



Московский государственный технический университет
имени Н. Э. Баумана

Учебное пособие

Н.С. Герасимова, И.А. Филиппова

ВИДЫ ОТЖИГА СТАЛЕЙ

Издательство МГТУ имени Н. Э. Баумана

Московский государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана
Калужский филиал

Н.С. Герасимова, И.А. Филиппова

ВИДЫ ОТЖИГА СТАЛЕЙ

Учебное пособие



УДК 669.01
ББК 30.3
Г37

Рецензент:

зам. генерального директора ОАО «Калужский
турбинный завод» *А.З. Павловский*

Утверждено методической комиссией КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
(протокол № 3 от 31.05.16)

Герасимова Н. С.

Г37 Виды отжига сталей : учебное пособие по курсу «Материаловедение» / Н. С. Герасимова, И. А. Филиппова. — Калуга : Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2017. — 24 с.

В учебном пособии рассматриваются основные виды отжига сталей и превращения, происходящие при этом. Описаны основные дефекты, возникающие при отжиге, и области его применения.

Пособие предназначено для студентов всех специальностей.

УДК 669.01
ББК 30.3

© Герасимова Н.С.,
Филиппова И.А., 2017
© Издательство МГТУ
им. Н.Э. Баумана, 2017

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время применяются различные виды термической обработки, которые предназначены для различных целей. Основными видами термической обработки являются отжиг, нормализация, закалка и отпуск.

Отжиг — термическая обработка, применяемая с целью смягчения стали и облегчения механической обработки или пластической деформации, подготовки к последующей термической обработке, а также для получения заданных механических свойств. В результате отжига образуется устойчивая структура, свободная от остаточных напряжений. Отжиг является одной из важнейших массовых операций термической обработки стали.

В зависимости от поставленных задач отжиг производится при различных температурах и бывает двух видов: I рода и II рода.

Температура отжига, как правило, должна быть на $20\text{--}30^\circ$ выше 727°C (критической точки A_1), при которой происходит основное изменение внутреннего строения стали.

Скорость нагрева детали до температуры отжига зависит от химического состава, формы и размеров детали. При больших размерах и сложной форме детали нагрев должен быть медленным. Скорость охлаждения при отжиге должна быть малой. Углеродистые стали охлаждаются при отжиге со скоростью $100\text{--}200^\circ\text{C}/\text{ч}$, низкоуглеродистые — со скоростью $50\text{--}60^\circ\text{C}/\text{ч}$, высоколегированные — еще медленнее. На практике при отжиге детали обычно охлаждаются вместе с печью до комнатной температуры.

При неполном отжиге, цель которого состоит только в устранении внутренних напряжений, сталь с любым содержанием углерода нагревают до $750\text{--}760^\circ\text{C}$.

Для полного отжига сталь с содержанием углерода более $0,8\%$ нагревают также до $750\text{--}760^\circ\text{C}$, а при меньшем содержании требуется постепенное повышение температуры отжига до $930\text{--}950^\circ\text{C}$. Детали выдерживаются при указанных температурах до полного нагрева. Время выдержки зависит от формы деталей. Затем их медленно охлаждают до комнатной температуры (20°C). Качество отжига определяют по виду излома.

1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Отжиг — термическая обработка, заключающаяся в нагреве стали выше критической температуры (структура аустенит), выдержки и медленном охлаждении (со скоростью 20–100 °С/ч).

Задача отжига — получение более или менее равновесной структуры металла.

Отжиг позволяет:

- ◆ снять внутренние напряжения;
- ◆ улучшить обрабатываемость заготовок давлением и резанием;
- ◆ исправить структуру сварных швов, перегретой при обработке давлением и литьем стали;
- ◆ подготовить структуру к последующей термической обработке.

По классификации *А.А. Бочвара*, различают 2 вида отжига.

Отжиг первого (I) рода — без фазовой перекристаллизации — применяется для приведения металла в более равновесное структурное состояние: снимается наклеп, понижается твердость, возрастают пластичность и ударная вязкость, снимаются внутренние напряжения (в связи с процессами отжига и рекристаллизации).

Отжиг второго (II) рода осуществляется с фазовой перекристаллизацией: сталь нагревается до температуры выше критических точек, затем следует выдержка различной продолжительности и последующее сравнительно медленное охлаждение.

