

УДК 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПОСЛЕ РАЗЛИЧНЫХ ВИДОВ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ

Ю. В. Фиошина, А. В. Кириллова

В данной работе проводится исследование различных видов термической обработки на структуру и свойства углеродистой стали 45. Был проведен фазовый и структурный анализ диаграммы состояния «железо-углерод», определены основные фазы и структуры. Исследование заключалось в изучении микроструктуры стали после неполной и полной закалок при разных температурах с охлаждением в различных средах: вода, масло, воздух. Изучение структуры также проходило после низкого, среднего и высокого отпуска. Проведены механические испытания на твердость по методу Роквелла после всех видов обработки по разным шкалам прибора. Была выявлена зависимость структуры стали от температуры нагрева и скорости охлаждения.

Ключевые слова: диаграмма состояния, микроструктура, закалка, отпуск, твердость.

В данной работе исследовалась структура углеродистой стали 45 после различных видов термической обработки. Углеродистая сталь – это сплав железа с углеродом, при содержании углерода до 2,14%. Сталь 45 – это конструкционная углеродистая качественная сталь. Химический состав стали 45 приведен в таблице 1.

Основными фазами в сталях является:

аустенит – твердый раствор внедрения углерода в γ -железе, с гране-центрированной кубической кристаллической решеткой, феррит – твердый раствор внедрения углерода в α -железе, с объемно-центрированной кубической кристаллической решеткой. Таким образом, в стали происходит полиморфное превращение – это изменение типа кристаллической решетки в одном и том же металле.

Таблица 1

Химический состав стали 45 по элементам в %

C	Si	Mn	Ni	S	P	Cr	Cu	As	Fe
0,42 - 0,5	0,17 - 0,37	0,5 - 0,8	до 0,25	до 0,04	до 0,035	до 0,25	до 0,25	до 0,08	~97



Рис. 1. Структура стали 45 в равновесном состоянии

© Фиошина Ю. В., Кириллова А. В., 2020.

Фиошина Юлия Владиславовна (finoshina2001@bk.ru), студент I курса института ракетно-космической техники;

Кириллова Анна Викторовна (avkirillova76@mail.ru), старший преподаватель кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения Самарского университета, 443086, Россия, г. Самара, Московское шоссе, 34.

