

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Калужский филиал федерального государственного бюджетного
образовательного учреждения высшего образования
«Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»
(национальный исследовательский университет)
(КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана)

Ю.Г. Головачёва, Н.С. Герасимова

ИЗУЧЕНИЕ МИКРОСТРУКТУРЫ И СВОЙСТВ УГЛЕРОДИСТЫХ СТАЛЕЙ В РАВНОВЕСНОМ СОСТОЯНИИ

Методические указания к выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Материаловедение»

Калуга
2019 г.

УДК 669.01

ББК 30.3

Г61

Данные методические указания издаются в соответствии с учебным планом для всех направлений и специальностей

Методические указания рассмотрены и одобрены:

Кафедрой «Материаловедение и химия» (М5-КФ)

протоколом № 4 от 19.11.19

Зав. кафедрой Шаталов д.т.н., профессор В.К. Шаталов

Методической комиссией факультета М - КФ

протоколом № 4 от 28.11.19

Председатель методической комиссии факультета М - КФ

Степанов к.ф.-м.н., доцент С.Е. Степанов

Методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана

протоколом № 3 от 03.12.19

Председатель методической комиссии филиала

Перерва д.э.н., профессор О.Л. Перерва

Рецензент: к.т.н., доц. кафедры «Сварка и диагностика»

Чернова Т.Г. Чернова

Авторы: Головачева ст. преподаватель Ю.Г. Головачева

Герасимова к.т.н., доц. Н.С. Герасимова

Аннотация

Методические указания содержат теоретические основы формирования микроструктуры сталей с различным содержанием углерода; сведения о свойствах фаз и структурных составляющих. Приведены справочные данные (ГОСТы) на углеродистые стали с указанием их химического состава, механических свойств и примерного назначения. Дан план выполнения работы и рекомендации оформлению отчёта

©КФ МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2019

©Головачева Ю.Г., Герасимова Н.С. 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ	4
1. ФАЗЫ И СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ НЕ БОЛЕЕ 2,14%С	5
2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО-ЦЕМЕНТИТ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ	6
3. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ	9
4. ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ	16
5. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ	17
6. ФОРМА ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ	17
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	18
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	18

ВВЕДЕНИЕ

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ

Железоуглеродистые сплавы – стали – важнейшие металлические сплавы современной техники. Диаграмма состояния железо – углерод дает основное представление о строении железоуглеродистых сплавов – сталей.

Начало изучения диаграммы железо – углерод было положено работой Д.К. Чернова. Он впервые указал на существование в стали критических точек и на зависимость их положения от содержания углерода. Тем самым, Чернов дал первое представление о диаграмме железо – углерод.

Впоследствии свои высказывания о влиянии углерода на положение критических точек Чернов изобразил графически, воспроизведя при этом очертания важнейших линий диаграммы. Д.К. Чернов определял положение критических точек на глаз, по цветам каления стали. Знаменитый французский исследователь Ф. Осмонд, воспользовавшись пирометром, определил положение критических точек, описал характер микроструктурных изменений при переходе через критические точки и дал названия основным структурам железоуглеродистых сплавов.

Образование твердых растворов при нагреве было замечено Робертс – Аустеном (Англия) и доказано с помощью прямого металлографического анализа Ле – Шателье (Франция), А.А. Байковым и Н.Т. Гудцовым (Россия).

Используя эти данные, а также разработанную Д. Гиббсом (Канада) теорию фазовых равновесий, голландский ученый Г. Розебум, а также Робертс – Аустен представили первый вариант диаграммы железо – углерод.

Нельзя предположить, что будут внесены изменения, которые преобразуют вид диаграммы, но количественные изменения, связанные с применением все более чистых сплавов и более точные методы исследования происходят непрерывно.

Цель работы: изучить закономерности формирования структур сталей в соответствии с диаграммой железо - цементит. Установить влияние углерода в сталях на их структуру и свойства. Ознакомиться с применением сталей и их маркировкой.

1. ФАЗЫ И СТРУКТУРЫ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ НЕ БОЛЕЕ 2,14%С

Твёрдыми фазами в железоуглеродистых сплавах являются: феррит, аустенит, цементит. Они могут играть роль самостоятельных структурных составляющих или входить в состав смеси-перлита.