2. ОТЖИГ I РОДА

Отжиг первого (I) рода направлен на возвращение в равновесное состояние металла, подвергнутого предварительной пластической деформации.

2.1. Виды отжига I рода

1. Диффузионный (гомогенизирующий) отжиг. Применяется для устранения ликвации, выравнивания химического состава сплава.

В его основе — диффузия. В результате нагрева выравнивается состав. Применяется в основном для легированных сталей. Полностью снимает внутренние напряжения.

Температура гомогенизации должна быть достаточно высокой, однако нельзя допускать пережога, оплавления зерен. Если допустить пережог, то кислород воздуха окисляет железо, проникая в его толщу, образуются кристаллиты, разобщенные окисными оболочками. Пережог устранить нельзя, поэтому пережженные заготовки являются окончательным браком.

Диффузионный отжиг стали обычно приводит к слишком сильному укрупнению зерна, что следует исправлять последующим полным отжигом (на мелкое зерно).

В стальных слитках в результате диффузионного отжига достигается более равномерное распределение *фосфора, углерода* и легирующих элементов в объеме зерен твердого раствора. Если температура отжига достаточно высока, отжиг приводит к более благоприятному распределению *сульфидов*.

Недостаток: сопровождается ростом зерна и окалиной.

Температура нагрева зависит от температуры плавления, $T_1 = 0,8 \cdot \dot{O}_{1\dot{e}}$; $t = 1100 \div 1200$ °С.

Продолжительность выдержки: $\tau = 8 \div 20$ ÷ (десятки часов).

2. Рекристаллизационный отжиг. Проводится для снятия напряжений после холодной пластической деформации.

Цель: устранение наклепа, созданного холодной пластической деформацией, понижение прочности и восстановление пластично-

сти деформированного металла, получение определенной кристаллографической текстуры, создающей анизотропию свойств, и получение заданного размера зерна.

Отжиг I рода проходит в две стадии:

- 1) *возврат*;
- 2) *рекристаллизация*.

В результате пластической деформации в металле возникает особая структура, при которой большинство кристаллов оказывается деформированными в одном направлении (рис. 1).

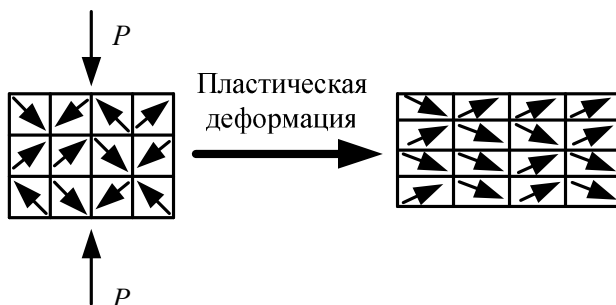


Рис. 1. Пластическая деформация в металле

Металл, свойства которого были одинаковы во всех направлениях из-за произвольной хаотической ориентации кристаллов, приобретает преимущественные направления распределения свойств. Устранить влияние пластической деформации на структуру металла можно двумя способами:

1. **Возврат** — **нагрев металла до относительно низких температур**. Результат — искаженная форма кристаллов сохраняется, снимаются внутренние напряжения в структуре. В результате твердость и прочность незначительно уменьшаются, уменьшается склонность к хрупкому разрушению.

2. **Рекристаллизация** — **нагрев до высоких температур**: чистые металлы — до $t_p = (0,2 \div 0,3) \cdot \dot{O}_{T\ddot{e}}$; чистые сплавы — до $t_p = (0,5 \div 0,6) \cdot \dot{O}_{T\ddot{e}}$; технические сплавы — до $t_p = (0,8 \div 0,9) \cdot \dot{O}_{T\ddot{e}}$. Под действием высоких температур происходит полная перестройка кристаллической структуры металла. Вместо деформированных

кристаллов в твердом состоянии происходит зарождение и рост новых равновесных кристаллов. Свойства металла возвращаются к исходным — бывшим до деформации.

