

Исследования по проблеме «Аустенит и его превращения»

Часть 2

УДК 621.39
ББК 32
И88

И88 Исследования по проблеме «Аустенит и его превращения»: Часть 2 / – М.: Книга по Требованию, 2021. – 234 с.

ISBN 978-5-458-60491-8

Труды Уральского филиала академии наук СССР.
Выпуск 10.
Исследования по проблеме «Аустенит и его превращения».
Часть 2.

ISBN 978-5-458-60491-8

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2021
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2021

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первозданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

С. С. ШТЕЙНБЕРГ

Советская металлургия понесла тяжелую утрату.

7 сентября 1940 г. в Москве скончался один из крупнейших ученых, член-корреспондент Академии Наук СССР, директор Института металлургии, металловедения и металлофизики Уральского филиала Академии Наук СССР, профессор-доктор Уральского индустриального института, орденоносец Сергей Самойлович Штейнберг.

Сергей Самойлович работал, главным образом, в двух направлениях: над проблемой превращений аустенита и над проблемой зерна в стали. Эти направления были самыми актуальными в металловедении и дали наибольший эффект как для теории, так и для практики термической обработки стали.

Работы С. С. Штейнберга в этой области имеют громадное значение для нашей социалистической промышленности и являются оригинальными в мировой науке.

Сергей Самойлович создал пользующуюся всеобщей известностью уральскую школу металловедов-термистов. Несмотря на преклонный возраст и слабое здоровье, он до последнего времени продолжал живо интересоваться и плодотворно руководить исследовательскими работами, проводимыми в Уральском филиале Академии Наук, Уральском индустриальном институте и Уральском институте металлов.

Обладая живым кипучим умом и исключительной работоспособностью, Сергей Самойлович был для всех окружающих примером того, как надо работать.

Его труды будут долгие годы служить руководством для научных работников и инженеров-производственников металлургов и машиностроителей.

С. С. ШТЕЙНБЕРГ

**НОВЫЕ ОСНОВЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ СТАЛИ,
ПОСТРОЕННЫЕ НА ЗАКОНАХ КИНЕТИКИ ПРЕВРАЩЕНИЯ
ПЕРЕОХЛАЖДЕННОГО АУСТЕНИТА**

Чтобы ясно себе представить, в каком отношении и в какой мере новейшие исследования по кинетике превращения переохлажденного аустенита изменили научные основы термической обработки стали, проще всего сравнить вытекающие из этих исследований представления об основных моментах термической обработки стали с теми представлениями, которые развиты в учении об основах термической обработки одного из наиболее крупных современных ученых в этой области — А. Портвена (A. Portevin).

Портвен недавно выпустил небольшую книгу: «Introduction à l'étude des traitements thermiques des produits metallurgiques» (1934 г.), которая переведена на русский язык и издана ГОНТИ в 1939 г. с предисловием акад. А. А. Байкова.

В своем предисловии акад. Байков рекомендует книгу Портвена как «шедевр по форме и содержанию». «Пользуясь ограниченным, но тщательно подобранным фактическим материалом, — говорит Байков, — автор с необычайной простотой, ясностью и логичностью излагает сущность явлений, происходящих в металлах (стали и сплавах) при различной скорости охлаждения, связывая изменения структуры (превращение аустенита) с механическими свойствами, с одной стороны, и учитывая влияние состава, с другой стороны. Строго и систематически придерживаясь определенного плана изложения, он дает возможность глубоко проникнуть в сущность явлений, происходящих при термической обработке, и с полным пониманием сознательно овладеть искусством применять эти данные на практике. Глубокое проникновение в основную сущность вопроса, простота и изящество изложения, наконец небольшой объем этого труда заставляют признать его исключительным событием в металлургической литературе. Этот труд с громадным интересом и большой пользой будет изучаться и молодыми начинающими исследователями и опытными крупными специалистами в области термической обработки металлов».¹

