

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Северный (Арктический) федеральный университет  
имени М.В. Ломоносова  
Институт энергетики и транспорта

# **ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ**

*Методические указания  
к проведению лабораторных работ  
по материаловедению*

Архангельск  
2013

Рассмотрены и рекомендованы к изданию  
методической комиссией Института энергетики и транспорта  
Северного (Арктического) федерального университета  
\_\_\_\_\_2013 г.

Составители:

*И.О. Думанский*, доцент, канд. техн. наук.  
*В.М. Александров*, доцент, канд. техн. наук.  
*С.И. Думанский*, доцент, канд. техн. наук.

Рецензент

*О.И. Бачин*, доцент, канд. техн. наук

УДК669

Термическая обработка углеродистых сталей: метод. указания к проведению лаб. работ по материаловедению /сост.: И.О. Думанский, В.М. Александров, С.И. Думанский. – Архангельск: САФУ, 2013. – 15 с.

Приведены краткие теоретические сведения, методика выполнения лабораторных работ, порядок оформления, контрольные вопросы.

Предназначены для студентов всех специальностей, изучающих курс материаловедения.

Ил. 5. Табл. 2. Библиогр. 4 назв.

© Северный (Арктический)  
федеральный университет, 2013

# 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Термической обработкой называют технологический процесс, состоящий из нагрева и охлаждения металлических изделий с целью изменения их структуры и свойств.

Основными структурами, участвующими в формировании свойств стали при термообработке, являются как равновесные – аустенит и перлит, так и неравновесные – мартенсит, сорбит, троостит, остаточный аустенит.

Аустенит (А) – твёрдый раствор углерода в  $\gamma$ -железе.

Мартенсит (М) – пересыщенный твёрдый раствор углерода в  $\alpha$ -железе той же концентрации, что и у исходного аустенита; мартенсит – структура твёрдая, хрупкая, напряжённая, неустойчивая; твёрдость мартенсита возрастает с увеличением в нём содержания углерода, например: для  $C=0,1\%$  HRC 30;  $C=0,7\%$  HRC 65.

По сравнению с другими структурами мартенсит имеет наибольший удельный объём, зависящий от содержания углерода (максимальный объём мартенсита у эвтектоидной стали). Увеличение удельного объёма вызывает большие внутренние напряжения, приводящие иногда к деформации и даже разрушению изделий.

Перлит (П) – эвтектоидная смесь феррита (Ф) и цементита (Ц), содержание углерода в которой постоянно и равно  $0,8\%$ .

Сорбит, троостит (С, Т) – квазиэвтектоидные (quassi-подобный) смеси феррита и цементита, содержание углерода в которых больше или меньше  $0,8\%$ .

Сорбит, троостит и перлит различаются между собой степенью дисперсности (измельчённости) включений цементита. Наиболее тонкое строение (дисперсность) у троостита, сорбит имеет среднюю дисперсность, а перлит – самая крупнодисперсная структура. Увеличение дисперсности повышает прочностные характеристики и уменьшает пластические свойства стали, например, твёрдость троостита – HB3500...5000МПа (HRC38...52); сорбита –

HB2500...3500 МПа (HRC25...38); перлита – HB 1500...2500 МПа (HRC25 и ниже).

При нагреве стали, в соответствии с диаграммой «железо-углерод», происходят следующие превращения. Перлит, содержащий 0,8 % углерода при  $727\text{ }^{\circ}\text{C}$  (т.  $A_1$ ), превращается в аустенит:  $(\text{Ф}+\text{Ц}_{\text{II}}) \rightarrow \text{А}$ . В доэвтектоидных сталях по окончании этого превращения в аустените постепенно растворяется феррит. В заэвтектоидных сталях после превращения перлита происходит растворение цементита в аустените. Во всех случаях конечной структурой будет аустенит, содержащий такой же процент углерода, какой имела сталь при комнатной температуре. Указанные превращения носят диффузионный характер и сопровождаются значительным перемещением атомов углерода. Для полного фазового превращения необходим нагрев и выдержка стали выше точек  $A_3$  и  $A_{cm}$ .