Феррит – это ограниченный твёрдый раствор внедрения углерода в $\alpha - Fe$. Он имеет решётку ОЦК, растворимость углерода в которой весьма мала и зависит от температуры. При $t = 727^\circ C$ она составляет 0,02%С, а при $t = 25^\circ C - 0,006\% C$. Феррит – мягкая и пластичная, но малопрочная фаза.

Аустенит – это ограниченный твёрдый раствор внедрения углерода в $\gamma - Fe$, имеющий решётку ГЦК. Растворимость углерода в $\gamma - Fe$ при $t = 1147^\circ C$ составляет 2,14%С, а при $t = 727^\circ C - 0,8\% C$. Ниже $t = 727^\circ C$ аустенит не может существовать. Аустенит пластичен, более твёрд и прочен чем феррит.

Цементит – это химическое соединение Fe и $C - Fe_3C$ (карбид железа), имеет сложную кристаллическую решётку и содержит 6,67%С. Цементит – твёрдая и хрупкая фаза.

Перлит – эвтектоидная смесь кристаллов феррита и цементита, содержащая 0,8%С. Перлит может иметь пластинчатое или зернистое строение и является достаточно прочной структурной составляющей.

В таблице 1 приведены механические свойства структурных составляющих.

Таблица 1

Механические свойства структурных составляющих

Структурные составляющие	σ_s кгс/мм ² ($\times 10$ МПа)	δ %	НВ кгс/мм ² ($\times 10$ МПа)
Аустенит	–	40 - 50	150 - 180
Феррит	20 - 30	30 -	60 - 90

		40	
Цементит	3	0	750 - 800
Перлит пластинчатый	86 - 90	9 - 12	190 - 230
Перлит зернистый	65 - 70	18 - 25	160 - 190

2. ДИАГРАММА СОСТОЯНИЯ ЖЕЛЕЗО-ЦЕМЕНТИТ И СТРУКТУРА СПЛАВОВ.

Пользуясь диаграммой состояния железо-цементит (рис.1) можно определить, какие превращения происходят в сплавах при нагреве и охлаждении и какую структуру они будут иметь при комнатной температуре в равновесном состоянии.

Сплавы, содержащие менее 0,02%С, называют техническим железом; если $0,02 < \%C \leq 2,14$, то такие сплавы называют сталями. Стали, в свою очередь, по структуре подразделяют на доэвтектоидные (менее 0,8%С), эвтектоидные (около 0,8%С) и заэвтектоидные (более 0,8%С).

Первичная кристаллизация сплавов и высокотемпературное аллотропическое превращение $\alpha \rightarrow \delta$ в некоторых из них приводит к тому, что ниже линии *NJE* все сплавы имеют структуру аустенита. При дальнейшем охлаждении в сплавах происходит перекристаллизация, вызванная превращением аустенита в феррит, или выделением из аустенита кристаллов цементита, вызванное снижением растворимости углерода в γ - железе при понижении температуры.