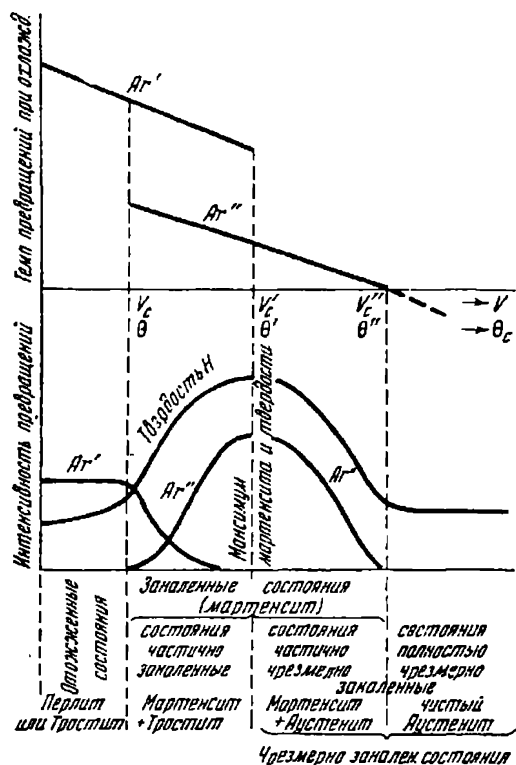
В виду столь лестной рекомендации акад. Байкова особенно интересным и поучительным является сопоставление представлений об основных моментах термической обработки, вытекающих из новейших исследований кинетики превращения переохлажденного аустенита, с теми представлениями по этому вопросу, которые развиты в последней книге крупнейшего ученого в области термической обработки стали, каковым по справедливости является А. Портвен.

¹ Портвен А. Введение в изучение термической обработки металлургических продуктов. ГОНТИ, 1939, стр. 3.

Краткая характеристика взглядов Портвена. Влияние скорости охлаждения на критические точки

Как правильно, указывает Портвен, всякая термическая обработка вполне характеризуется кривой нагрева, выдержки и охлаждения. В этой кривой наиболее существенным (при условии нагрева до аустенитного состояния) является участок, характеризующий скорость охлаждения. Три основных типа термической обработки — отжиг, нормализация и закалка — различаются скоростью охлаждения, а именно:

При отжиге скорость охлаждения меньше . . . $10^{\circ}/\text{мин.}$
 » нормализации скорость охлаждения меньше $20—200^{\circ}/\text{мин.}$
 » закалке » » выше . $6000^{\circ}/\text{мин.}$



Фиг. 1. Влияние скорости охлаждения аустенита на положение критических точек (переохлаждение аустенита) и структуру стали (Портвен).

Поэтому основным вопросом термической обработки является следующий: как действует скорость охлаждения на степень переохлаждения аустенита, на положение критических точек, на получаемые структуры стали и механические свойства. Ответ на эти вопросы Портвен фиксирует в форме диаграмм и микрофотографий (фиг. 1 и 2).

Согласно этим диаграммам при увеличивающейся скорости охлаждения (для простоты Портвен берет эвтектоидную сталь):

1) имеет место прогрессивное и равномерное снижение точек $A_{T1}(Ag')$; параллельно с этим снижением структура перлита превращается в троостит;

2) при достижении некоторой «критической» величины скорости охлаждения имеет место появление второй критической точки (Ag''), лежащей на $300—350^{\circ}$ ниже Ag' ; в структуре рядом с трооститом обнаруживается мартенсит;

3) при дальнейшем увеличении скорости охлаждения точка Ag''

снижается так же, как и точка Ag' ; при этом количество троостита уменьшается, мартенсита увеличивается;

4) при некоторой величине скорости охлаждения точка Ag' исчезает, остается только точка Ag'' ; соответственно в структуре исчезает троостит, остается только мартенсит;

