

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра металлорежущих станков и инструментов

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплинам «**Материаловедение**»,
«**Основы материаловедения**» для обучающихся
технических специальностей и направлений подготовки

Составитель С. В. Лащинуна

Утверждены на заседании кафедры
Протокол № 8 от. 31.01.2020

Рекомендованы к печати
учебно-методической комиссией
направления подготовки 15.03.05

Протокол № 9 от 03.02.2020
Электронная копия находится
в библиотеке КузГТУ

Кемерово 2020

Цель работы – изучение влияния термической обработки на механические свойства сталей. Приобретение навыков проведения операций термической обработки: закалки, отпуска и нормализации сталей.

Содержание работы – студенты по заданию преподавателя выбирают режимы нескольких операций термообработки для заданных марок сталей, выполняют эти операции на практике, контролируя изменения твердости, анализируют полученные результаты.

1. КРАТКИЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Термической обработкой называется совокупность операций нагрева, выдержки и охлаждения твердых металлических сплавов с целью получения заданных свойств за счет изменения внутреннего строения и структуры. Различают следующие виды термической обработки:

- отжиг I рода (без фазовой перекристаллизации);
- отжиг II рода (с фазовой перекристаллизацией);
- закалка;
- отпуск.

Отжигу подвергаются литые и кованные заготовки деталей машин с целью: снижения твердости и уровня внутренних напряжений, улучшения обрабатываемости резанием; получения однородных устойчивых структур, обеспечивающих повышение пластичности и вязкости изделий; подготовки структуры стали к последующей закалке.

Закалка и отпуск предназначены для формирования структуры и свойств металла, наиболее отвечающих требованиям условий службы готовых деталей; их принято считать операциями окончательной термообработки.

Структуры сталей после предварительной термообработки соответствуют структурам, показанным на участке диаграммы Fe–Fe₃C (рис. 1), с механическими свойствами некоторых марок сталей, с равновесными структурами студенты ознакомились на предыдущих лабораторных занятиях.

На диаграмме (см. рис. 1) показаны температуры фазовых превращений (критические точки) A_1 , A_3 , A_{cm} , которые используются при выборе температурно-временного режима конкретной операции термообработки.

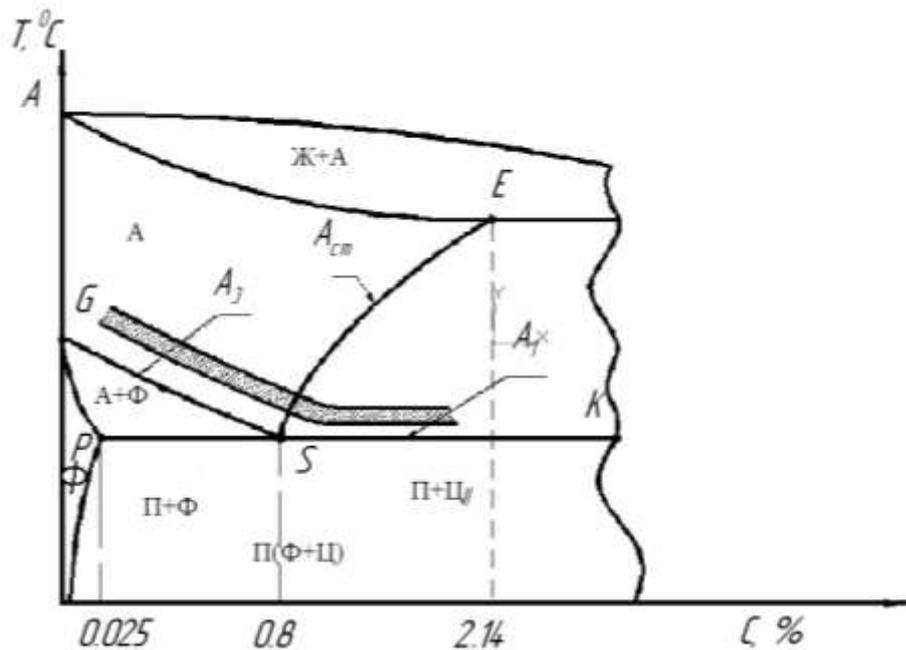
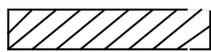


Рис. 1. Диаграмма состояния Fe–Fe₃C:



- температуры нагрева для отжига П рода и закалки

Эти критические точки, обозначаются при нагреве дополнительным индексом «с», а при охлаждении индексом «г», лежат на линиях диаграммы:

$$\begin{aligned} PSK - A_{c1} (A_{r1}) \\ GS - A_{c3} (A_{r3}) \\ SE - A_{cm} \end{aligned}$$

Там же (см. рис. 1) условно показана заштрихованная область температур нагрева, рекомендуемых для операций отжига П рода и закалки, при этом общее представление о превращениях, происходящих в сталях при нагреве, можно получить из этой диаграммы. Более подробно режимы нагрева, охлаждения и примерное назначение некоторых операций приведены в табл. 1.

Структуры сталей после окончательной термообработки, т. е. закалки и отпуска, считаются неравновесными, а потому на диаграмме (см. рис. 1) они не показаны, их получение можно объяснить положением векторов скорости охлаждения на поле изотермической диаграммы превращения переохлажденного аустенита. На примере эвтектоидной стали это показано на рис. 2.