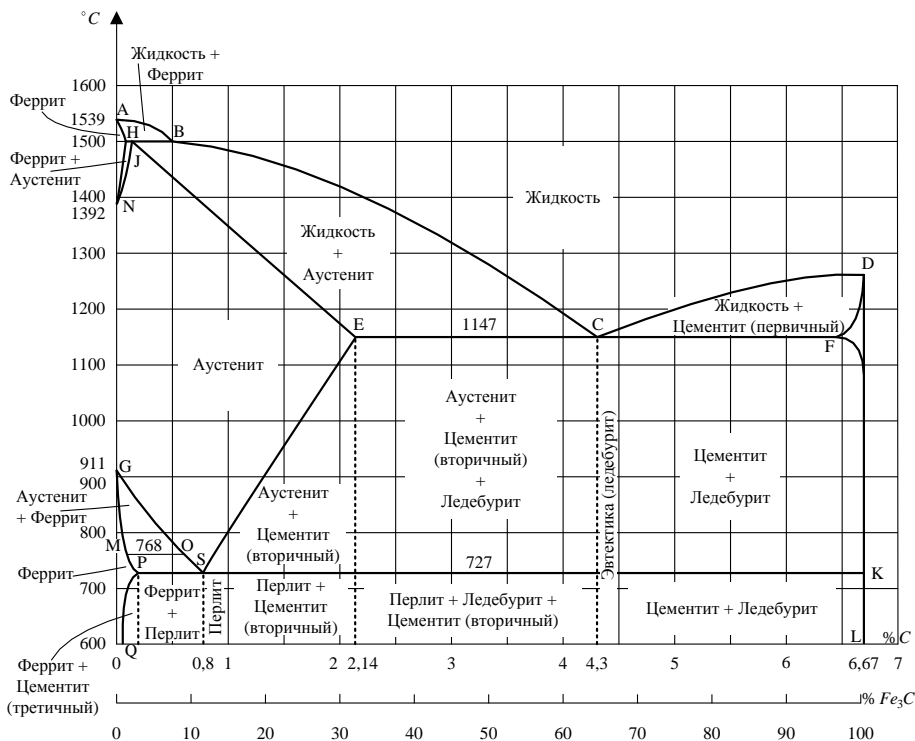


Рис. 1. Диаграмма состояния железо-цементит

Техническое железо после перекристаллизации получает однофазную структуру феррита. Такая структура зернистого (полиэдрического) строения в сплавах, содержащих не более 0,006%С, может сохраняться до комнатной температуры. В техническом железе, содержащем более 0,006%С, при охлаждении из феррита выделяется небольшое количество цементита (третичного). Это выделение вызвано снижением растворимости углерода в α -железе. Третичный цементит располагается преимущественно по границам зёрен феррита, понижая технологическую пластичность сплавов и его магнитные свойства.

Все стали при температуре 727°C (линия PSK) претерпевают эвтектоидное превращение, заключающееся в распаде аустенита на феррито-цементитную смесь – перлит ($A_s \rightarrow П[Fe_3C + \Phi]$). В

доэвтектоидных сталях этому превращению предшествует аллотропическое превращение аустенита в феррит. Только после этого оставшийся аустенит превращается в перлит. Окончательная структура стали состоит из [феррита](#) и перлита (рис.2а) По мере увеличения содержания углерода в доэвтектоидных сталях количество перлита в их структуре возрастает, а количество феррита снижается. При содержании углерода 0,8% (эвтектоидная сталь) структура состоит из одного перлита (рис.2б).

[Перлит](#) может иметь пластинчатое или зернистое строение. Строение перлита можно отчётливо различить только при увеличении более, чем 500 раз. При меньших увеличениях перлит имеет вид тёмных зёрен неоднородного строения. В заэвтектоидной стали образованию перлита предшествует выделение из аустенита кристаллов вторичного цементита. Это вызвано уменьшением растворимости углерода в аустените в соответствии с линией *ES* диаграммы. За счёт выделения вторичного [цементита](#) концентрация углерода в аустените снижается до 0,8% , обеспечивая возможность протекания эвтектоидного превращения. Таким образом, окончательная структура стали ниже линии *PSK* будет состоять из перлита и цементита. Вторичный цементит присутствует в ней в виде мелких зёрен или в виде светлой сетки по границе зёрен перлита (рис.2в). Количество вторичного цементита в структуре заэвтектоидных сталей возрастает с увеличением содержания углерода.

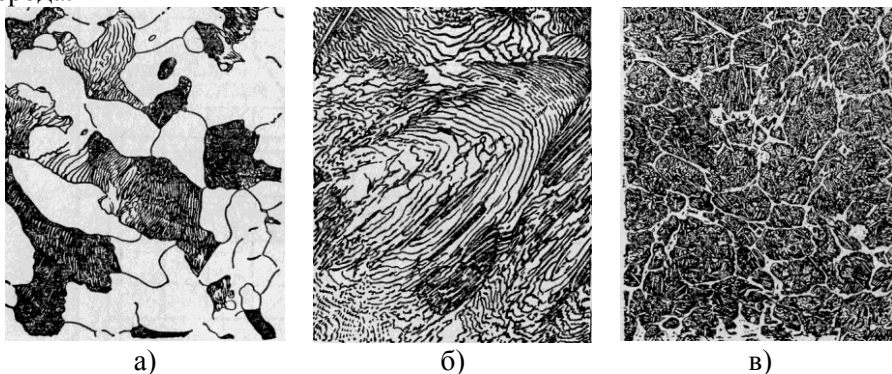


Рис. 2. Микроструктура стали:

а – доэвтектоидная сталь – феррит (светлые участки) и перлит (тёмные участки), $\times 500$;

б – эвтектоидная сталь – перлит, $\times 1000$;

в – заэвтектоидная сталь – перлит и цементит (в виде сетки), $\times 200$

По микроструктуре доэвтектоидной стали можно примерно определить площадь, занимаемую кристаллами перлита (в процентах). Допуская, что чистый перлит содержит $0,8\%C$, а феррит практически не содержит его, составляют и решают пропорцию:

$0,8\%C - 100\% \text{ перлита}$

$x\%C - F_n\% \text{ перлита}$,

где F_n – площадь, занимаемая перлитом в структуре в процентах.

Откуда содержание углерода в стали определяется по формуле:

$$\%C = \frac{F_n \times 0,8}{100} \%$$

Определение содержания углерода по микроструктуре в заэвтектоидной стали представляет трудности, ввиду того, что часть углерода находится в виде цементита, а для определения его количества в структуре необходимо пользоваться специальными методами.

3. СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ СПЛАВОВ

От структуры сплавов зависят их свойства, а следовательно, и область применения. Техническое железо имеет хорошие технологические свойства (легко куётся, штампуются, сваривается), но прочность его невелика. Оно используется в основном как магнитный материал в приборостроении.

Доэвтектоидные стали в большинстве своём являются конструкционными материалами, применяемыми для изготовления различных конструкций, а также деталей машин и приборов. Они выпускаются обыкновенного качества и качественными. Увеличение содержания углерода в них сопровождается повышением твёрдости и прочности, снижением пластичности. Это связано с увеличением количества перлита и уменьшением количества феррита в структуре.

Стали, близкие по составу к эвтектоидным используются в основном как инструментальные. Они выпускаются качественными и высококачественными. С повышением содержания углерода увеличиваются их твёрдость и износостойкость. Это изменение

свойств связано с появлением в структуре избыточного цементита и увеличением его количества.

В таблицах 2, 3, 4, 5, приведены справочные данные на техническое железо и углеродистые стали с указанием их химического состава, механических свойств и примерного назначения.

Таблица 2
Химический состав, свойства и назначение железа

Материал	Хим. состав примесей, не более, %						Механические свойства			Назначение
	<i>C</i>	<i>Si</i>	<i>Mn</i>	<i>S</i>	<i>P</i>	$\sigma_s, \text{ кгс/мм}^2$ ($\times 10 \text{ МПа}$)	$\delta, \%$	$HV, \text{ кгс/мм}^2$ ($\times 10 \text{ МПа}$)		
Техническое железо (Армко)	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	25-30	35-40	90-120	Магнитопроводы (сердечники реле, трансформаторов, измерительных приборов), работающие при постоянном и слабопульсирующем токе	
Электро- литическое железо	0,004	0,002	0,002	0,003	0,003	20-25	40-45	60-70		

Таблица 3

Содержание углерода (ГОСТ 380-94), механические свойства (ГОСТ 535-88) и применение конструкционных сталей обыкновенного качества

Марка стали	% C	σ_e , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа не менее	δ , %		$KCU_{20^\circ C}$ МДж/м ²	Применение
				не менее			
Ст0	≤0,23	≥310	–	20		–	Используются для изготовления металлоконструкций (сварные фермы, рамы) слабонагруженных деталей машин и приборов обеспечивающих жёсткость конструкции
Ст1	0,06÷0,12	320÷420	–	31		–	
Ст2	0,09÷0,15	340÷440	–	29		0,9÷1,1	
Ст3	0,14÷0,22	380÷490	255	26		0,7÷1,0	
Ст4	0,18÷0,27	410÷530	265	24		–	
Ст5	0,28÷0,37	490÷630	295	20		–	
Ст6	0,38÷0,49	≥590	315	15		–	

Примечание. В кипящих сталях Ст1кп – Ст4кп значение σ_e на 10÷20МПа, $\sigma_{0,2}$ на 10МПа меньше, а δ на 1% больше, чем в приведенных сталях тех же марок. Стали маркируются сочетанием букв «Ст» и цифрой, показывающей номер стали по ГОСТу.