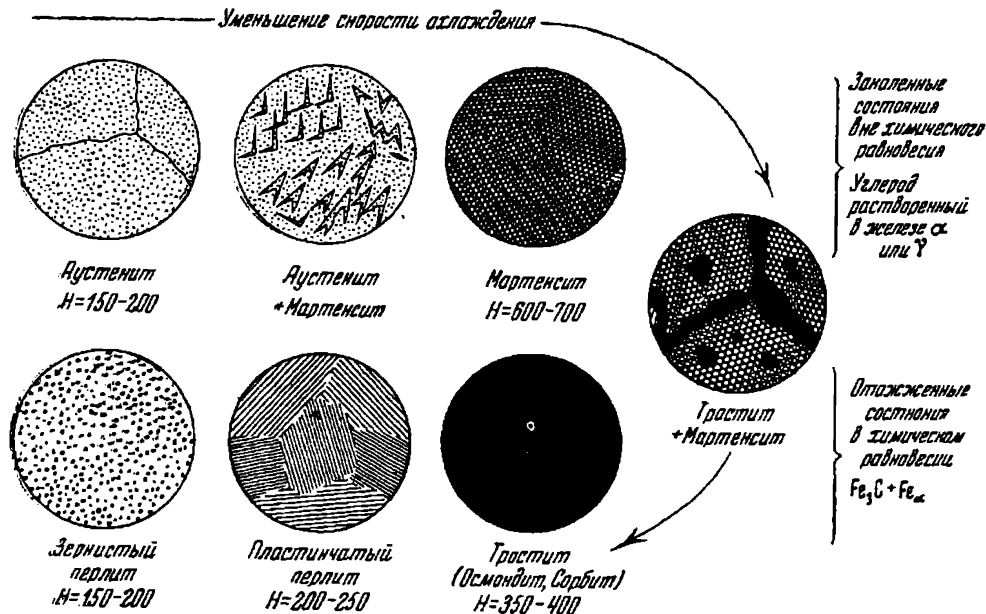
5) при дальнейшем увеличении скорости охлаждения точка Ag'' продолжает равномерно снижаться; в структуре рядом с мартенситом появляется аустенит; количество аустенита увеличивается параллельно с увеличением скорости охлаждения и снижением точки Ag'' ;

6) при некоторой скорости охлаждения точка Ag'' снижается до комнатной температуры; при этом мартенситная составляющая полностью устраняется из структуры закаленной стали: получаемая структура является аустенитом. При дальнейшем увеличении скорости охлаждения точка Ag''

должна снижаться ниже комнатной температуры и структура остается аустенитовой.

Мартенситное превращение, по мнению Портвена, полностью происходит только при критической точке Ag'' , т. е. при критической скорости охлаждения; при более медленном охлаждении рядом с мартенситом появляется троостит, что вызывает уменьшение твердости; при более быстром охлаждении рядом с мартенситом появляется аустенит и соответственно уменьшается твердость.

Рядом со скоростью охлаждения, по их действию на критические точки и структуру стали, Портвен ставит повышение температуры нагрева и влияние легирующих элементов (марганец, никель и др.). Как увеличивающаяся



Фиг. 2. Влияние скорости охлаждения аустенита на структуру стали (Портвен). Значения для твердости (H) только качественные.

скорость охлаждения, так и повышение температуры нагрева и добавление легирующих элементов снижают критические точки Ag' и Ag'' , т. е. увеличивают количество троостита (при скоростях охлаждения ниже критической) и количество аустенита (при скоростях охлаждения выше критической).¹

«При использовании всех факторов, способствующих уменьшению критической скорости закалики — большая скорость охлаждения (небольшие образцы, закаленные в ледяной воде), высокая температура нагрева при закалке, повышенное содержание углерода (больше 0.9%), марганца (2%) — можно добиться того, что превращение снизится до температуры, ниже обыкновенной. Превращение вовсе не будет совершаться. Зафиксируется твердый раствор».

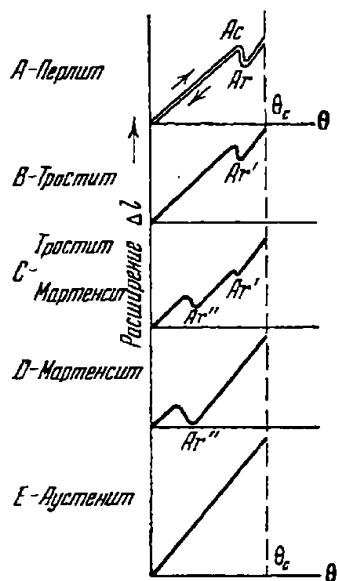
«Для углеродистой стали получить чистый аустенит не удастся даже при быстром охлаждении (разрядка наша.—С. Ш.), при закалке небольших образцов углеродистой стали в ледяной воде от высокой температуры мы получим только смесь аустенита и мартенсита».

Для наглядности и большей убедительности приводим из книги Портвена dilatометрические кривые, показывающие влияние скорости охлаждения на положение критических точек (фиг. 3), а также последовательную серию

¹ См. у Портвена, стр. 53—56.

микроструктур, полученных с прогрессивно увеличивающейся скоростью охлаждения.