В зависимости от степени переохлаждения (волнистые участки вектора) превращение аустенита может быть диффузионным (температурный интервал – область I), промежуточным (область II) или бездиффузионным (область III). Если полученный при нагреве

аустенит охладить со скоростью v_1 , v_2 или v_3 , в результате образуются структуры, называемые *перлит*, *сорбит* и *троостит*. Это структуры одного типа – механические смеси феррита и цементита, имеющие пластинчатое строение. Отличаются они лишь степенью дисперсности, т. е. толщиной пластинок феррита и цементита (прил. 2, а). Наиболее крупнодисперсная структура – перлит, наиболее мелкодисперсная – троостит. При непрерывном охлаждении, скорость $v_4 > v_{кр}$ (рис. 2), образуется *мартенсит* – пересыщенный твердый раствор углерода в α -железе. $v_{кр}$ – критическая скорость закали на мартенсит.

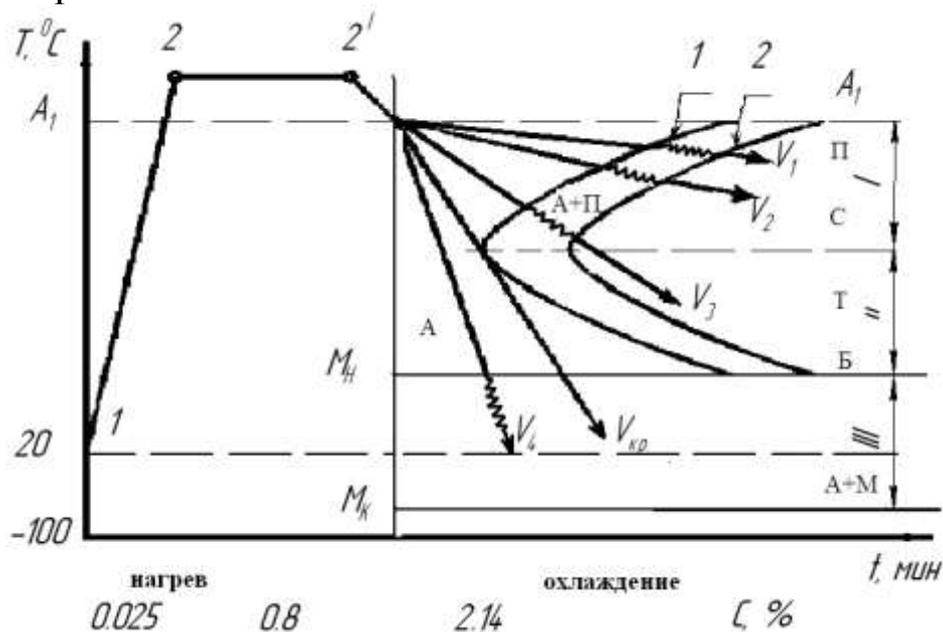


Рис. 2. Схема термических режимов отжига, нормализации и закалки стали: I – область перлитного превращения; II – область промежуточного превращения; III – область мартенситного превращения; 1 – линия начала превращения А → П, 2 – линия конца превращения А → П; M_H , M_K – линии начала и конца мартенситного превращения

Мартенсит имеет ту же концентрацию углерода, что и исходный аустенит. Из-за высокой пересыщенности углеродом решетка мартенсита сильно искажается, благодаря чему мартенсит имеет высокую твердость (до HRC65).

Получить структуру бейнита при непрерывном охлаждении нельзя, нужна изотермическая закалка (см. рис. 4).

Таблица 1

Классификация основных видов термической обработки сталей

| Наименование операции Т.О. | Режим термообработки | | Примерное назначение |
|---|--|---|--|
| | Температура нагрева, °С | Охлаждающая среда | |
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| ОТЖИГ I РОДА | | | |
| Низкий отжиг (для снятия напряжений) | 650÷700 | Печь | Для снятия остаточных напряжений в отливках, поковках, сварных конструкциях |
| Диффузионный отжиг (гомогенизационный) | 1100÷1250 | Печь | Для устранения ликвации в отливках, слитках из легированных сталей и алюминиевых сплавов |
| Рекристаллизационный отжиг | $T_{\text{нагр}} \geq T_{\text{рекр}}$ $T_p = (0,4 \dots 0,6)T_{\text{пл}}$ | Печь | После холодной пластической деформации для снятия наклепа |
| ОТЖИГ II РОДА | | | |
| Полный отжиг | $A_{c3} + (30 \div 50)$ | Печь | Для конструкционных доэвтектоидных сталей с целью получения мелкозернистой ферритно-перлитной структуры (Ф+П) |
| Неполный отжиг (сфероидизирующий) | $A_{c1} + (30 \div 50)$ | Печь до 620÷680 °С, воздух | Для инструментальных и подшипниковых заэвтектоидных сталей с целью получения зернистой перлитной структуры, с зернистыми включениями карбидов $(\text{П}+\text{К}_{\text{П}})_{\text{зерн}}$ |
| Изотермический отжиг | $A_{c3} + (30 \div 50)$ для доэвтектоидных $A_{c1} + (30 \div 50)$ для заэвтектоидных | Печь 630÷680 °С, выдержка 1÷3 ч, воздух | Взамен полного или соответственно вместо неполного отжига для сокращения цикла термообработки высоколегированных сталей |
| Нормализация | $A_{c3} + (40 \div 60)$ для доэвтектоидных | Воздух | Для доэвтектоидных низко- и среднеуглеродистых, низколегированных сталей взамен полного отжига. Взамен улучшения для ответственных деталей из среднеуглеродистых сталей |
| Нормализация | $A_{cm} + (40 \div 60)$ для заэвтектоидных | Воздух | Для заэвтектоидных сталей с целью устранения цементитной сетки перед неполным отжигом |

