

ДИАГРАММА ЖЕЛЕЗО-УГЛЕРОД: ИЗВЕСТНЫЕ И ПРЕДПОЛАГАЕМЫЕ КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ

Михайлов А.В., аспирант каф. Материаловедения и технологии художественных изделий

Шахназакров К.Ю., к.т.н., доцент каф. Материаловедения и технологии художественных изделий

Санкт-петербургский горный университет
Санкт-Петербург

На диаграмме железо-углерод (Рисунок 1) на оси ординат обращают на себя внимание «некруглые» температуры 768 °C, 911 °C и 1392 °C. Это так называемые критические температуры, или – критические точки (масштаб по оси температур на рисунке кроме интервала 300 – 600 °C, не соблюден). При 450 °C находится еще одна критическая (узловая, сингулярная) точка, сведений о которой в доступной авторам литературе не обнаружено.

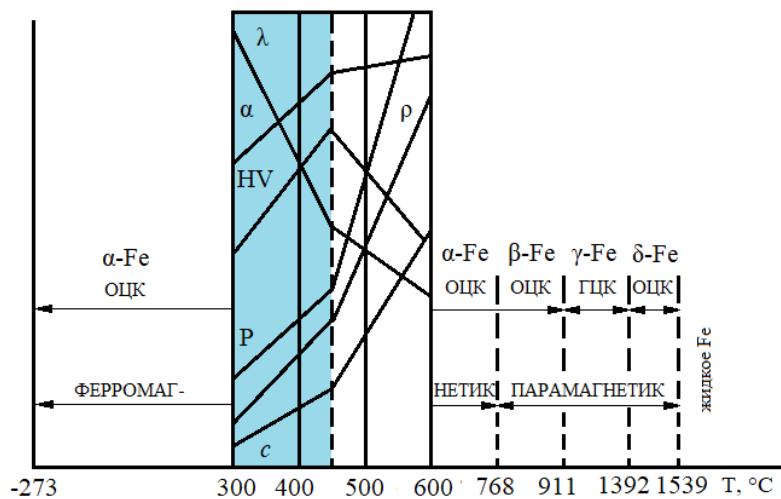


Рисунок – 1 Схематизированная зависимость физико-механических свойств железа от температуры

При нагреве выше 768 °C (точка Кюри) ферромагнитное α -Fe (области существования α -, β -, γ -, δ – железа показаны на Рисунке 1) становится парамагнитным, в быту мы говорим – немагнитным) и называется β -Fe [1].

При охлаждении ниже точки Кюри парамагнитное β -Fe железо становится (самопроизвольно!) ферромагнитным. Это чудо – ферромагнетизм – че-

ловечеству подарила природа. Не обладай железо ферромагнетизмом, трансформаторы, электрогенераторы, электродвигатели пришлось бы делать из других ферромагнетиков – никеля и кобальта; последний примерно в 400 раз дороже железа.

При нагреве выше 911°C $\beta\text{-Fe}$, имеющее (как и $\alpha\text{-Fe}$) объемно-центрированную кубическую (ОЦК) кристаллическую решетку, превращается в $\gamma\text{-Fe}$ с гранецентрированной (ГЦК) кубической решеткой (рисунки 2 и 3).

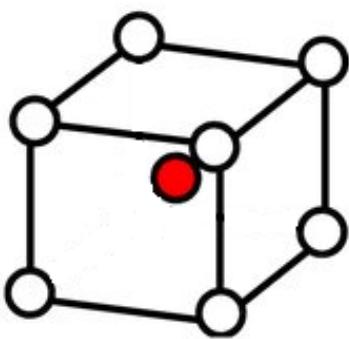


Рисунок – 2 ОЦК-решетка

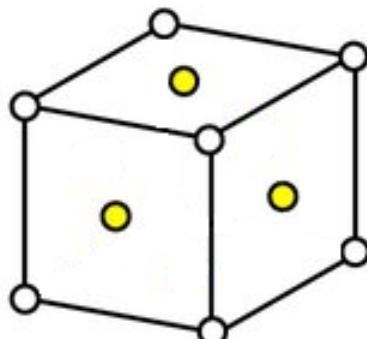


Рисунок – 3 ГЦК-решетка

Это чудо с перестройкой (переупаковкой) атомов делает возможным повышение твердости и прочности стали в несколько раз путем закалки.

*«Так расторопный кузнец,
Раскалив добела топор или секиру,
В холодную воду их погружает,
Чтобы двойную крепость имели.»*

Гомер, VIII-VII вв. до н.э.

Поясним, для чего нужен нагрев под закалку. Перед закалкой стали имеют двухфазную структуру - $\alpha\text{-Fe}$ с очень низким содержанием углерода (поскольку ОЦК решетка его практически не растворяет) плюс карбид железа (цементит), где сосредоточен почти весь углерод, имеющийся в стали.

Проведем аналогию: ледяная вода с кристалликами сахара – двухфазная смесь, в первой фазе которой (вода) сахар почти не растворен, а сосредоточен практически во второй фазе – кристалликах сахара.

Так вот, нагрев нужен, чтобы:

- ОЦК решетка перестроилась в ГЦК решетку;
- карбид железа (кристаллики сахара) растворился в ГЦК решетке (горячей воде); а она растворяет очень много углерода – до 2 %.

Итак, при температуре закалки у стали однофазная структура (как у горячего сиропа), именуемая аустенитом (твердый раствор углерода в $\gamma\text{-Fe}$).