Таблица 4
Свойства углеродистых качественных сталей в нормализованном состоянии (ГОСТ 1050-88)

Марка стали	% C	σ_e	$\sigma_{0,2}$	δ	ψ		HB	КСУ, МДж/м ²	Назначение
					%				
08	0,05 ÷ 0,12	330	200	33	60		131	–	Детали, изготавливаемые холодной штамповкой из листа (кузова автомобилей, корпуса приборов), а также шайбы, крышки и др.
10	0,07 ÷ 0,14	340	210	31	55		143	–	Детали, изготавливаемые холодной штамповкой, а также втулки, ушки, держатели и др. детали, упрочняемые цементацией и цианированием
15	0,12 ÷ 0,19	380	230	27	55		149	–	Детали ответственного назначения: крепёж, валики, оси, вилки, рычаги
20	0,17 ÷ 0,24	420	250	25	55		163	–	Детали ответственного назначения: втулки, вкладыши, рычаги. Цементуемые и цианированные детали: болты, гайки и др.
25	0,22 ÷ 0,3	460	280	23	50		170	0,9	Оси, валики, муфты, болты, винты, шайбы, фланцы и др.

Таблица 4
Продолжение

Марка стали	% C	σ_e		δ	ψ	НВ	КСУ, МДж/м ²	Назначение
		$\sigma_{0,2}$	МПа					
30	0,27 ÷ 0,35	300	500	21	50	179	0,8	Детали, не испытывающие больших напряжений (тяги, серьги, оси, звёздочки, диски, шпиндели, болты, гайки, шайбы)
35	0,32 ÷ 0,4	320	540	20	45	207	0,7	
40	0,37 ÷ 0,45	340	580	19	45	217 (187)*	0,6	Шатуны, шестерни, оси, валы, шпонки, фланцы
45	0,42 ÷ 0,5	360	610	16	40	229 (197)*	0,5	
50	0,47 ÷ 0,55	380	640	14	40	241 (207)*	0,4	Детали, более высокой прочности: небольшие валы, шатуны, зубчатые колёса, маховики, оси и другие детали, испытывающие циклические нагрузки
55	0,52 ÷ 0,6	390	660	13	35	255 (217)*	–	
60	0,57 ÷ 0,65	410	690	12	35	255 (229)*	–	

* В скобках указано значение после отжига.

Примечания:

- 1 – В сталях допускается не более 0,8% Mn, 0,37% Si, 0,045% S, 0,035% P, 0,25% Cr, 0,30% Cu, 0,08% As.
- 2 – Механические свойства указаны для стальных заготовок с поперечным сечением до 80 мм.
- 3 – Ударная вязкость сталей 25-50 определяется после улучшения – закалки и высокого отпуска при 600°С

Таблица 5

Сталь углеродистая инструментальная качественная (ГОСТ 1435-90)

Марка стали	Химический состав, %			HV после отжига на зернистый перлит (кгс/мм ²)	Назначение
	C	Mn	Si		
У7	0,65 ÷ 0,74	0,20 ÷ 0,40	0,15 ÷ 0,35	197	Для инструмента подвергающегося ударам: зубила, штампы, молотки, долота
У8	0,75 ÷ 0,84	0,20 ÷ 0,40	0,15 ÷ 0,35	197	Для инструмента подвергающегося ударам: штампы, матрицы, пуансоны, пробойники, слесарный инструмент, пилы, зубила
У9	0,85 ÷ 0,94	0,15 ÷ 0,35	0,15 ÷ 0,35	201	Столярный инструмент, керны, зубила
У10	0,95 ÷ 1,04	0,15 ÷ 0,35	0,15 ÷ 0,35	207-212	Режущий и измерительный инструмент: резцы, свёрла, фрезы, метчики, калибры, плитки.
У11	1,05 ÷ 1,14	0,15 ÷ 0,35	0,15 ÷ 0,35	207-212	Небольшие штампы холодной высадки и вытяжки, работающие при невысоких нагрузках
У12	1,15 ÷ 1,24	0,15 ÷ 0,35	0,15 ÷ 0,35	207-212	Режущий и измерительный инструмент
У13	1,25 ÷ 1,35	0,15 ÷ 0,35	0,15 ÷ 0,35	217	Резцы по твёрдому металлу, бритвы, гравировальный инструмент

Примечание: В сталях допускается не более 0,03% S и 0,035% P.