Продолжение табл. 1

| 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------|-----------------------|-----------------------------|---|
| ЗАКАЛКА | | | |
| Полная закалка | $A_{c3}+(30\div 50)$ | Масло, вода, растворы солей | Для доэвтектоидных конструкционных сталей с целью получения структуры мартенсита (М) |
| Неполная закалка | $A_{c1}+(30\div 50)$ | Масло, вода, растворы солей | Для заэвтектоидных инструментальных сталей с целью получения структуры мартенсита с включениями карбидов, (М + К _{II}) |
| ОТПУСК | | | |
| Низкий отпуск | 160÷250, 1÷3 часа | Воздух | Для инструментальных и износостойких сталей после закалки, для получения структуры отпущенного мартенсита (М _{отп} – в доэвтектоидных; М + К _{II} – в заэвтектоидных) |
| Средний отпуск | 350÷450, 1–3 часа | Воздух | Для рессорно-пружинных сталей и горячих штампов после закалки, для получения структуры троостита отпуска (Т _{отп}) |
| Высокий отпуск | 550÷650, 0,5÷1 час | Воздух | Для ответственных деталей, кроме вышеназванных, после закалки, для получения структуры сорбита отпуска, (С _{отп}) |

2. ТЕХНОЛОГИЯ ТЕРМООБРАБОТКИ СТАЛИ

2.1. Отжиг

Ограничимся сведениями, содержащимися в табл. 1 для операций отжига I рода, рассмотрим несколько подробнее цели, температурно-временные режимы разных вариантов отжига II рода. Это полный и неполный отжиг, изотермический отжиг, нормализация. *Отжигом* называется такой процесс термической обработки, который заключается в нагреве стали выше критических температур, выдержке и последующем медленном охлаждении (с печью) для получения более равновесной структуры перлита. Режимы некоторых видов отжига наглядно представлены графиками на рис. 3.

Полный отжиг (кривая 1, см. рис. 3) применяется для исправления структуры (крупнозернистость, строчечная структура и др.)

(прил. 3, а) и снятия внутренних напряжений в литых, обработанных давлением и сварных заготовках из конструкционной доэвтектоидной стали и заключается в нагреве до температуры $A_{c3} + (30 \div 50 \text{ }^\circ\text{C})$, выдержке при этой температуре до завершения полной фазовой перекристаллизации и последующем медленном охлаждении (с печью $\nu = 20 \div 100$ град/ч).



Рис. 3. График термических режимов отжига:
 1 — полного; 2 — неполного; 3 — изотермического отжига;
 4 — нормализации

Неполный отжиг (кривая 2, см. рис. 3) применяется для заэвтектоидных сталей с целью получения структуры зернистого перлита (прил. 3, б), если в исходной структуре нет цементитной сетки, которая охрупчивает сталь и сильно затрудняет обработку резанием. Если же есть цементитная сетка, то выполняют две операции: нормализацию (устраняет цементитную сетку) и неполный отжиг (сфероидизирует цементит и снимает внутренние напряжения) и получают структуру зернистого перлита.

Изотермический отжиг (кривая 3, см. рис. 3) применяется с той же целью, что и полный отжиг, главным образом для конструкционных легированных сталей. Нагрев и выдержка — как при полном отжиге, затем охлаждение на воздухе ниже A_{r1} , загрузка в другую печь с температурой $630 \div 680 \text{ }^\circ\text{C}$, выдержка при этой температуре $4 \div 6$ ч и последующее охлаждение на воздухе. Такой график режима дает сокращение общего цикла времени в сравнении с пол-

ным отжигом, более точно позволяет управлять процессом превращения аустенит-перлит (изотермическое превращение), но более сложен в исполнении – нужны две печи.

Нормализацией (кривая 4, см. рис. 3) называется такой процесс термической обработки, который заключается в нагреве выше температур A_{c3} (доэвтектоидные стали) или A_{cm} (заэвтектоидные стали), выдержке при этой температуре до полной аустенизации и охлаждении на спокойном воздухе. Нормализация отнесена к группе отжига II рода, так как в мало- и среднеуглеродистых (до 0,4%) сталях она формирует феррито-перлитную структуру, но с более мелким зерном, чем при полном отжиге. Однако при больших содержаниях углерода получается структура сорбита, и тогда нормализация используется как упрочняющая операция вместо закалки и высокого отпуска (улучшения) для деталей неотвественного назначения. В высокоуглеродистых заэвтектоидных сталях нормализация используется для исправления структуры с цементитной сеткой: после нормализации получают структуру сорбита и троостита, последующий неполный отжиг формирует структуру зернистого перлита.

2.2. Закалка

Закалкой называется такой процесс термической обработки, который заключается в нагреве стали выше критических температур, выдержке и последующем охлаждении со скоростью, превышающей критическую скорость закалки, для получения наиболее твердой мартенситной структуры. Закалка – основная упрочняющая операция в технологии термообработки стали, но всегда должна выполняться в комбинациях с последующим отпуском. Таким образом, формирование конечной структуры и свойств упрочненной стали выполняется отпуском. Наиболее часто применяется «закалка на мартенсит», иногда для легированных конструкционных сталей более благоприятное сочетание эксплуатационных свойств дает «закалка на бейнит».

Критическая скорость закалки – минимальная скорость охлаждения, позволяющая получить структуру мартенсита, является касательной к линии I диаграммы изотермического превращения аустенита. На рис. 4 представлены графики режимов нагрева – выдержки – охлаждения при выполнении различных способов закалки доэвтектоидных сталей.