Портвену известно, что, согласно новым исследованиям, мартенситная точка не зависит от скорости охлаждения и что мартенситное превращение нельзя устранить никакой скоростью охлаждения, так как оно происходит со скоростью взрыва (стр. 57); однако он думает, что температура нагрева снижает мартенситную точку так же, как и легирующие элементы; он полагает также, что его схема сохраняет общее значение (стр. 54—55) и после указанных исследований.



Фиг. 3. Влияние скорости охлаждения на критические точки (Портвен).

Трудно понять, каким образом, зная новые исследования по кинетике превращения аустенита, Портвен не уяснил себе, что они, с одной стороны, создают прочную научную базу, объясняющую его диаграмму закали (в верхней температурной ее части), т. е. снижение $A_{T'}$ при увеличивающейся скорости охлаждения и раздвоение критических точек на $A_{T'}$ и $A_{T''}$ при некоторой («критической») скорости охлаждения, а с другой, неопровержимо показывают неправильность нижней части его диаграммы, относящейся к собственно мартенситному превращению, а также проводимого им полного параллелизма между действием на перлитотрооститное ($A_{T'}$) и мартенситное превращение ($A_{T''}$) факторов: скорости охлаждения, температуры перегрева и легирования. Объяснить это возможно лишь гипотезой логической простоты и стройности его схемы, которая не позволяет делать логических выводов из новых экспериментальных фактов, создавая у автора своего рода умственную аберрацию.

Представления о влиянии скорости охлаждения, температуры нагрева и легирующих элементов на критические точки, вытекающие из изучения кинетики изотермического превращения аустенита

Исследование кинетики изотермического превращения аустенита на различных ступенях переохлаждения показало, что аустенит может превращаться в альфа-состояние по двум принципиально различным типам: перлитотрооститному (в верхней температурной зоне) и мартенситному (в нижней температурной зоне). Схематически превращение этих двух типов изображено на фиг. 4.

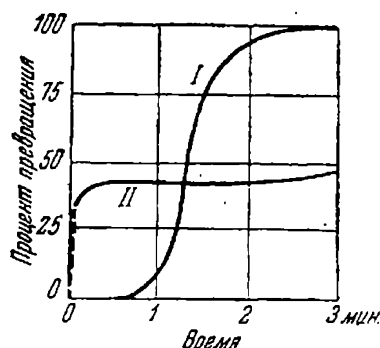
Наиболее важными различиями этих двух типов превращения являются следующие:

1. Перлитотрооститное превращение имеет так называемый «инкубационный» период, в течение которого в переохлажденном аустените не наблюдается никаких признаков превращения. Наличие инкубационного периода является необходимым условием для возможности переохлаждения аустенита ниже критических температур равновесной диаграммы. Перлитотрооститное превращение для углеродистой стали при достаточной выдержке идет до конца, т. е. до полного распада аустенита.

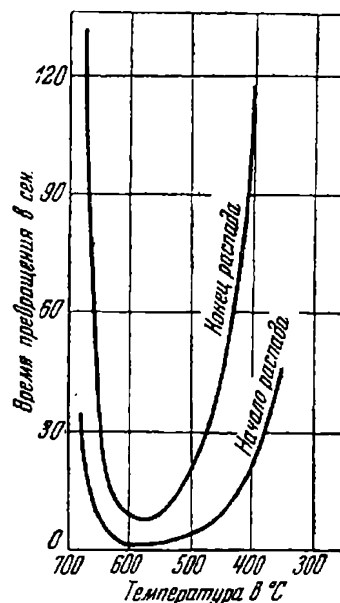
Длительность инкубационного периода колеблется для углеродистой эвтектоидной стали от доли секунды до нескольких минут; наименее короткий инкубационный период и наибольшая скорость превращения относятся

к температурному интервалу 500—600°; как выше, так и ниже этого интервала длительность инкубационного периода увеличивается; при 700° он измеряется (для углеродистой эвтектоидной стали) приблизительно 1 мин., а при 250° 10—15 мин. (фиг. 5); соответственно возрастает устойчивость аустенита. Переохлажденный до 250° аустенит углеродистой эвтектоидной стали может охлаждаться в печи вплоть до мартенситной точки без опасности распада.

2. Мартенситное превращение не имеет заметного инкубационного периода: оно возникает мгновенно, подобно взрыву, как только температура опустится ниже мартенситной точки. Вследствие своей мгновенности и отсутствия инкубационного периода мартенситная точка не может быть снижена никакой скоростью охлаждения.