Холодная пластическая деформация вызывает изменение структуры металла и его свойств. Сдвиговая деформация вызывает увеличение плотности дефектов кристаллической решетки, таких как вакансии, дислокации. Образование ячеистой структуры происходит с изменением формы зерен, они сплющиваются, вытягиваются в направлении главной деформации. Все эти процессы ведут к тому, что прочность металла постепенно увеличивается, пластичность падает, т. е. возникает **наклеп** или **нагартовка**. Дальнейшая деформация такого металла невозможна, так как происходит его разрушение. Поэтому для снятия эффекта упрочнения применяют **рекристаллизационный отжиг**.

В процессе рекристаллизационного отжига происходит образование зародышей новых зерен и последующий рост этих зародышей. Постепенно старые деформированные зерна исчезают. Количество дефектов в кристаллической решетке уменьшается, наклеп устраняется, и металл возвращается в исходное состояние.

Степень деформации определяет размер зерна после отжига. Если она близка к критической ($\epsilon_{\text{крит}} = 5 \div 15\%$), то в результате после отжига в металле возникают крупные зерна, что обычно нежелательно. Поэтому перед рекристаллизационным отжигом деформацию металлов производят со степенью 30–60%. В результате получается мелкозернистая однофазная структура, обеспечивающая хорошее сочетание прочности и пластичности. Увеличение степени деформации до 80–90% вызывает появление в металле текстуры деформации. После рекристаллизационного отжига текстура деформации меняется на текстуру рекристаллизации. Как правило, это сопровождается резким направленным ростом зерна. Увеличение размеров зерна, т. е. снижение механических свойств, может вызвать также слишком большая температура отжига или большая выдержка.

Рекристаллизационный отжиг может применяться как:

- ◆ предварительная термообработка;
- ◆ промежуточная термообработка;
- ◆ окончательная термообработка.

Как предварительная термообработка он применяется перед холодной деформацией, если исходное состояние металла неравновесное и имеет какую-то степень упрочнения.

Как промежуточная операция рекристаллизационный отжиг применяется между операциями холодной деформации, если суммарная степень деформации слишком велика и запасов пластичности металла не хватает.

Как окончательный вид отжига его применяют в том случае, если потребитель требует поставки полуфабрикатов в максимально пластичном состоянии.

Скорость охлаждения при этой разновидности отжига не имеет решающего значения; обычно охлаждение по окончании выдержки проводят на спокойном воздухе.

Температура нагрева связана с температурой плавления: $T_1 = 0,4 \cdot \dot{Q}_{1\text{г}}$; $t = 680 \div 700$ °С.

Продолжительность зависит от габаритов изделия ($\tau = 6 \div 7 \div$).

В некоторых случаях потребителю требуется полуфабрикат, сочетающий определенный уровень прочности с необходимым запасом пластичности. В этом случае вместо рекристаллизационного отжига используют его разновидность — **отжиг на полигонизацию**.

Отжиг на полигонизацию проводят при температуре, которая ниже температуры начала рекристаллизации. Соответственно при такой температуре происходит лишь частичное устранение наклепа за счет процессов возврата второго рода, т. е. происходит уменьшение плотности дефектов кристаллической решетки, образование ячеистой дислокационной структуры без изменения формы зерен. *Степень уменьшения наклепа зависит прежде всего от температуры. Чем ближе температура к порогу рекристаллизации, тем меньше наклеп, тем больше пластичность, и наоборот.*

В некоторых металлах и твердых растворах рекристаллизация сопровождается образованием текстуры (преимущественной ориентации кристаллов в объеме детали), которая создает анизотропию свойств. Это позволяет улучшить те или иные свойства вдоль определенных направлений в деталях (магнитные свойства в трансформаторной стали и пермаллоях, модуль упругости в некоторых пружинных сплавах и др.).

3. Отжиг для снятия напряжений после горячей обработки (литья, сварки, обработки резанием, когда требуется высокая точность размеров).

Внутренние напряжения в металле могут возникать в результате различных видов обработки. Это могут быть термические напряжения, образовавшиеся в результате неравномерного нагрева, различной скорости охлаждения отдельных частей детали после горячей деформации, литья, сварки, шлифовки и резания. Могут быть структурными, т. е. появившиеся в результате структурных превращений, происходящих внутри детали в различных местах с различной скоростью. Внутренние напряжения в металле могут достигать большой величины и, складываясь с рабочими, т. е. возникающими при работе, могут неожиданно превышать предел прочности и приводить к разрушению.