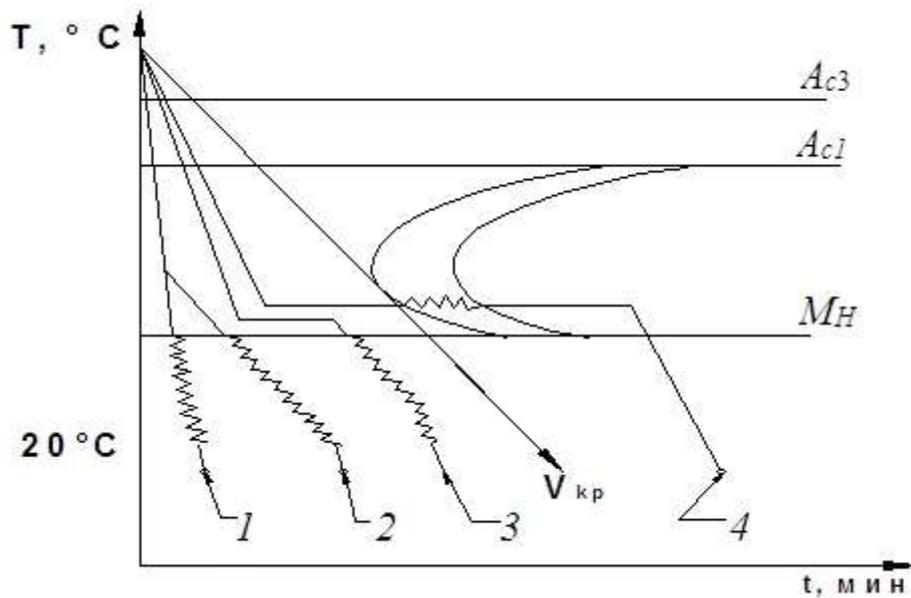


Рис. 4. Полная закалка доэвтектоидной стали:
 1 — непрерывная; 2 — прерывистая; 3 — ступенчатая;
 4 — изотермическая

Наиболее широко во всех видах машиностроения применяются непрерывная (объемная) закалка (кривая 1, см. рис. 4). Такая закалка сопровождается возникновением внутренних закалочных (термических и фазовых) напряжений:

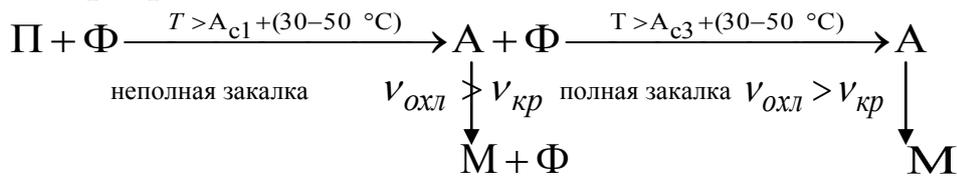
$$\sigma_{\text{вн}} = \sigma_{\text{тер}} + \sigma_{\text{фаз}}.$$

Причиной возникновения термических напряжений является неравномерность нагрева по сечению изделия.

Возникновение фазовых напряжений обусловлено большим удельным объемом мартенсита по сравнению с аустенитом. Увеличению внутренних напряжений способствует сложная геометрическая форма с разной толщиной стенки и пониженная теплопроводность металла (легированные стали). В этих случаях применяют и другие способы закалки: прерывистую (с охлаждением в двух средах), ступенчатую (охлаждение в одной среде выше M_H , затем выдержка для выравнивания температуры и последующее медленное охлаждение) и изотермическую (охлаждение до температуры, превышающей M_H , и изотермической выдержке до окончания превращений) (кривые 2, 3, 4, см. рис. 4).

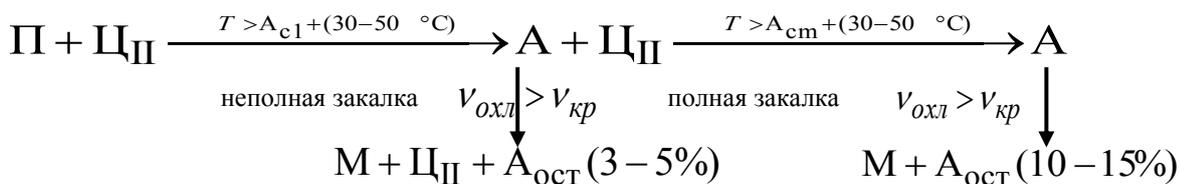
Полная закалка проводится для доэвтектоидных сталей (содержащие от 0,3 до 0,8% углерода), заключается в нагреве выше температуры $A_{c3} + 30 \div 50$ °C, выдержке и последующем быстром

охлаждении со скоростью выше критической. Происходят следующие превращения в доэвтектоидных сталях:



Нагрев доэвтектоидных сталей в интервале $A_{c1} - A_{c3}$ недопустим, так как в структуре стали сохраняется феррит (прил. 4, а), существенно снижающий твердость закаленной стали. Поэтому полная закалка дает наилучший эффект максимальной твердости в доэвтектоидных сталях (прил. 4, б). Стали содержащие до 0,3% углерода, практически не закаливаются.

Неполная закалка применяется для эвтектоидных и заэвтектоидных (содержащие свыше 0,8% углерода) сталей и заключается в нагреве до температуры $A_{c1} + 30 \div 50 \text{ }^\circ\text{C}$, выдержке для завершения фазовых превращений и быстром охлаждении со скоростью выше критической. Превращения, происходящие в заэвтектоидных сталях:



При этой температуре перлит переходит в аустенит, а цементит почти целиком сохраняется. Следовательно, после быстрого охлаждения структура закаленной стали состоит из мартенсита и избыточного цементита (прил. 5, а), который повышает износостойкость и твердость. Нагрев заэвтектоидных сталей выше A_{cm} опасен и не нужен, так как твердость несколько падает вследствие растворения избыточного цементита и увеличения остаточного аустенита (прил. 5, б).

Охлаждающими средами при закалке на мартенсит являются вода, растворы солей и щелочей (углеродистые стали) и минеральное масло (легированные стали). Леггирующие элементы (кроме Со) уменьшают критическую скорость закалки, охлаждение в более «мягком» охладителе – (в масле) – позволяет обеспечить мартенситное превращение с меньшими термическими напряжениями.