При охлаждении с различной скоростью стали, нагретой до аустенитного состояния, происходят следующие превращения. Чем выше скорость охлаждения аустенита, тем больше степень его переохлаждения (распад происходит при более низких температурах). Если степень переохлаждения невелика, то он полностью распадается на механическую смесь феррита и цементита различной степени дисперсности. Этот процесс является диффузионным и называется перлитным или нормальным превращением, в результате которого получаются феррито-цементитные (перлитные) смеси:  $\text{А} \rightarrow (\text{Ф}+\text{Ц}_{\text{II}})$ . Продукты перлитного превращения имеют пластинчатое строение. Чем больше степень переохлаждения, тем тоньше получающаяся феррито-цементитная структура (оценивается суммарной толщиной соседних пластинок феррита и цементита – межпластинчатым расстоянием) и тем выше твёрдость и ниже пластичность.

При охлаждении аустенита со скоростью, при которой диффузия атомов углерода становится невозможной (выше т.н. критической скорости), в аустените почти мгновенно возникают

кристаллы мартенсита:  $A \rightarrow M$ . Образование мартенсита является бездиффузионным процессом. При этом превращении происходит только перестройка  $\gamma$ -решётки в  $\alpha$ -решетку, причём перераспределение углерода произойти не может: весь углерод, бывший в аустените, остаётся и в мартенсите, хотя максимальная равновесная растворимость углерода в  $\alpha$ -железе при комнатной температуре менее 0,01 %. Поэтому мартенсит закалки имеет не кубическую, как  $\alpha$ -железо, а искажённую, тетрагональную решётку. Превращение аустенита в мартенсит при охлаждении до комнатной температуры не протекает до конца, то есть в закалённой на мартенсит стали всегда имеется некоторое количество метастабильного остаточного аустенита (тем больше, чем выше содержание в стали углерода).

Структура мартенсита (и остаточного аустенита) является неравновесной, неустойчивой, метастабильной. Нагрев её до температуры ниже  $t_{A_1}$  (727 °C), приводит к снятию внутренних напряжений и распаду на феррито-цементитные смеси различной (в зависимости от температуры нагрева) дисперсности, имеющие не пластинчатую, а округлую (зернистую) форму цементитных включений. Эти структуры называются структурами отпуска.

В зависимости от скорости охлаждения аустенит превращается в следующие структуры:

при охлаждении в воде комнатной температуры образуется мартенсит;

при охлаждении в масле – троостит;

при охлаждении на воздухе – сорбит;

при охлаждении вместе с печью – перлит.

Некоторые закономерности процесса отпуска закаленной на мартенсит стали показаны на рис.1.

Степень распада мартенсита определяется температурой нагрева закаленной стали при отпуске. В зависимости от температуры нагрева образуются следующие структуры:

при  $t=150...250\text{ }^{\circ}\text{C}$  мартенсит закалки превращается в мартенсит отпуска;

при  $t=250...500\text{ }^{\circ}\text{C}$  мартенсит распадается, образуя троостит;

при  $t=500...680\text{ }^{\circ}\text{C}$  мартенсит распадается, образуя сорбит;

при  $t=680\text{ }^{\circ}\text{C}$  и выше мартенсит распадается, образуя перлит.

## 2. ВИДЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Основными видами термической обработки являются: отжиг, закалка и отпуск. Для сталей также используется так называемая нормализация.

**Отжиг** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше линии GSE (рис.2), выдержке при этой температуре и медленном охлаждении (обычно вместе с печью).

