которого обеспечивается минимальная деформация, проводится только притирка или хонингование зубьев.

Широко применяется азотирование деталей топливной аппаратуры и клапанов дизельных двигателей, деталей турбин из высокохромистых сталей (20Х13, 30Х13, 40Х13), а также штоков клапанов паровых турбин, гильз цилиндров, игл форсунок, пальцев, плунжеров и др.

Нитроцементация

Нитроцементацией называют процесс диффузионного насыщения поверхностного слоя стали одновременно углеродом и азотом при температуре 840–860 °С в газовой среде, состоящей из науглероживающего газа и аммиака. Продолжительность процесса 4–10 ч. Установлено, что при одновременной диффузии углерода и азота ускоряется диффузия углерода. Процесс проводят при более низкой температуре (840–860 °С вместо 910–930 °С при цементации). После нитроцементации следует закалка непосредственно из печи, реже после повторного нагрева, применяют и ступенчатую закалку.

После закалки проводят отпуск при 160–180 °С. Структура обработанного слоя после нитроцементации, как и после цементации, состоит из мелкокристаллического мартенсита и остаточного аустенита, но в ней присутствует небольшое количество дисперсных равномерно распределенных карбонитридов. Азота в слое должно быть 0,10–0,15 %, а углерода 1,0–1,65 %. Твердость слоя после закалки и низкого отпуска HRC 58–60. Нитроцементации обычно подвергают детали сложной конфигурации, склонные к короблению, в крупносерийном и массовом производствах, на автомобильных и тракторных заводах.

Порядок проведения работы

1. Изучить основные методы поверхностного упрочнения стали.
2. Изучить микроструктуру стали после поверхностной закалки ТВЧ.
4. Изучить микроструктуру стали после цементации.
5. Изучить микроструктуру стали после цементации и последующей закалки.
6. Составить отчет по работе.

Оборудование, инструмент и материалы

1. Установка ТВЧ с ламповым генератором, индукторы.
2. Металлографические микроскопы МИМ–7.

3. Образцы микроструктур стали после закалки ТВЧ и цементации, цементации и последующей закалки и отпуска.

Содержание отчета

1. Цель работы.
2. Сведения об основных методах поверхностной закалки стали (принципиальная схема установки).
3. Перечень основных методов ХТО.
4. Схемы микроструктур стали после ТВЧ и цементации.
5. Выводы (сравнение способов упрочнения стальных деталей).
6. Список использованной литературы.

Контрольные вопросы

1. В каком случае применяется поверхностное упрочнение детали?
2. Изложите основные методы поверхностного упрочнения детали.
3. Изложите сущность поверхностной закалки.
4. Перечислите основные методы поверхностной закалки.
5. Объясните закалку газопламенным нагревом.
6. Объясните процесс закалки ТВЧ.
7. От чего зависит глубина закаленного слоя?
8. Какие установки применяют для закалки ТВЧ?
9. Что называется химико-термической обработкой?
10. Физическая сущность химико-термической обработки.
11. Объясните процесс цементации.
12. Какую термическую обработку проводят после цементации?
13. Какие существуют методы цементации?
14. Объясните процесс азотирования стали.
15. Какую предварительную термическую обработку проводят перед азотированием?
16. Укажите преимущества и недостатки цементации.
17. Укажите преимущества и недостатки закалки ТВЧ.