Варианты закалки с охлаждением в двух средах и в специфических технологиях применяют и другие охлаждающие среды (расплавленные соли, металлы, водоохлаждаемые «штампы» и др.).

2.3. Отпуск

Структуры закалки (мартенсит) термодинамически неустойчивы, со временем в них происходят самопроизвольные изменения, сопровождаемые изменением свойств, что может сделать деталь (и машину) неработоспособной. Назначение отпуска – стабилизация структуры, снятие внутренних закалочных напряжений, формирование структуры и свойств, отвечающих конкретным условиям эксплуатации. *Отпуск* заключается в нагреве закаленной стали до температур ниже A_{cl} , выдержке и охлаждении на воздухе (или в воде, масле). В зависимости от температуры отпуска реализуются разные стадии превращений и получаются разные структуры (прил. 2, б). Различают три технологические операции: низкотемпературный (низкий) отпуск на «отпущенный» мартенсит ($M_{отп}$), среднетемпературный (средний) отпуск на троостит отпуска ($T_{отп}$) и высокотемпературный (высокий) отпуск на сорбит отпуска ($S_{отп}$).

Низкий отпуск (Н. О.) заключается в нагреве закаленной стали до температур $160 \div 220$ °С, выдержке при этой температуре и охлаждении на воздухе, отпущенный мартенсит придает изделию высокую твердость, износостойкость. Применяется низкий отпуск при термообработке инструмента из нетеплостойких инструментальных сталей, деталей, работающих в условиях трения качения или скольжения, в том числе после цементации и неполной закалки.

Средний отпуск (С. О.) заключается в нагреве закаленной стали до температур $350 \div 450$ °С (иногда и 500 °С), выдержке 1 ÷ 3 ч и охлаждении на воздухе. Структура $T_{отп}$ отличается высоким пределом упругости. Применяется средний отпуск при термообработке пружин, рессор и других упругих элементов из высокоуглеродистых (0,55 ÷ 0,85% С) конструкционных сталей, в том числе легированных кремнием, а также штампового инструмента для горячей обработки давлением из полутеплостойких инструментальных сталей.

Высокий отпуск (В. О.) заключается в нагреве закаленной стали до температур $550 \div 650$ °С, выдержке 0,5 ÷ 1 ч и охлаждении на воздухе (или в воде для склонных к отпускной хрупкости легированных Cr и Ni сталей). Структура $S_{отп}$ отличается высокой ударной вязкостью. Применяется высокий отпуск при термообработке деталей, работающих в условиях динамических (ударных) нагрузок, изготовленных из среднеуглеродистых (0,3...0,5% С) конструкционных сталей.

2.4. Технология нагрева

При выполнении любых операций термообработки необходимо придерживаться некоторых общих требований к технологии нагрева. При выборе температуры нагрева для конкретной операции можно использовать рекомендации табл. 1. Важную роль в технологии нагрева играет скорость нагрева. С точки зрения экономики она должна быть максимально допустимой. Ограничения в скорости нагрева связаны с возникновением перепада температур «поверхность – сердцевина» и термическими напряжениями внутри детали: чем выше скорость нагрева, тем больше перепад температур, тем больше величина внутренних напряжений, способных вызвать коробление или даже образование скрытых внутренних трещин. Практика термообработки выработала методики расчета продолжительности нагрева в разных нагревательных устройствах. Применительно к условиям нагрева малых цилиндрических образцов в лабораторных муфельных печах под операции отжига, нормализации, закалки можно воспользоваться формулой

$$\tau_{\text{общ}} = 0,75 \cdot d + 5,$$

где $\tau_{\text{общ}}$ – время нагревания и выдержки, мин;
 d – диаметр цилиндрического образца, мм.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Студенты выполняют работу бригадами по 2–3 человека. Каждой бригаде выдается преподавателем задание на проведение определенной операции и образец.

2. Студенты выбирают режим для заданной операции и вносят его в общую для группы таблицу прил. 1. При этом температура нагрева определяется из рекомендаций табл. 1.

3. Студенты измеряют твердость образца до термообработки, выполняют практически термообработку и измеряют твердость после термообработки. Все данные измерений вносят в общую таблицу отчета (см. прил. 1).

4. Изучается микроструктура до и после термообработки, анализируются результаты наблюдений по образцам всех бригад и формулируются выводы. По результатам термообработки строятся графики зависимости:

- а) твердости от скорости охлаждения;
- б) твердости от температуры отпуска.

4. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ

При выполнении работы необходимо соблюдать правила техники безопасности в термической лаборатории 3213, изложенные в инструкции, утвержденной ректором университета.

5. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать краткие сведения о проделанной работе, таблицу результатов (приложение 1), графики режимов термообработки, рисунки микроструктур, выводы.