Устранение внутренних напряжений производится с помощью специальных видов отжига. *Этот отжиг проводится при температурах ниже температуры рекристаллизации: $T_i = (0,2 \div 0,3) \cdot \dot{O}_{i\text{г}}$.* Повышенная температура облегчает скольжение дислокаций, и под действием внутренних напряжений происходит их перераспределение, т. е. *из мест с повышенным уровнем внутренних напряжений дислокации перемещаются в области с пониженным уровнем. Происходит как бы разрядка внутренних напряжений. При нормальной температуре этот процесс будет длиться в течение нескольких лет. Увеличение температуры резко увеличивает скорость разрядки, и продолжительность такого отжига составляет несколько часов.*

Температура нагрева выбирается в зависимости от назначения, находится в широком диапазоне: $T_i = (160 \div 700) \text{ } ^\circ\text{Ñ}$.

Продолжительность зависит от габаритов изделия (τ до 1,5 ч).

Детали прецизионных станков (ходовые винты, высоконагруженные зубчатые колеса, червяки) отжигают после основной механической обработки при температуре 570–600 °С в течение 2–3 ч, а после окончательной механической обработки, для снятия шлифовочных напряжений, — при температуре 160–180 °С в течение 2–2,5 ч.

3. ОТЖИГ II РОДА

Отжиг второго (II) рода заключается в нагревании стали выше критической температуры аустенита, выдержки и охлаждении (фазовая перекристаллизация).

Отжиг второго рода предназначен для изменения фазового состава и направлен на перевод стали, находящейся в неравновесном состоянии после предварительной термической обработки, в равновесное состояние.

Температура нагрева и время выдержки обеспечивают нужные структурные превращения. Скорость охлаждения должна быть такой, чтобы успели произойти обратные диффузионные фазовые превращения.

Является подготовительной операцией, которой подвергают отливки, поковки, прокат. Отжиг снижает твердость и прочность, улучшает обрабатываемость резанием средне- и высокоуглеродистых сталей. Измельчая зерно, снижая внутренние напряжения и уменьшая структурную неоднородность, способствует повышению пластичности и вязкости.

В зависимости от температуры нагрева различают отжиг II рода (рис. 2):

- 1) *полный* — нагрев выше верхней критической температуры A_{c3} ;
- 2) *неполный* — нагрев между критическими температурами A_{c1} и A_{c3} ;
- 3) *нормализация* — нагрев выше A_{c3} и A_{cm} ;
- 4) *низкий отжиг* — нагрев ниже критических температур A_{c1} .

Полный отжиг. Температурой нагрева на 30–50 °С *выше критической температуры A_3* :

$$\dot{O}_1 = \dot{A}_3 + (30 \div 50)^\circ\text{C}.$$

Нагрев до температуры 900–1000 °С.

Проводится для *доэвтектоидных* сталей для исправления структуры.

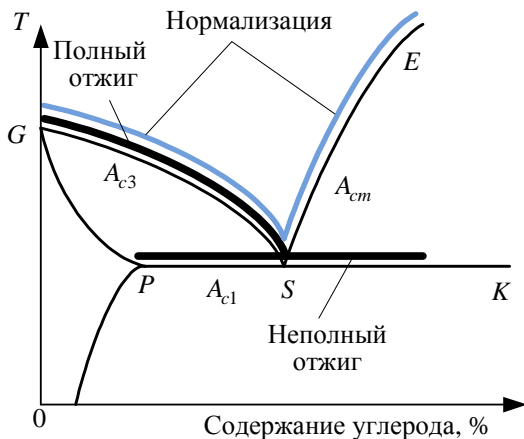


Рис. 2. Угол диаграммы «железо–углерод» и виды отжига на ней

При такой температуре нагрева *аустенит* получается *мелкозернистый*, и после охлаждения сталь имеет также мелкозернистую структуру. Как результат: происходит выравнивание химического состояния (исчезновение ликваций); образуется полностью равновесная структура. Следы предварительной термообработки полностью исчезают. Происходит рост зерна *аустенита* (**гомогенизация**).