Затем следует погружение в воду или закалочное масло, что позволяет карбиду железа выделиться при охлаждении (как и кристалликам сахара из сиропа). При охлаждении ГЦК решетка перестраивается в ОЦК решетку, которая оказывается пересыщенной углеродом. Атомам углерода нет места в ОЦК ре-

шетке, поэтому она будет сильно искажена ими (как раздувается банка с испорченными консервами). Этот пересыщенный и искаженный раствор углерода в α -Fe (ОЦК) называется мартенситом. Искажения решетки определяют высокую твердость и прочность мартенсита.

Перестройка ГЦК→ОЦК идет по так называемому сдвиговому (мартенситному) механизму: в измеряемом десятками микрометров объемчике аустенита (ГЦК) атомы железа сообща, милиционированно (как взвод солдат по команде) мгновенно сдвигаются, приобретая ОЦК конфигурацию (мартенсит). Во втором и других объемчиках аустенита все повторяется, но при более низких температурах. Итак: в каждом объемчике перестройка ГЦК→ОЦК мгновенна, а весь кусок стали (дивизия) превращается в мартенсит при охлаждении в интервале температур (~ 300 -100 °C например для стали с 0,4 % углерода). Вспомним, что по диаграмме Fe-C перестройка железа происходит при 911 °C. Способность у переохлаждению аустенита (ГЦК) при быстром охлаждении связана с присутствием углерода и легирующих добавок (хром, никель, марганец).

Мартенситное превращение уместно сравнить с получением искусственных алмазов. Если рядом с куском графита устроить взрыв (мгновенное повышение давления), то образуется множество мелких кристалликов алмаза (это тоже углерод, но с иной кристаллической решеткой), не имеющих ювелирного назначения.

Мартенсит хрупок (малопластичен). Именуемый отпуском нагрев мартенсита приводит к частичному выделению углерода из пересыщенного атвального раствора (мартенсита) в виде карбида железа (также засахаривается варенье), что снижает твердость и прочность за счет уменьшения искажений решетки, но резко повышает пластичность.

Кухонный нож опускают при ~ 200 °C, ствол пушки при ~ 500 °C, ротор турбины при ~ 650 °C, исходя из требований к сочетанию прочности и пластичности конкретных изделий.

Если секицу охладить не в воде, а в печи, т.е. медленно, из аустенита успеет выделиться карбид железа (кристаллики сахара из сиропа), ГЦК решетка перестроится в ОЦК. Перестройка ГЦК→ОЦК идет медленно (десятки минут), постепенно, как превращение стекающей по сосульке воды в лед.

Получим двухфазную структуру: α -Fe и карбид. Такая операция называется отжигом. После него сталь хорошо обрабатывается резаньем.

Маршрутная технология изготовления стального изделия выглядит так: ковка (прокатка, штамповка и т.п.) отжиг, предварительная механическая обработка, закалка, отпуск, окончательная механическая обработка (как правило, только шлифование).

Критическую точку 911 °C можно понизить вплоть до абсолютного нуля (-273 °C), если выплавлять сталь с легирующими добавками, главным образом никелем и марганцем. Тогда сталь будет иметь аустенитную (ГЦК) структуру. Если из такой стали сделать корабль, то магнитная мина не будет к нему притягиваться, так как аустенит парамагнитен.

Вспомним «Пятнадцатилетнего капитана»: коварный замысел не удался бы Негоро, если бы он подсунул под компас топор с аустенитной структурой. К сожалению, топор имел мартенситную (ОЦК) структуру, т.е. был ферромагнитным.

Пластичность аустенита мало уменьшается при понижении температуры вплоть до абсолютного нуля, что используется в криогенном (низкотемпературном) машиностроении.

Нагрев выше 1392 °С приводит к перестройке решетки из ГЦК (γ -Fe) в ОЦК (δ -Fe). Легированием хромом и никелем можно понизить критическую точку так, что, например, при 20 °С у стали будет дуплекс-структура: ~50 % γ -Fe + ~50 % δ -Fe. Сталь с такой структурой широко используется в химическом машиностроении.

Крупнейший металловед Пауль Обергоффер в 1925 году, ссылаясь на работы 1912 и 1916 годов, предположил, что в интервале 400-500 °С у железа может быть еще одно превращение [2]. Обоснованного подтверждения или опровержения этой гипотезы нами не обнаружено.

Чтобы убедиться в правильности предвосхищения Обергоффера, достаточно взглянуть на Рисунок 1, где при ~ 450 °С резко меняются следующие, показанные качественно, свойства железа: теплоемкость c , теплопроводность λ , электросопротивление ρ , твердость HV, коэффициент линейного расширения α , растворимость Р углерода в α -Fe [3, 4]. Такие изменения свойств характерны для критических точек железа [5].

Список литературы:

1. Бозорт, Р. Ферромагнетизм. М.: Изд. иностр. лит-ры. – 1956. – 784 с.
2. Обергоффер, П. Техническое железо. Л.М.: Металлургиздат. – 1940. – 535 с.
3. Гудремон Э. Специальные стали. В 2-х т. Т.1. М.: Металлургиздат. – 1959. – 952 с.
4. Лозинский, М.Г. Высокотемпературная металлография. М.: Машгиз. – 1956. – 312 с.
5. Шахназаров К.Ю. 430 ± 30 °С – узловая (критическая) температура железа и углеродистой стали/ К.Ю. Шахназаров, А.Ю. Шахназаров // Металловедение и термическая обработка металлов.– 2001.– № 11.– С. 24 – 25.