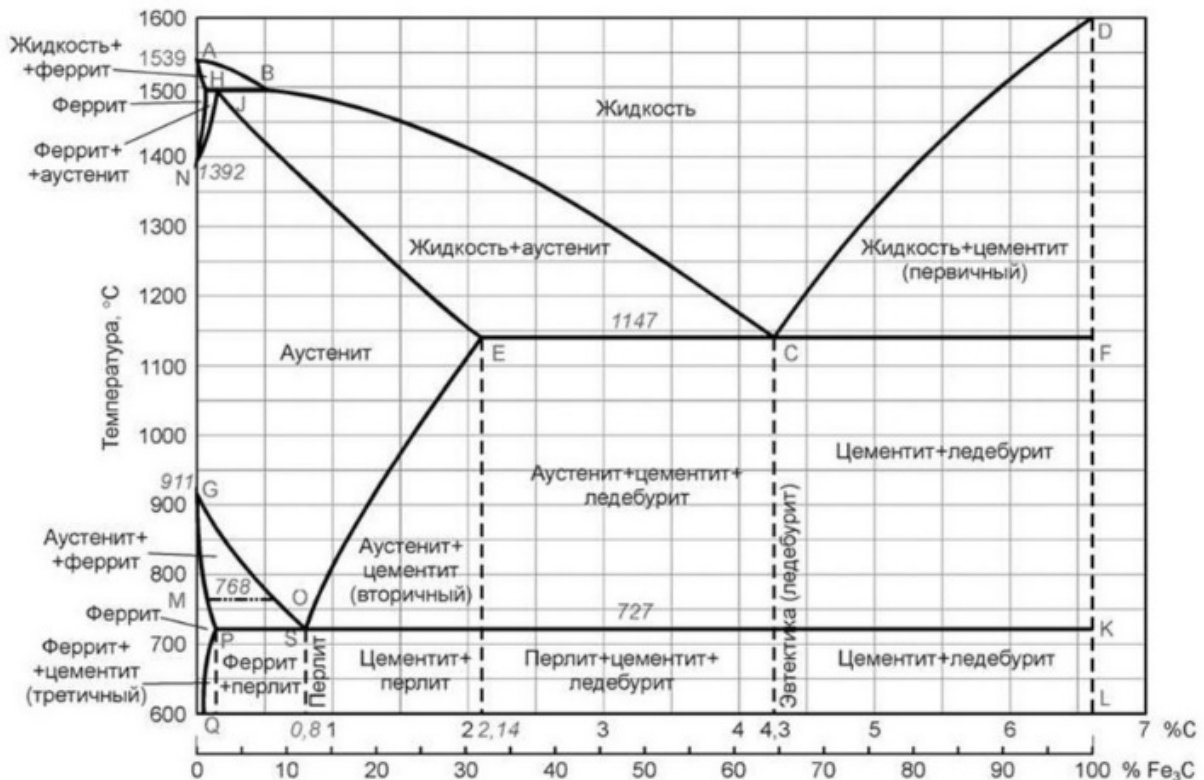


Рис. 2. Диаграмма состояния «железо-углерод»

В структуре стали также присутствуют перлит – это механическая смесь твердого раствора феррита и химического соединения цементита и цементит – химическое соединение, соответствующее формуле Fe_3C . По структуре стали бывают доэвтектоидные, эвтектоидные и заэвтектоидные [1]. Сталь 45 является доэвтектоидной и ее структура представляет собой – феррит и перлит (рис.1).

Структура стали 45 в равновесном состоянии соответствует диаграмме состояния «железо-углерод», которая графически описывает все фазовые и структурные превращения в сталях (рис.2).

После оценки структуры в равновесном состоянии образцы стали 45 были подвергнуты различным режимам термической обработки. Термическая обработка – это эффективный метод теплового воздействия по заданным режимам с целью изменения в желаемом направлении механических, физических свойств и структуры сплавов. Для сталей проводят следующие виды термической обработки: отжиг, нормализация, закалка с полиморфным превращением и отпуск [2].

Так как в стали происходит структурное превращение, то режимы термической обработки зависят от температур этих

превращений, которые называются критическими точками и соответствуют линии PSK – критическая точка A_{c1} и линия GSE – критическая точка A_{c3} .

Отжиг – термическая обработка, направленная на получения в стали равновесной структуры, может быть полный или не полный, заключается в нагреве стали выше критических точек A_{c1} и A_{c3} и последующем медленном охлаждении.

Диффузионный отжиг (гомогенизация) – устраняет химическую ликвацию по объему кристалла в крупных отливках.

Рекристаллизационный отжиг – снимает наклеп и внутренние напряжения в стали после холодной обработки давлением, что приводит к снижению твердости и росту пластичности.

Нормализация – это нагрев стали выше критической точки A_{c3} и охлаждение на спокойном воздухе.

Закалка с полиморфным превращением – упрочняющая операция, заключается в нагреве выше критических точек A_{c1} и A_{c3} .

Отпуск – операция, заключающаяся в нагреве закаленной стали до температур ниже критической A_{c1} .