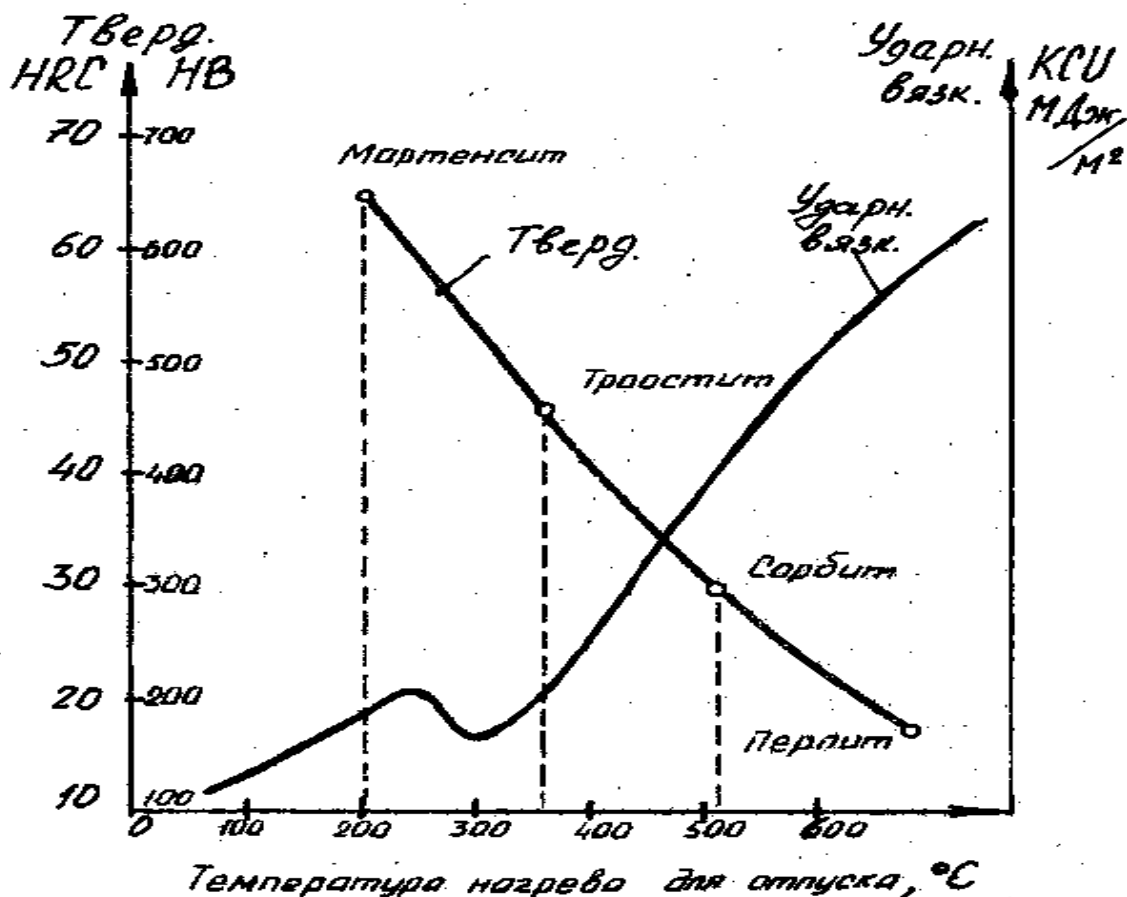


Рис. 1. Зависимость твердости и ударной вязкости стали от температуры отпуска

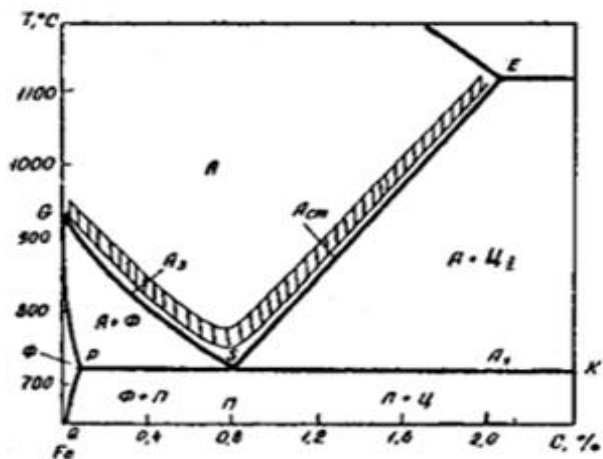


Рис. 2. Оптимальный интервал температур нормализации и полного отжига углеродистой стали