Неполный отжиг. Происходит уменьшение степени неравновесности, частично сохраняются следы предварительной термообработки.

Температурой нагрева на 30–50 °С выше критической температуры A_1 :

$$\dot{O}_1 = A_1 + (30 \div 50)^\circ\text{C}.$$

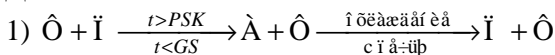
Применяется для *заэвтектоидных сталей*. При таком нагреве в структуре сохраняется *цементит вторичный*, в результате отжига *цементит* приобретает сферическую форму (**сфероидизация**).

Сфероидизация применяется для *заэвтектоидных сталей* ($\tilde{N} > 0,8\%$). *Цель* — образование сферического *цементита*. Исчезает цементный скелет. Кристаллы цементита приобретают правильную сферическую форму. Результат — улучшение механических свойств металла, уменьшение хрупкости, увеличение вязкости.

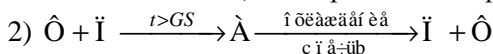
Структуры с *зернистым цементитом* лучше обрабатываются и имеют лучшую структуру после закалки. *Неполный отжиг является обязательным для инструментальных сталей.*

Иногда *неполный отжиг* применяют для доэвтектоидных сталей, если не требуется исправление структуры (сталь мелкозернистая), а необходимо только понизить твердость для улучшения обрабатываемости резанием.

Доэвтектоидные стали:



— **неполный отжиг** (\hat{O} сохраняет свой размер);



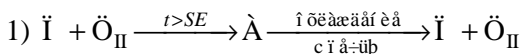
— **полный отжиг.**

Обеспечивает двойную полную перекристаллизацию и мелкое зерно.

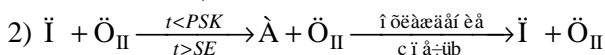
Для доэвтектоидных сталей рекомендуется полный отжиг:

$$\hat{O}_i = \hat{A}_3(t_{GS}) + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\tilde{N}.$$

Заэвтектоидные стали:



— **полный отжиг;**



— **неполный отжиг.**

Для заэвтектоидных сталей рекомендуется неполный отжиг ($SE < t < PSK$) (для избежания образования *цементитной сетки*):

$$\hat{O}_i = \hat{A}_1 + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\tilde{N}.$$

3. Нормализация — разновидность отжига.

Термическая обработка, при которой изделие нагревают до *аустенитного состояния*, на 30–50 °C выше \hat{A}_3 или $\hat{A}_{\tilde{m}}$ с последующим охлаждением *на воздухе*:

$$\hat{O}_i = \hat{A}_3 + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\tilde{N} \text{ или } \hat{O}_i = \hat{A}_{\tilde{m}} + (30 \div 50) \text{ } ^\circ\tilde{N}.$$

В результате *нормализации* получают более тонкое строение эвтектоида (*тонкий перлит* или *сорбит*), уменьшаются внутренние

напряжения, устраняются пороки, полученные в процессе предшествующей обработки. Твердость и прочность несколько выше, чем после *отжига*.

В заэвтектоидных сталях нормализация устраняет грубую сетку вторичного цементита.

Нормализацию чаще применяют как промежуточную операцию, улучшающую структуру. Иногда проводят как окончательную обработку, например при изготовлении сортового проката.

Для *низкоуглеродистых сталей нормализацию* применяют вместо **отжига**.

Для *среднеуглеродистых сталей нормализацию* или **нормализацию с высоким отпускком** применяют вместо **закалки с высоким отпускком**. В этом случае механические свойства несколько ниже, но изделие подвергается меньшей деформации, исключаются трещины.

3.1. Виды отжига II рода по способу охлаждения

По способу охлаждения отжиг II рода может быть:

1. **Охлаждение с печью** $\rightarrow v_{\text{отж}}, \min, \min \text{ НВ}, \sigma_{\text{В}}, \tau = \text{десятки часов.}$

2. **Охлаждение на воздухе (нормализация)** $\rightarrow \text{НВ}, \sigma_{\text{В}}$ на 10–15 % ↑, чем охлаждение с печью:

$$v_{\text{отж}} > v_{\text{нормализация}}$$

Применяется для:

- ◆ малоуглеродистых сталей;
- ◆ среднеуглеродистых сталей (вместо закалки и высокого отпуска);
- ◆ устранения цементитной сетки в заэвтектоидных сталях.