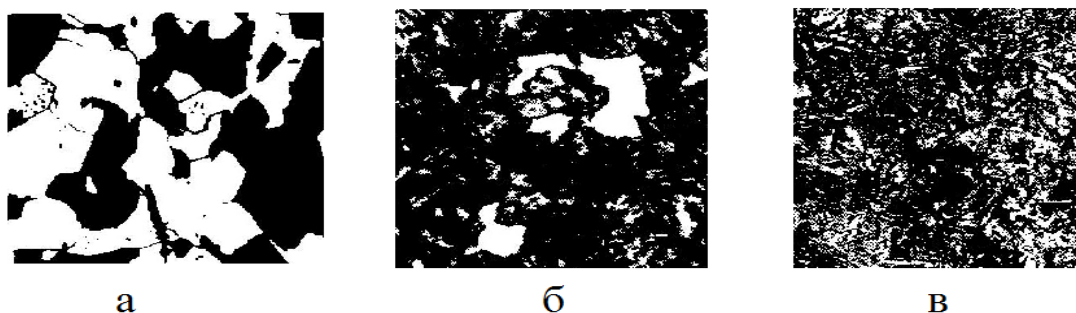


Рис. 3. Структура стали после нагрева последующего охлаждения в воде:
а – структура перлит и феррит; б – структура мартенсит и феррит;
в – структура мартенсит

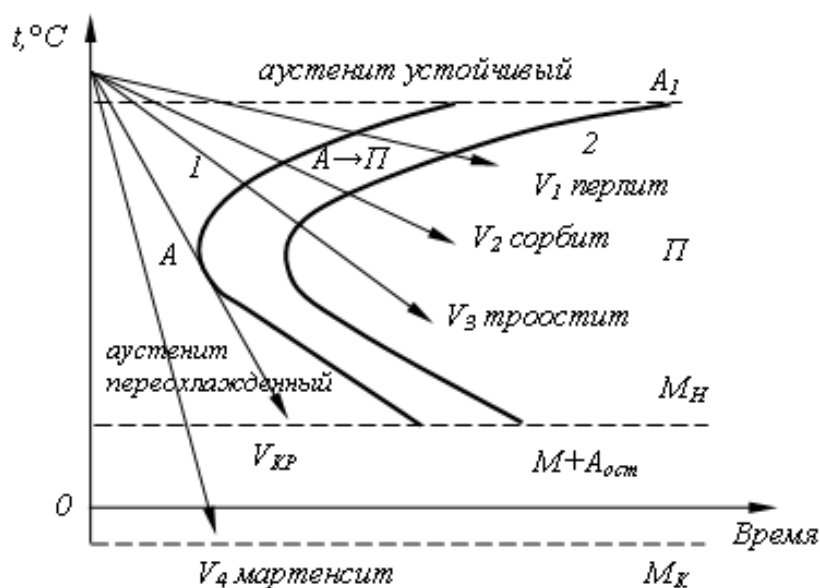


Рис. 4. Диаграмма изотермического распада аустенита

Для исследования влияния термообработки на структуру стали выбрали три температуры нагрева: 700 °С, 750 °С, 850 °С. В качестве охлаждающей среды использовали вода, масло и воздух.

При нагрев стали до 700 °С не превышает температуры критической точки A_{c1} , следовательно ни каких структурных превращений не происходит и структура остается исходной – перлит и феррит. При нагреве выше температуры 750 °С происходит не большой перенагрев выше критической точки A_{c1} , что соответствует не полной закалке стали, структура стали представляет собой мартенсит и феррит. Нагрев до 850 °С превышает температуру точки A_{c3} – получается полная закалка, что соответствует структуре мартенсита. Для закалки стали использовали электрические печи типа СНОЛ 12/16.

Охлаждение во всех случаях проходило в воде.

Микроструктурное исследование стали проходило в лабораториях кафедры «Технологии металлов и авиационного материаловедения» Самарского университета на металлографическом микроскопе МЕТАМ РВ34. Структура стали после закалки с различных температур и охлаждением в воде представлена на рисунке 3.

Структуры, получаемые при термической обработке, зависят от скорости распада аустенита. Скорость охлаждения зависит от структуры, которую необходимо получить при распаде аустенита, и обеспечивается подбором соответствующих охладителей: вода, минеральное масло, воздух, печь. Кинетика процесса, свойства и строение продуктов распада аустенита тесно связаны со степенью

переохлаждения ниже A_{c1} и A_{c3} ; степень устойчивости переохлажденного аустенита и разностью его более высокой свободной энергии и энергии продуктов распада. Указанную зависимость представляют в виде диаграммы изотермического превращения аустенита данной стали – С-образная кривая (рис. 4).