Целью отжига является получение структуры стали, близкой к равновесной. После отжига углеродистой стали получают структуры:

в доэвтектоидной стали – феррит + перлит,

в эвтектоидной стали – перлит,

в заэвтектоидной стали – перлит + вторичный цементит.

**Закалка** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше линии GSK (рис.3), выдержке при этой температуре и охлаждении со скоростью, обеспечивающей получение мартенсита (не ниже критической).

Минимальная скорость охлаждения, при которой не успевает пройти диффузионный распад аустенита на феррито-цементитную смесь, называется критической скоростью закалки на мартенсит.

Скорость охлаждения обеспечивается определённой охлаждающей средой (вода, растворы солей, масло, для некоторых сталей – воздух). Назначение закалки – получение мартенситной структуры.

**Нормализация** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали до температуры выше линий GSE (рис.2), выдержке при этой температуре и охлаждении на спокойном воздухе.

Нормализация не относится к основным видам термообработки, поскольку в зависимости от марки стали и размера заготовки нормализация может быть разновидностью либо отжига, либо закалки.

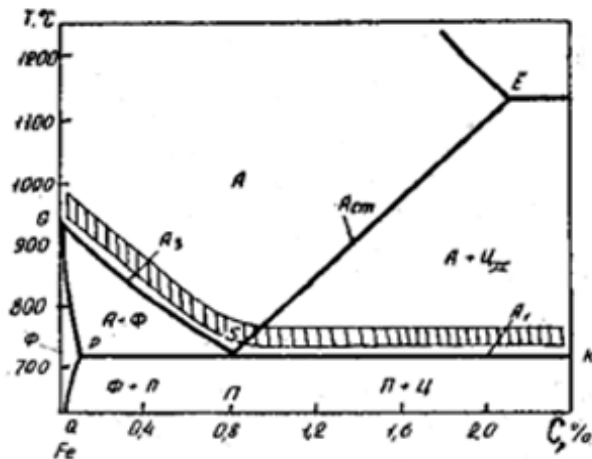


Рис. 3. Оптимальный интервал температур закалки углеродистой стали

В доэвтектоидных сталях нормализация способствует получению однородной мелкозернистой структуры (в малоуглеродистых сталях применяют иногда вместо отжига); в заэвтектоидных сталях – уничтожению вредной цементитной сетки.

**Отпуск** – термическая обработка, заключающаяся в нагреве закалённой стали до температуры ниже линии PSK, выдержке при этой температуре и охлаждении.

Отпуск стали способствует снятию внутренних напряжений и получению необходимых свойств стали.

Отпуск имеет важное практическое значение. Именно в процессе отпуска формируются окончательные структуры и комплекс эксплуатационных свойств сталей. Температура отпуска обуславливается требованиями к этому комплексу.



### 3. ПРОВЕДЕНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ

Термическая обработка подразделяется на предварительную и окончательную. Предварительная термообработка (отжиг и нормализация) применяется при подготовке структуры стали для последующей обработки.

В качестве окончательной термообработки применяют, как правило, закалку с последующим отпуском. Иногда окончательной операцией могут быть отжиг, чаще нормализация, если по условиям работы детали эти операции дают нужные механические свойства.

Режим любой термообработки состоит из нагрева, изотермической выдержки и охлаждения (рис.4).