3. **Отжиг с непрерывным охлаждением** (рис. 3).

4. **Циклический, или маятниковый, отжиг (отжиг на зернистый перлит)** (рис. 4) применяют, если после проведения неполного отжига *цементит* остается пластинчатым. В этом случае после нагрева *выше температуры A_1* следует охлаждение до 680 °С, затем снова нагрев до температуры 750–760 °С и охлаждение.

В результате получают **зернистый цементит** (*цементит исполняет роль центров кристаллизации*) (табл. 1).

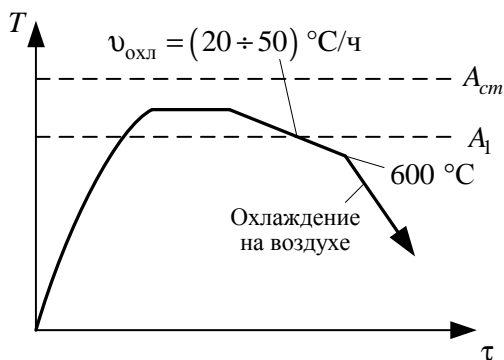


Рис. 3. Отжиг с непрерывным охлаждением

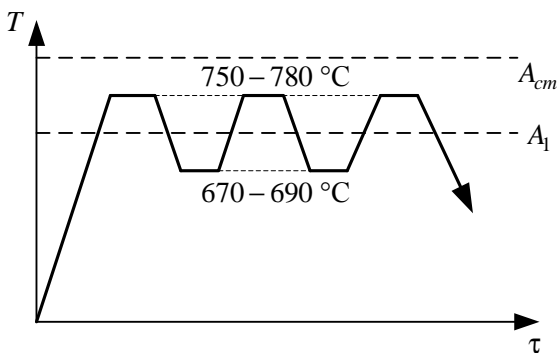


Рис. 4. Циклический или маятниковый отжиг

Таблица 1

Характеристика перлита

Структура	σ_a , МПа	НВ	δ , %
Перлит зернистый	630	180–200	20
Перлит пластинчатый	830	220–240	15

5. Изотермический отжиг — после нагрева до требуемой температуры изделие быстро охлаждают до температуры на 50–100 °C

ниже критической температуры A_1 и выдерживают до полного превращения *аустенита* в *перлит*, затем охлаждают на спокойном воздухе (рис. 5). Температура изотермической выдержки близка к температуре минимальной устойчивости *аустенита*.

В результате получают более однородную структуру, так как превращение происходит при одинаковой степени переохлаждения. Лучшая частота поверхности и обработка резанием, отсутствие отпускной хрупкости. Значительно сокращается длительность процесса. Применяют для легированных сталей.

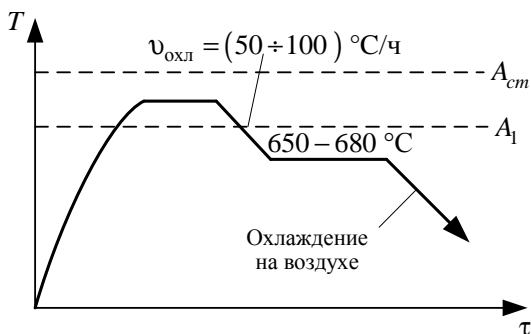


Рис. 5. Изотермический отжиг

Для доэвтектоидной стали можно применять как *отжиг I рода*, так и *отжиг II рода*.

Патентирование — это особый вид отжига, который применяется для изготовления высокопрочной проволоки.

Низкая температура превращения позволяет получить равномерную мелкую структуру. Такая структура называется **троостит**. После отжига сталь подвергают холодной деформации, волочению. В результате мелкой структуры и наклепа получают металл прочностью 2000–5000 МПа.

4. ДЕФЕКТЫ ПРИ ОТЖИГЕ

В процессе отжига и нормализации может возникать неисправимый и исправимый брак (дефекты). Наиболее распространенными видами дефектов и брака являются: окисление, обезуглероживание, перегрев и пережог стали.