Буква «У» в марке показывает, что сталь углеродистая, а цифра – среднее содержание углерода в десятых долях процента (ГОСТ 1435-90). В высококачественной стали в конце марки ставится буква «А», например У10А, содержание серы и фосфора в таких сталях не более 0,18% S и 0,025% P.

4. ЗАДАЧИ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

Задачи по выполнению работы:

- изучить под микроскопом структуру углеродистых сталей и определить процент углерода для одного образца, сравнить с ГОСТом.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить диаграмму состояния железо-цементит (стальную часть). Рассмотреть процесс кристаллизации сталей и особенности их состава и структуры.
2. Исследовать под микроскопом ($\times 240$) структуру заданных сталей. Определить процент содержания структурных составляющих в доэвтектоидных сталях.
3. Для одного образца (по заданию) определить процент углерода, сравнить с ГОСТом.
4. На диаграмме железо-углерод провести вертикальные линии, соответствующие составу изученных сталей, проставить все критические точки.
5. Построить кривые охлаждения для заданных преподавателем двух марок сталей (доэвтектоидной и заэвтектоидной). Указать все превращения и структуры при 25°C .
6. Заполнить таблицу №6 (Химический состав, свойства, применение сталей).

Таблица 6

Углеродистые качественные стали

Марка	%C по ГОСТ	Механические свойства			Назначение
		σ_s , МПа	δ , %	НВ, кгс/мм ² ($\times 10$ МПа)	
Машиностроительные (конструкционные)					
10					
45					
Инструментальные					
У7					
У8					
У10					

Примечание:

1. Стали конструкционные поставляются в нормализованном состоянии, а инструментальные в отожжённом.
2. В углеродистых сталях содержится не более 0,04% серы, 0,035% фосфора, 0,8% марганца, 0,37% кремния.

5. СХЕМА И ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

1. Металлографический микроскоп МИМ-7.
2. Коллекция микрошлифов сталей с разным содержанием углерода.
3. Диаграмма железо-цементит.
4. Фотографии и схематическое изображение микроструктур сталей с разным процентом углерода.

6. ФОРМА ОТЧЁТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Содержание отчета:

1. Титульный лист;
2. Цели и задачи лабораторной работы;
3. Схемы микроструктур с указанием увеличения микроскопа и процентного содержания структурных составляющих.
4. Подсчёт процентного содержания углерода в одной из марок доэвтектоидной стали. Сравнение полученного содержания углерода с ГОСТом и вывод о правильности подсчёта.
5. Сведения (в виде таблицы №6) о химическом составе, основных механических свойствах, применении изученных марок сталей.
6. Кривые охлаждения доэвтектоидных и заэвтектоидных сталей с указанием всех превращений и структуры при 25°C .
7. Выводы по работе должны содержать:
 - анализ зарисованных схем микроструктур сталей (описание изменения структуры с увеличением содержания углерода);
 - на основании данных ГОСТа по основным механическим свойствам установить, как и почему изменяются механические свойства с увеличением процента углерода.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение сталям.
2. Рассмотрите вторичные превращения, происходящие в сталях.
3. Дайте полную характеристику фазам стали (феррит, аустенит, цементит).
4. Дайте характеристику перлита.
5. Рассмотрите стали с доэвтектоидной структурой.
6. Опишите влияние углерода на структуру и свойства доэвтектоидных сталей.
7. Опишите влияние углерода на структуру и свойства заэвтектоидных сталей.
8. Рассмотрите принцип маркировки строительных, машиностроительных и инструментальных углеродистых сталей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Богодухов, С.И. Курс материаловедения в вопросах и ответах: Учебные пособия / С.И. Богодухов, А.В. Синюхин, Е.С. Козик. — М.:Машиностроение, 2014. — 352 с. — URL: <http://e.lanbook.com/book/63212>.
2. Сапунов, С.В. Материаловедение.— СПб. : Лань, 2015. — 208 с. — URL: <http://e.lanbook.com/book/56171>.
3. Турилина В.Ю. Материаловедение. Механические свойства металлов. Термическая обработка металлов. Специальные стали и сплавы. Из-во МИСИС, 2013. -154 с. - URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=47489