В общем случае для доэвтектоидных ( $C < 0,8 \%$ ) углеродистых нелегированных сталей температуру нагрева  $T_H$  под отжиг, нормализацию или закалку определяют исходя из положения критической точки  $A_3$  (линия окончания аустенитного превращения в доэвтектоидных сталях GS) по формуле 1:

$$T_H = A_3 + (30^\circ \dots 50^\circ) \quad (1)$$

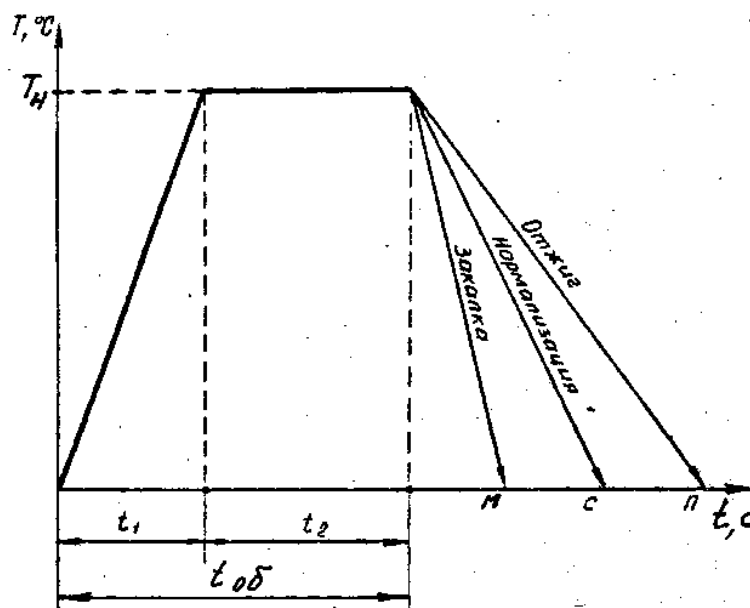


Рис. 4. Схема термической обработки

При отжиге или нормализации заэвтектоидных сталей ( $C > 0,8 \%$ ) температура нагрева выбирается точно также, однако, при нагреве под закалку, температуру определяют исходя из положения критической точки  $A_1$  (линия начала аустенитного превращения в заэвтектоидных сталях SK) по формуле 2:

$$T_n = A_1 + (30^{\circ} \dots 50^{\circ}) \quad (2)$$

Такая закалка заэвтектоидной стали называется неполной. В результате этой закалки сталь приобретает структуру мартенсита с мелкодисперсными цементитными включениями, что придает стали повышенную твердость и износостойкость по сравнению со сталью, имеющей чисто мартенситную структуру.

Общее время  $t_{об}$  складывается из продолжительности нагрева изделий до необходимой температуры  $t_1$  и выдержки при этой температуре в течение времени  $t_2$  (рис.4.)

Время нагрева  $t_1$  зависит от многих факторов. Обычно для углеродистой стали это время исчисляется по наименьшему размеру максимального сечения детали из расчета: 1...1,5 минуты на 1 мм этого размера. Время выдержки  $t_2$  составляет, как правило, 20 % от времени нагрева  $t_1$

В качестве закалочных сред (охладителей) обычно применяют воду, водные растворы солей, щелочей, минеральные масла, кремнийорганические жидкости, иногда – воздух. Углеродистые (нелегированные) стали, как правило, закалывают в воде или водных растворах солей и щелочей.

Для интенсификации охлаждения рекомендуется перемещать закаливаемое изделие или обеспечивать циркуляцию охладителя. Средние скорости охлаждения, обеспечиваемые различными охлаждающими средами, приведены в табл.1.

После закалки детали всегда подвергаются последующему отпуску. В практике различают три разновидности отпуска.

Таблица 1. Средняя скорость охлаждения в различных охладителях

Вид охладителя	Средняя скорость охлаждения, °/с
Воздух	5
Масло	150
Вода, 20°С	700
Вода, 80°С	140
Вода + 10 % NaCl	2100
Вода + 10 % NaOH	1600

Низкотемпературный (низкий) отпуск проводят с нагревом до 250 °С. Цель отпуска – снижение внутренних напряжений. Мартенсит закалки переходит в мартенсит отпуска. Высокая твёрдость, износостойкость и низкая ударная вязкость сохраняются. Данному отпуску подвергается режущий и измерительный инструмент.