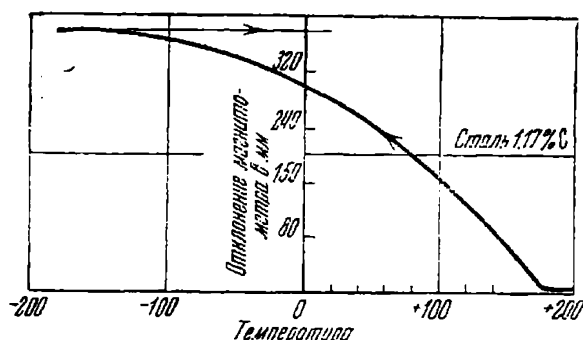
Фиг. 4. Схематические кривые превращения аустенита по перлито-трооститному (I) и мартенситному (II) типам.



Фиг. 5. Кривые инкубационного периода (начало распада) и конца распада для переохлажденного аустенита эвтектоидной углеродистой стали.

Эта независимость мартенситной точки от скорости охлаждения показана опытами Вефера,¹ Френча, Эссера, которые меняли скорость охлаждения от нескольких сотен до нескольких тысяч градусов в секунду; но особенно просто, наглядно и убедительно она демонстрируется определением мартенситной точки при очень медленных охлаждениях в печи (скорость охлаждения порядка 0,05°/сек.), которые дают для нее приблизительно те же температуры, как и скорости охлаждения в несколько сотен и тысяч градусов в секунду.

Другой особенностью мартенситного превращения является



Фиг. 6. Температурно-мартенситная кривая превращения аустенита.

¹ В своих последних исследованиях Вефер находит, что принципиально мартенситное превращение по своей кинетике не отличается от перлитно-трооститного; имеется только очень большая разница в скорости превращения, не допускающая значительного переохлаждения мартенситной точки. При содержании углерода выше 0,4% Вефер считает, что «действие скорости охлаждения на мартенситную точку нельзя заметить» (Mitteil. K. W. Institut für Eisenforschung zu Düsseldorf, Abh. 337, (1937), S. 294; Abh. 318 (1937), S. 55. Эти выводы Вефера не противоречат нашим выводам.

то, что оно не идет до конца, но останавливается, когда значительная доля аустенита остается еще непревращенной; объем превращенного в мартенсит аустенита увеличивается с понижением температуры ниже мартенситной точки; поэтому мартенситное превращение может быть изображено температурно-мартенситной кривой (фиг. 6).

Влияние различных факторов на перлитно-трооститное и мартенситное превращение.

Скорость охлаждения. Влияние скорости охлаждения на перлитно-трооститное превращение

Степень переохлаждения аустенита (снижение точки A_1 для эвтектоидной стали) зависит от двух факторов: скорости охлаждения и стойкости аустенита, которая измеряется длительностью инкубационного периода.

Величина переохлаждения в области перлитно-трооститного превращения поддается математической трактовке.

Предположим скорость охлаждения в интервале $700-300^\circ$ постоянной.

Разобьем температурный интервал охлаждения ниже точки A_1 на ряд бесконечно малых промежутков $d\theta$. Длительность пребывания в этом температурном промежутке определяется частным $\frac{d\theta}{v_{охла}}$, где $v_{охла}$ означает среднюю скорость охлаждения в верхнем температурном охл. интервале.

Отношение длительности пребывания в температурном промежутке $d\theta$ к длительности инкубационного периода для данной температуры $\left(\frac{d\theta}{v_{охла}} \cdot \frac{1}{\text{инк. пер}}\right)$ означает долю инкубационного периода, пройденную на температурном промежутке $d\theta$.

Суммируя величины $\left(\frac{d\theta}{v_{охла}} \cdot \frac{1}{\text{инк. пер}}\right)$ для ряда последовательных температурных промежутков $d\theta$, начиная с A_1 , мы должны при некоторой величине температурного интервала получить отношение, равное единице, т. е. прохождение всего инкубационного периода, за которым уже начинается образование первых зародышевых центров перлитно-трооститного распада.