6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какую операцию термообработки следует назначить для исправления крупнозернистой структуры в доэвтектоидных сталях?
2. Какая операция применяется для получения зернистого перлита в заэвтектоидных сталях?
3. Какая операция используется для исправления структуры с цементитной сеткой?
4. Что такое мартенсит, троостит, сорбит?
5. Как получить в доэвтектоидной стали структуры мартенсита, троостита, сорбита?
6. Чем отличается сорбит отпуска от сорбита закалки, полученного при охлаждении аустенита?
7. Какая структура получится в доэвтектоидной стали после полной закалки? В заэвтектоидной стали?
8. Какая структура получится после неполной закалки в доэвтектоидной стали? В заэвтектоидной стали?
9. Какая структура получится в доэвтектоидной стали после полной закалки и низкого отпуска, среднего отпуска, высокого отпуска?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРА

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение и термическая обработка / Ю. М. Лахтин – Москва : Альянс, 2009. – 448 с.
2. Марочник сталей и сплавов / под ред. А. С. Зубченко. – Москва : Машиностроение, 2003. – 784 с.
3. Методы измерения твердости : методические указания к лабораторной работе по дисциплине «Материаловедение» для обучающихся технических направлений и специальностей всех форм обучения / Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева, Кафедра металлорежущих станков и инструментов ; составитель В. В. Драчев. – Кемерово, 2020. – 15 с.
<http://library.kuzstu.ru/meto.php?n=5982>

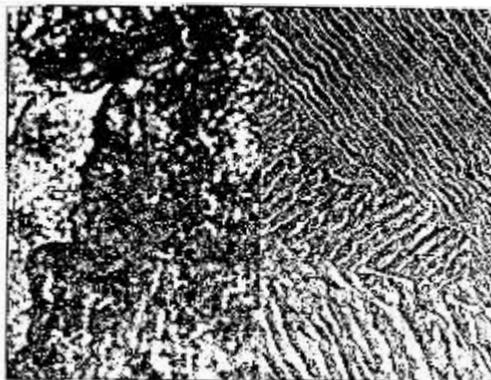
Режимы и результаты термической обработки

| № образца | Марка стали | Операция ТО | Режим ТО | | | Твердость | | | | Микроструктура | |
|--------------|----------------|----------------|----------|-----------|---------------|-----------|----|----------|----|----------------|----------|
| | | | T, °C | τ, мин | охл. среда | до ТО | | после ТО | | до ТО | после ТО |
| | | | | | | HRB | HB | HRC | HB | | |
| | | | | | | | | | | | |

Перлит



Сорбит



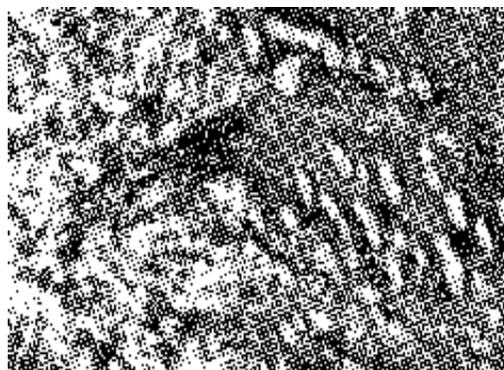
Троостит



a



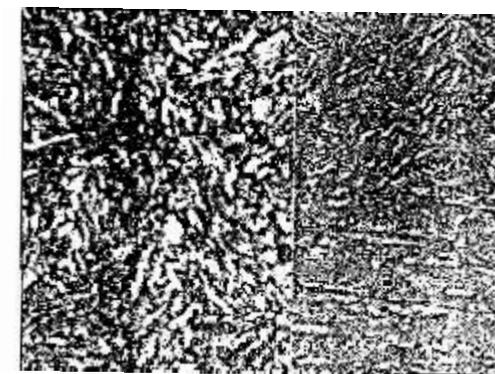
×200



×500

×10000

b



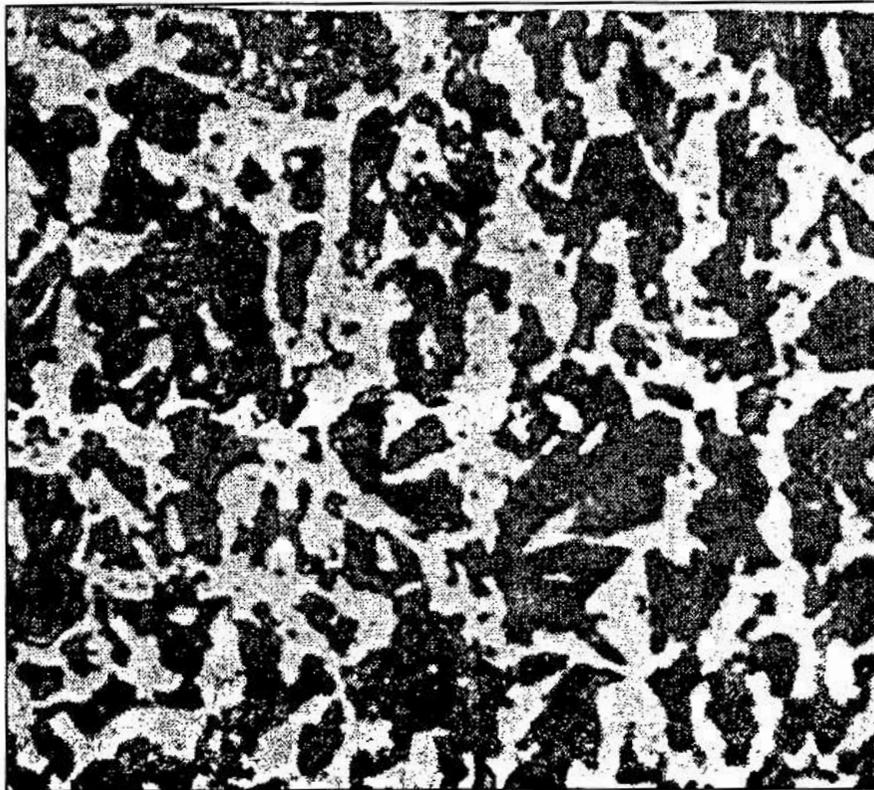
×500

×10000

Микроструктура перлита, сорбита, троостита:

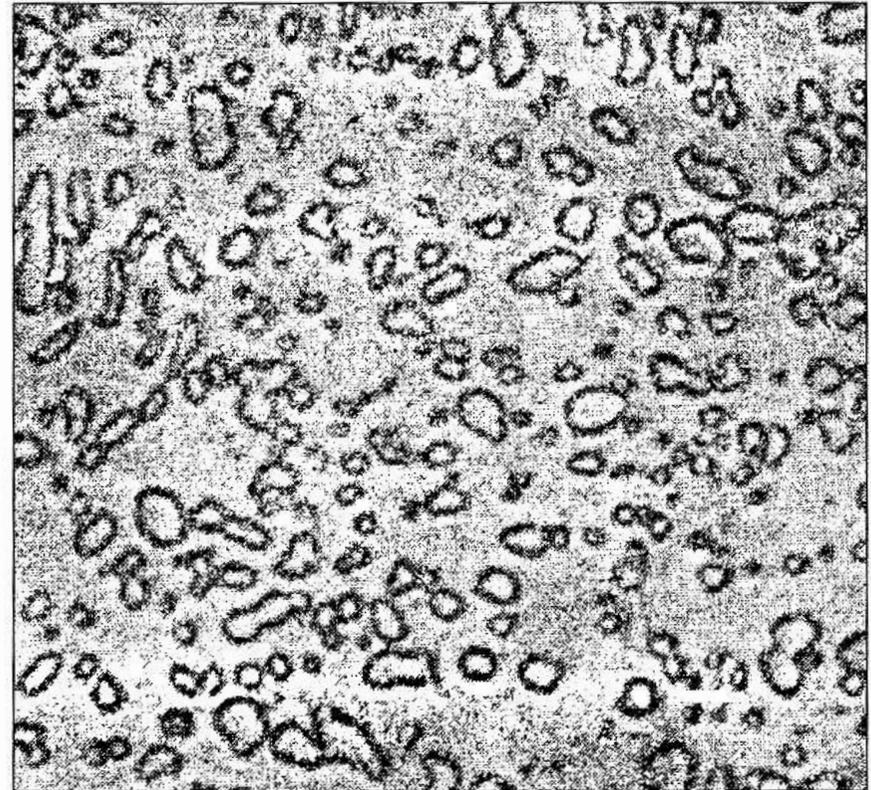
a – получены при непрерывном охлаждении; *b* – получены после закалки и отпуска

Феррит+Перлит



a

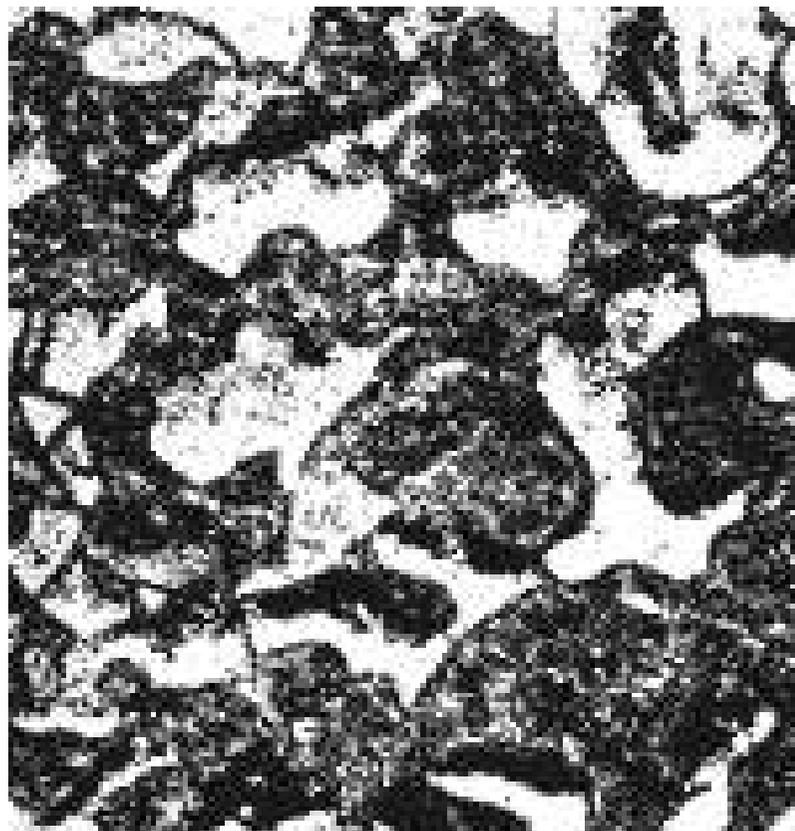
Перлит зернистый + Карбиды II



б

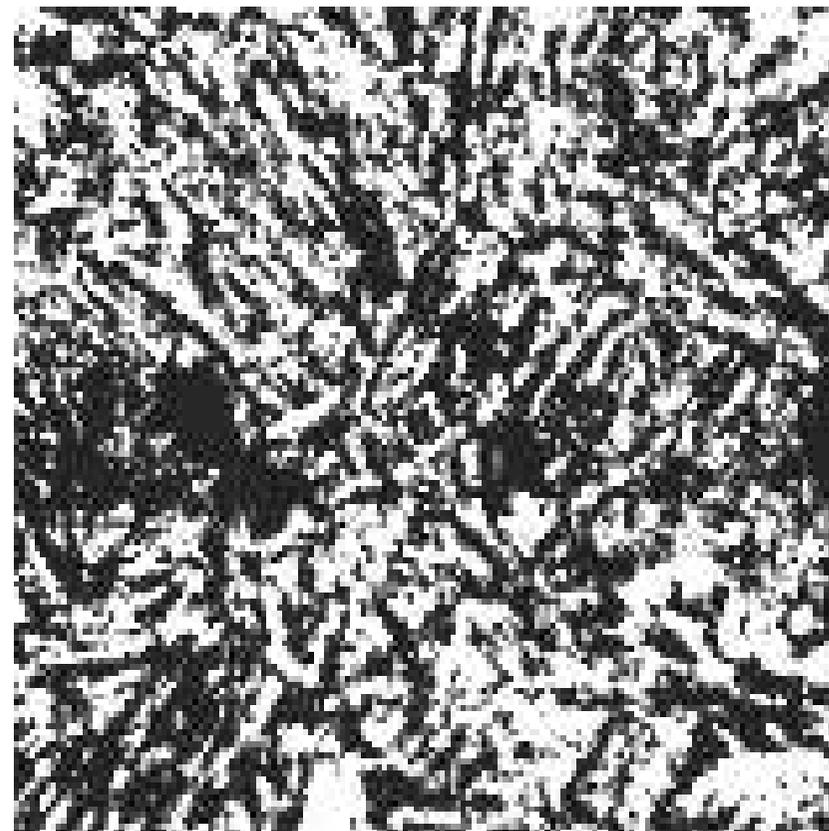
Микроструктура сталей после отжига:
a – доэвтектоидной стали; *б* – заэвтектоидной стали