Среднетемпературный (средний) отпуск проводится при температурах 350...500 °С. Структура мартенсита переходит в троостит отпуска. Такой отпуск обеспечивает наиболее высокий предел упругости и несколько повышает вязкость. Применяется для рессор, пружин и других упругих элементов.

Высокотемпературный (высокий) отпуск проводят при температуре 500...680 °С. Структура мартенсита закалки переходит в сорбит отпуска. После такого отпуска почти полностью снимаются внутренние напряжения, значительно повышается ударная вязкость. Прочность и твёрдость при этом снижаются, но остаются более высокими, чем при нормализации. Высокий отпуск создаёт наилучшее сочетание прочности и вязкости стали и полностью исключает вероятность хрупкого разрушения.

Время выдержки при нагреве под отпуск (с момента прогрева детали): низкий – 2,5...8 часов; средний – 1...2 часа; высокий – 0,5...1 час.

Режим охлаждения при отпуске незначительно влияет на свойства стали после отпуска.

Термическая обработка, состоящая из закалки и высокого отпуска, называется улучшением.

### Порядок выполнения работы

Выполнение лабораторной работы включает следующие занятия:

1. До термообработки определить твёрдость образцов заданной стали. По твёрдости определить микроструктуру образцов.
2. Исследовать влияние различных видов термической обработки на структуру стали и её свойства:
  - а) при различном нагреве (выше точки  $A_3$  и ниже точки  $A_1$ ) и постоянной скорости охлаждения (в одинаковой среде – воде);
  - б) при различной скорости охлаждения (в воде, масле, на воздухе) и постоянной температуре нагрева (выше точки  $A_3$  для доэвтектоидной и  $A_1$  для заэвтектоидной стали);
  - в) при различных температурах отпуска закалённой доэвтектоидной стали.
3. По изменению твёрдости сделать соответствующие выводы о влиянии температуры нагрева и скорости охлаждения на изменение структуры и механических свойств углеродистой стали.

### Содержание отчёта

В соответствии с полученными результатами заполнить табл.2, указав условия опыта и полученные данные.

*Таблица 2*

Марка стали	Вид термической обработки	Температура нагрева, °С	Время нагрева, $t_{об}$ , мин	Охлади-тель	Твёрдость,		Структура
					НВ	HRC	

Сделать общие выводы о закономерностях термической обработки.

Изучить сущность и назначение различных видов термической обработки.

Построить зависимость твердости стали от температуры отпуска (рис.5).