Эта зависимость выражается следующим уравнением:

$$\int_{\theta=\text{нуль переохла}}^{\theta=\text{вел. переохла}} \frac{d\theta}{v_{охла}} \cdot \left(\frac{1}{\text{инк. пер}}\right) = 1. \quad (1)$$

Уравнение (1) можно написать в следующем виде:

$$\int_{\theta=\text{нуль переохла}}^{\theta=\text{вел. переохла}} d\theta \left(\frac{1}{\text{инк. пер}}\right) = v_{охла}. \quad (2)$$

Из соображений одинаковой размерности левой и правой частей уравнения формулу (2) можно представить так:

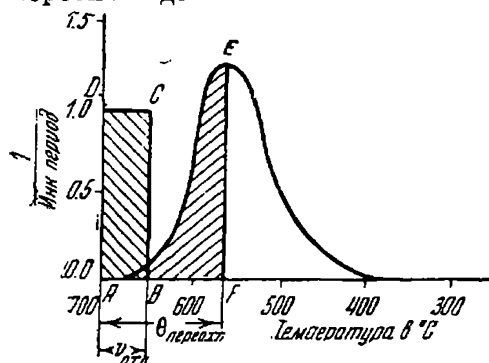
$$\int_{\theta=\text{нуль переохла}}^{\theta=\text{вел. переохла}} d\theta \left(\frac{1}{\text{инк. пер}}\right) = v_{охла} \cdot \frac{1}{\text{ед. вр.}} \quad (3)$$

В графической форме левая часть уравнения представляет площадь кривой $\left(\frac{1}{\text{инк. пер}}\right)$, отнесенной к оси температуры между значениями для температуры: «нуль переохлаждения» и «искомая величина переохлаждения».

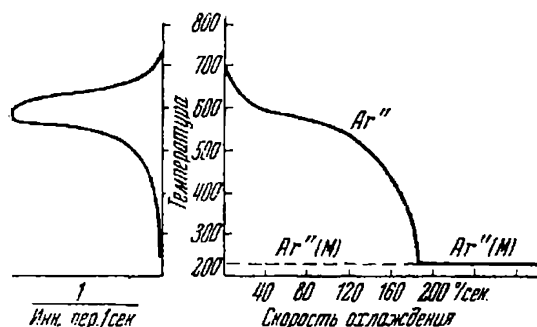
Правая часть уравнения (3) представляет собой площадь прямоугольника со сторонами:

$$\begin{aligned} &\text{по оси температуры} - v_{\text{охла}} \\ &\text{и по оси } \left(\frac{1}{\text{инк. пер}} \right) = \left(\frac{1}{\text{ед. вр}} \right) = 1. \end{aligned}$$

Графическое решение этой задачи для общего случая дано на фиг. 7. Здесь отрезок АВ на оси температур означает скорость охлаждения ($v_{\text{охла}}$); прямоугольник ABCD имеет стороны: $AB = v_{\text{охла}}$; $AD = \frac{1}{\text{ед. вр}} = 1$; AEF — участок площади кривой $\frac{1}{\text{инк. пер}}$ (отнесенной к оси температур), равновеликий площади прямоугольника ABCD. Отрезок AF дает величину переохлаждения.



Фиг. 7. Графическое определение степени переохлаждения аустенита (положение критической точки) в зависимости от скорости охлаждения и кривой стойкости аустенита при различных температурах (для определенной скорости охлаждения).



Фиг. 8. То же, что и на фиг. 7. Общий случай. Скорость охлаждения меняется от нуля до скорости выше критической.

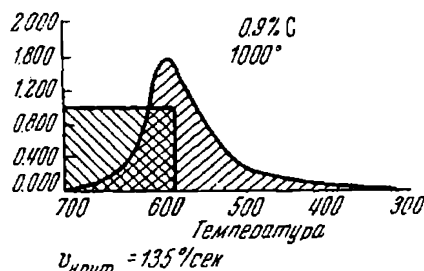
Выводы из предложенного уравнения.

1. На основании предложенного уравнения и экспериментально выведенной кривой $\frac{1}{\text{инк. пер}}$ можно изобразить изменение величины переохлаждения (положение точки Ag') в зависимости от скорости охлаждения (фиг. 8). Мы видим, что кривая переохлаждения состоит из трех участков:

- 1) очень быстрое снижение точки Ag' (A_1 620°); скорость охлаждения от 0 до 16°/сек.;
- 2) очень малое снижение точки Ag' (620—540); скорость охлаждения от 16 до 116°/сек.
- 3) очень крутое снижение Ag' (ниже 540°); скорость охлаждения выше 116°/сек.