Диаграмма изотермического распада позволяет проследить превращение переохлажденного аустенита в интервале температур от критической точки A_{c1} до температуры начала мартенситного M_n , а также его превращение при непрерывном охлаждении с большими скоростями в интервале температур M_n - M_k [3].

В верхнем интервале температур продуктом изотермического превращения аустенита при температуре 720–657 °С является – перлит, при 657–600 °С – сорбит, при 600–550 °С – тростит (при охлаждении в масле). При критической скорости охлаждения (касательная к первой С-образной кривой), образуется структура мартенсита (при охлаждении в воде).

Для снятия напряжений после закалки стали для повышения вязкости и пластичности проводят отпуск. При отпуске протекают процессы, приводящие сталь в равновесное состояние, что будет достигаться выделением углерода из мартенсита и остаточного аустенита. Данный процесс делится на 3 стадии:

- первая стадия распада при отпуске заключается в выделении углерода из мартенсита, по этому наряду с твердым раствором исходной концентрации по углероду, в котором не произошло выделения карбидов, появляется мартенсит, содержащий значительно меньше углерода (0,25-0,35%), поэтому эта

стадия распада называется двухфазной;

- на второй стадии отпуска основным процессом является распад остаточного аустенита. Он в основных чертах аналогичен бейнитному превращению. Но в данном случае продуктом распада остаточного аустенита является смесь, состоящая из пересыщенного α -твердого раствора и карбидной фазы;

- к началу третьего превращения фазовый состав состоит из отпущенного малоуглеродистого мартенсита и пластинок цементита. При третьем превращении происходит полный дораспад мартенсита (содержание углерода в нем становится равным 0,01 %, т.е. равным содержанию углерода в равновесном феррите) и подрастание (коагуляция) цементитных пластин, благодаря чему уменьшаются внутренние напряжения.

Отпуск закаленной стали проходил при трех температурах: 200 °С, 400 °С, 600 °С, которые соответствуют низкому, среднему и высокому отпуску. Структуры стали после отпуска представлены на рисунке 5.

Увеличение скорости нагрева при отпуске смещает температуру начала всех превращений вверх по температурной шкале, что связано с тем, что превращения при отпуске – диффузионные и при очень быстром нагреве не успевают пройти до конца. Отпуск при 350–500 °С приводит к образованию структуры троостита, а при 500–600 °С – структуру сорбита.

Свойства стали после различных видов термической обработки, характеризуются показателями твердости. Твердость – это способность материала сопротивляться внедрению в него другого более твердого тела – индентора.

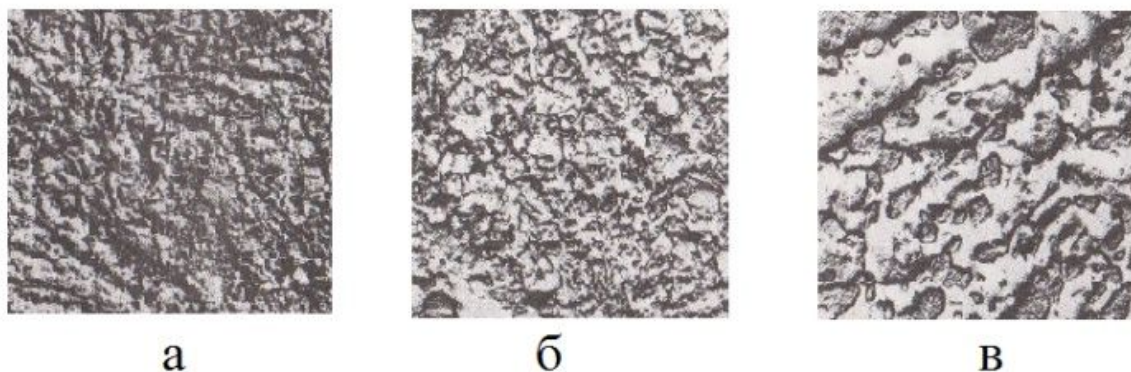


Рис. 5. Структура стали после отпуска: а – низкий отпуск – мартенсит; б – средний отпуск – тростит; в – высокий отпуск – сорбит