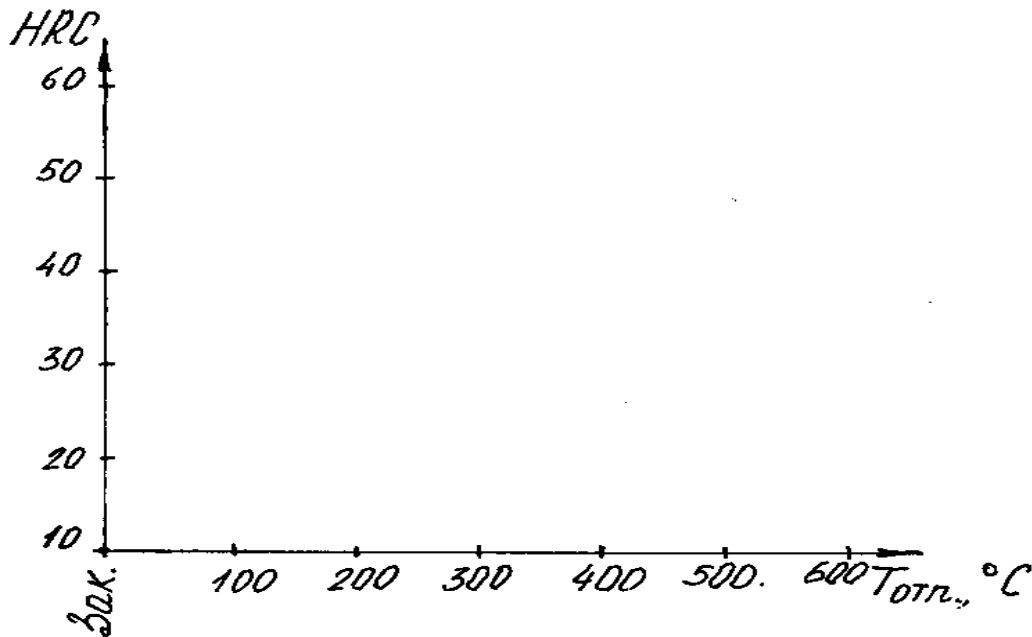


Рис. 5. Зависимость твердости закаленной стали от температуры отпуска

### Контрольные вопросы

1. Что такое термообработка и с какой целью она производится?
2. Перечислить основные операции термической обработки.
3. Что такое аустенит и при каких температурах для углеродистых сталей эта структура устойчива?
4. Что такое мартенсит и каковы его свойства?
5. Что такое критическая скорость закалки?
6. Какие структуры получаются при охлаждении стали, нагретой до аустенитного состояния со скоростью ниже критической?
7. Что такое троостит и сорбит и в чём их отличие?

8. При каких условиях из мартенсита получаются сорбит и троостит?
9. Дать определение и указать назначение процессов: закалки, отпуска, отжига, нормализации.
10. Перечислите разновидности отпуска и их назначение.
11. Два образца стали закалены на мартенсит, одному сделан отпуск на 500°С, другому на 300°С. Сравнить их механические свойства после отпуска.

### **Список рекомендуемой литературы**

- 1 Гуляев, А.П., Гуляев, А.А. Металловедение: Учебник для вузов [Текст]/ А.П. Гуляев, А.А. Гуляев, 7-е изд., перераб. и доп. М, ИД Альянс, 2011. – 644 с.
- 2 Материаловедение: учебник для вузов [Текст]/ Б.Н. Арзамасов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. Под общ. ред. Б.Н. Арзамасова, Г.Г. Мухина. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. – 648 с.
- 3 Материаловедение и технология металлов: учебник для вузов [Текст]/ Т.П. Фетисов, М.Г. Карпман, В.М. Матюнин и др. М.: Высш. шк., 2002. – 638 с.
- 4 Лахтин, Ю.М., Леонтьева, В.П. Материаловедение: учебник для вузов [Текст]/ Ю.М. Лахтин, В.П. Леонтьева, М.: Альянс, 2011. – 448 с.

**ПРИЛОЖЕНИЕ**  
**Механические свойства низко- и среднеуглеродистых сталей**  
**после термообработки**

Схема термообработки	Механические свойства стали					Структура после термообработки
	Твёрдость	Прочность	Упругость	Выносливость	Пластичность	
Отжиг (полный)	ОН	ОН	ОН	ОН	ОВ	Перлит + феррит
Нормализация	Н	Н	Н	Н	В	Перлит
Закалка	ОВ	Н	ОН	ОН	ОН	Мартенсит закалки
Закалка + низкий отпуск	В	ОВ	Н	Н	Н	Мартенсит отпуска
Закалка + средний отпуск	С	В	ОВ	ОВ	С	Троостит
Закалка + высокий отпуск	Н	С	С	С	В	Сорбит

Уровень свойств:

ОН - очень низкий; Н –низкий; С – средний; В – высокий; ОВ – очень высокий.

## Оглавление

1. Теоретические основы процессов термической обработки.....	3
2. Виды термической обработки.....	6
3. Проведение термической обработки.....	9
Порядок выполнения работы.....	13
Содержание отчета.....	13
Контрольные вопросы.....	14
Список рекомендуемой литературы.....	15
Приложение.....	16