Мартенсит + Феррит



a

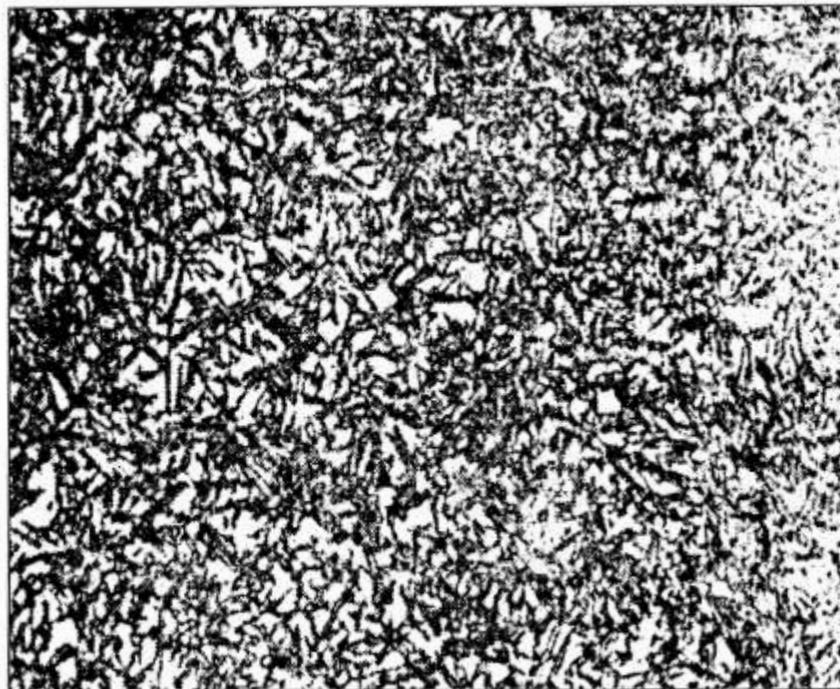
Мартенсит



б

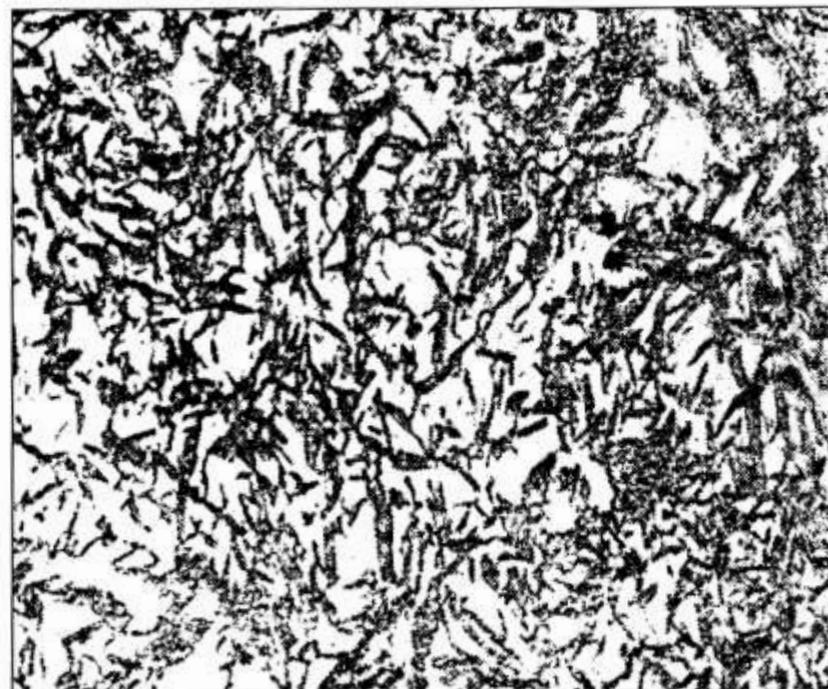
Микроструктура доэвтектоидной стали:
a – после неполной закалки; *б* – после полной закалки

Мартенсит + Цементит + Аустенит остаточный



a

Мартенсит + Аустенит остаточный



б

Микроструктура заэвтектоидной стали:
a – после неполной закалки; *б* – после полной закалки

Составитель
Ляцинина Светлана Викторовна

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА СТАЛИ

Методические указания к лабораторной работе
по дисциплинам «**Материаловедение**»,
«**Основы материаловедения**» для обучающихся
технических направлений подготовки и специальностей

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 25.05.2020. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч.-изд. л.0,9.

Тираж 30 экз. Заказ

Кузбасский государственный технический университет
имени Т. Ф. Горбачева. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП Кузбасского государственного технического
университета имени Т. Ф. Горбачева. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А.