Таблица 2

Твердость стали 45 после различных видов термической обработки

Вид термо-обработки	№ образца	Температура, °С	Охлаждающая среда	Твёрдость	
				По Роквеллу	По Бринеллю
закалка	1	700	Вода	HRB 86	HB 170
	2	750	Вода	HRC 54	HB 532
	3	850	Вода	HRC 60	HB 600
	4	850	Масло	HRC 43	HB 367
	5	850	Воздух	HRB 88	HB 179
отпуск	1	200	Вода	HRC 56	HB 587
	2	400	Вода	HRC 38	HB 380
	3	600	Вода	HRC 25	HB 248

В зависимости от вида индентора используют различные способы замера твердости: Бринелль, Роквелл, Виккерс [2]. В наших исследованиях применялся замер твердости по Роквеллу. Измерения твердости также проходили в лабораториях самарского университета на приборе твердомер стационарный NOVOTEST ТС-БР. Для замера твердости использовали две шкалы: В – индентор стальной закаленный шарик, С – индентор алмазный конус. Значения твердости после разных видов термической обработки представлены в таблице 2.

Заключение

Таким образом, по проделанной работе можно сделать следующие выводы, что структура и свойства стали после термической обработки зависит, от следующих параметров:

- время нагрева и выдержки;
- максимальная температура нагрева;
- скорость охлаждения.

Соответственно, чем выше температура закалки стали и выше скорость охлаждения, тем выше твердость. Наибольшая твердость

получается при максимальной температуре нагрева и критической скорости закалки, что соответствует игольчатой структуре – мартенсит. Нагрев при отпуске способствует изменению пластических свойств закаленной стали, чем выше температура отпуска, тем ниже твердость, выше вязкость и пластичность.

Рекомендуемыми режимами термической обработки, при которых наблюдается оптимальное сочетание прочностных и пластических свойств – полная закалка, с последующим высоким отпуском. Такая последовательность термических обработок называется улучшение, а структура стали – сорбит.

Литература

1. Основы материаловедения (металлообработка) / В. Н. Заплатин, Ю. И. Сапожников, А. В. Дубов [и др.]. М.: Академия, 2017. 272 с.
2. Гуляев А. П., Гуляев А. А. Металловедение. М.: Альянс, 2012 643 с.
3. Арзамасов В. Б., Черепухин А. А. Материаловедение. М.: Экзамен, 2009. 350с.

STUDY OF THE CARBON STEEL STRUCTURE AFTER DIFFERENT TYPES OF HEAT TREATMENT

U. V. Finoshina, A. V. Kirillova

In this paper, we study various types of heat treatment on the structure and properties of carbon steel 45. A phase and structural analysis of the iron-carbon state diagram was carried out, and the main phases and structures were determined. The study consisted in studying the microstructure of steel after incomplete and complete hardening at different temperatures with cooling in various environments: water, oil, air. The study of the structure also took place after low, medium and high holidays. Rockwell mechanical tests were carried out after all types of processing on different scales of the device. The dependence of the steel structure on the heating temperature and cooling rate was revealed.

Key words: state diagram, microstructure, hardening, tempering, hardness.

Статья поступила в редакцию 08.07.2020 г.

© Finoshina Yu. V., Kirillova A. V., 2020.

Finoshina Yuliya Vladislavovna (finoshina2001@bk.ru), student I course of the Institute of Space Rocket Engineering;
Kirillova Anna Viktorovna (avkirillova76@mail.ru), senior lecturer
of the Department of metal technology and aviation materials of the Samara University,
443086, Russia, Samara, Moskovskoye Shosse, 34.