1. Окисление. При нагреве в пламенных или электрических печах поверхность стальных деталей взаимодействует с печными газами. В результате металл окисляется и на деталях образуется окалина. С повышением температуры и времени выдержки окисление резко возрастает. Образование окалины не только вызывает угар (потерю) металла, но и искажает геометрическую форму деталей. Поверхность стали под окалиной получается разъеденной и неровной, что затрудняет обработку металла режущим инструментом. Окалину с поверхности деталей удаляют или травлением в серной кислоте, или очисткой в дробеструйных установках.

2. Обезуглероживание. Обезуглероживание, т. е. выгорание углерода с поверхности деталей, всегда происходит при окислении стали. Обезуглероживание резко снижает прочностные свойства конструкционной стали.

Кроме того, детали с обезуглероженной поверхностью склонны к закалочным трещинам и короблению. Особенно большое обезуглероживание наблюдается при нагреве металла в электрических печах.

Для предохранения деталей от окисления, а следовательно, и от обезуглероживания в процессе отжига, нормализации и закалки применяют неокисляющие (контролируемые) атмосферы.

Для защиты деталей и заготовок от окисления и обезуглероживания при высоких температурах в рабочее пространство печи вводят защитные газы. Можно также создать защитную (контролируемую) атмосферу, которая может быть науглероживающей.

Контролируемые атмосферы обычно вводят при отжиге или закалке в рабочее пространство печи. В зависимости от химического состава контролируемые атмосферы могут быть нейтральными, восстановительными или науглероживающими.

Контролируемые атмосферы получают различными методами: разложением аммиака на азот (25 %) и водород (75 %), газификацией древесного угля, осветительного керосина и т. п.

Наиболее универсальной и эффективной газовой средой является эндотермическая, получаемая в результате переработки природного газа в специальных установках — эндотермических генераторах.

Под *эндотермической* понимается атмосфера, получаемая в генераторах, где реакции протекают с поглощением тепла.

Эндотермическая атмосфера имеет следующий состав: ~ 20 % CO; ~ 40 % H₂; ~ 40 % N₂.

Она может быть использована почти для всех термических и химико-термических операций, причем состав ее можно регулировать по точке росы.

3. Перегрев. Сталь перегревается при очень высокой температуре отжига и нормализации, а также при большой выдержке. При перегреве зерна в стали укрупняются, что ведет к снижению прочности, вязкости и образованию закалочных трещин. Такой дефект стали устраняют повторным правильным отжигом или нормализацией.

4. Пережог. При нагреве до высоких температур получается пережог стали, выражающийся в оплавлении поверхности деталей и окислении зерен. При высокой температуре нагрева кислород из окружающей печной атмосферы проникает внутрь нагретой стали, при этом границы зерен сильно окисляются. Сталь теряет пластические свойства, прочность и становится настолько хрупкой, что при малейших ударах разрушается. Пережженную сталь исправить термической обработкой невозможно, поэтому она идет на переплавку.

5. ПРИМЕНЕНИЕ ОТЖИГА

Рекристаллизация нагартованной конструкционной стали может происходить при соответствующей выдержке, как правило, при всех видах отжига. Скорость охлаждения при *отжиге*, а также время выдержки при *изотермическом отжиге* должны обеспечивать распад аустенита в зоне перлитного превращения. Чем выше температура превращения, тем меньше твердость стали. Понижение температуры нагрева при *изотермическом отжиге* легированной стали приводит к меньшей устойчивости аустенита в зоне перлитного превращения по сравнению с полным отжигом и, следовательно, ускоряет процесс отжига стали. Увеличение степени легирования стали повышает устойчивость аустенита, поэтому необходимо применять более медленные скорости охлаждения или увеличивать выдержки при изотермическом отжиге. Для улучшения механической обрабатываемости малолегированной стали, содержащей менее 0,5 % углерода, применяют обычно *изотермический отжиг*, обеспечивающий структуру пластинчатого перлита и феррита.

Среднеуглеродистую легированную сталь для ускорения термической обработки перед механической обработкой вместо высокого отжига подвергают *изотермическому отжигу*. Высокоуглеродистая сталь обладает оптимальной механической обрабатываемостью при структуре зернистого перлита, достигаемой неполным отжигом с нагревом немного выше точки A_1 и последующим медленным охлаждением (*сфероидизацией*). Для образования максимального количества зернистого перлита высокоуглеродистую сталь подвергают иногда *маятниковому, или циклическому, отжигу*, заключающемуся в повторных нагревах и охлаждении около точки A_1 . Для повышения пластической деформации сталь подвергают *неполному отжигу* с целью получения структуры зернистого перлита. Для отжига нагартованной стали обычно применяют *неполный отжиг*. При отжиге высоколегированной конструкционной стали для максимального смягчения часто применяют сложные циклы охлаждения: производят нагрев до температуры выше A_1

и ниже A_3 , охлаждают до температуры ниже минимальной устойчивости аустенита (450–550 °С), повышают температуру до зоны несколько выше минимальной устойчивости аустенита (660–670 °С) и выдерживают до полного распада аустенита; переохлаждение стали до 450–550 °С производится для уменьшения устойчивости аустенита при 600–670 °С. Медленное охлаждение при отжиге в интервале температур 450–600 °С у многих легированных сталей вызывает отпускную хрупкость, приводящую к понижению вязкости. Эта хрупкость полностью устраняется при последующей закалке стали. Во избежание отпускной хрупкости стали при отжиге после окончания превращения аустенита рекомендуется дальнейшее охлаждение проводить на воздухе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

1. Дайте определение отжига сталей.
2. Какие виды отжига вы знаете?
3. Расскажите, в чем основное отличие нормализации от других видов термической обработки.
4. Сформулируйте основную цель отжига.
5. Определите, к какому роду отжига относится отжиг для снятия напряжений.
6. Расскажите, по какой причине возникают внутренние напряжения.
7. Определите, как происходит переход упругой деформации в пластическую.
8. Укажите, каково назначение рекристаллизационного отжига, полного, неполного, нормализации.
9. Определите, какая термическая обработка полностью устраняет внутренние напряжения.
10. Объясните, как проводится изотермический отжиг.
11. Докажите, почему не проводится полный отжиг для заэвтектоидной стали.
12. Укажите, в какой среде охлаждаются стали при нормализации.
13. Определите, до каких температур нагревается доэвтектоидная сталь перед полной закалкой, полным, изотермическим отжигом, нормализацией.
14. Объясните, можно ли при изотермическом отжиге устранить пороки структуры после литья иковки.
15. Расскажите, каково назначение гомогенизирующего отжига.
16. Определите, какая структура сформируется у стали 45 после полного, неполного, изотермического отжига и нормализации.
17. Определите, какова структура стали У10 после полного и неполного отжига.

РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Турилина В.Ю.* Материаловедение. Механические свойства металлов. Термическая обработка металлов. Специальные стали и сплавы. — М.: МИСИС, 2013. — 154 с. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=47489.
2. *Шуваева Е.А., Перминов А.С.* Материаловедение. Неметаллические и композиционные материалы. — М.: МИСИС, 2013. — 77 с. URL: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=47490.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
1. КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИЗУЧЕНИЯ, ИССЛЕДОВАНИЯ. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	4
2. ОТЖИГ I РОДА	5
2.1. Виды отжига I рода	5
3. ОТЖИГ II РОДА	10
3.1. Виды отжига II рода по способу охлаждения	13
4. ДЕФЕКТЫ ПРИ ОТЖИГЕ	16
5. ПРИМЕНЕНИЕ ОТЖИГА	18
ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ	20
РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА	21

Наталья Сергеевна Герасимова
Инна Аркадьевна Филиппова

ВИДЫ ОТЖИГА СТАЛЕЙ

Учебное пособие

Редактор *С.Н. Капранов*
Корректор *Т.В. Тимофеева*
Технический редактор *А.Л. Репкин*

Подписано в печать 27.02.2017.
Формат 60×84/16. Печать офсетная. Бумага офсетная. Гарнитура «Таймс».
Печ. л. 1,5. Усл. п. л. 1,4. Тираж 50 экз. Заказ № 19

Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
107005, Москва, 2-я Бауманская, 5

Изготовлено в редакционно-издательском отделе
КФ МГТУ им. Н.Э. Баумана
248000, г. Калуга, ул. Баженова, 2, тел. 57–31–87