2. Критической скоростью охлаждения является такая скорость, которая переохлаждает аустенит в область его значительной устойчивости (ниже 300°), так как ниже этой температуры аустенит должен охлаждаться без распада вплоть до мартенситной точки. Чтобы определить критическую скорость охлаждения, мы должны построить прямоугольник, равновеликий площади, замкнутой между кривой $\frac{1}{\text{инк. пер}}$ и осью температуры; одна сторона этого прямоугольника должна равняться $\frac{1}{\text{ед. вр}}$, другая должна дать искомую критическую скорость закалки. Решение этой задачи представлено на фиг. 9 для углеродистой эвтектоидной стали.

Средняя критическая скорость охлаждения определена в $135^\circ/\text{сек.}$, а для 800° — около $200^\circ/\text{сек.}$ Как известно, Френч определил экспериментальным путем критическую скорость для углеродистой эвтектоидной стали (при 720°) $160^\circ/\text{сек.}$

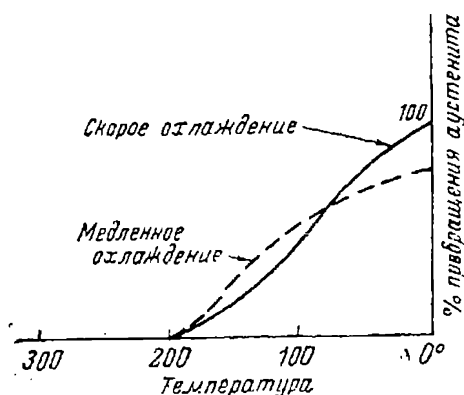


Фиг. 9. Графическое определение критической скорости заковки для углеродистой эвтектоидной стали.

Влияние скорости охлаждения на мартенситное превращение

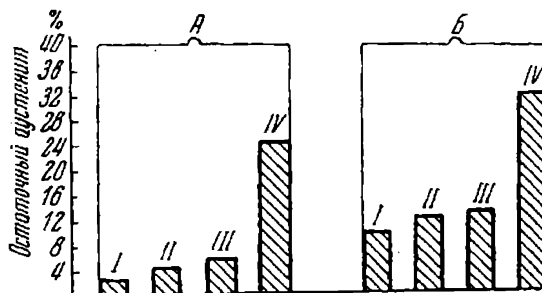
Как уже выше указывалось, опыты показали, что мартенситная точка (Ag'' или M) практически не зависит от скорости охлаждения. До недавнего времени думали, что для получения мартенситного превращения и мартенситной точки необходимо очень быстрое охлаждение аустенита (для углеродистой стали), поэтому в целях регистрирования Ag'' прибегали

к очень сложным саморегистрирующим приборам. Теперь нам известно, что быстрое охлаждение необходимо лишь в интервале $600-500^\circ$; выше и ниже этого интервала стойкость аустенита быстро возрастает (увеличивается длительность инкубационного периода), и поэтому для переохла-



Фиг. 10. Влияние скорости охлаждения на кривую мартенситного превращения.

I — быстрое охлаждение; II — медленное охлаждение.



Фиг. 11. Влияние скорости охлаждения в различных температурных интервалах на количество остаточного аустенита.

А — хромоникелевая сталь с 0.35 С, 4.00% Ni, 1.37 Cr; В — углеродистая сталь с 0.9% С, 0.55% Mn. I — нагрев 1100° , заковка в воду; II — нагрев 1100° , охлаждение в печи до 850° , заковка в воду; III — нагрев 1100° , охлаждение в печи до 850° , заковка в масло (для стали А при 315° , для стали В при 230°), окончательное охлаждение в воде; IV — нагрев 1100° , охлаждение в печи до 850° , заковка в масло, как и в случае III, окончательное охлаждение в горячем масле.

ждения аустенита в этих температурных зонах не требуется скорого охлаждения; ниже 300° длительность инкубационного периода в эвтектоидной углеродистой стали измеряется минутами, а ниже 250° — десятками минут. Поэтому в целях переохлаждения образца в аустенитовом состоянии ниже 300° требуется охлаждение на воздухе, а ниже 250° его можно охлаждать даже с печью, что позволяет отмечать мартенситную точку с точностью до нескольких градусов обыкновенным структурным, магнитным или dilatометрическим методом. Эти определения при скоростях охлаждения от 1 до $100^\circ/\text{мин.}$ дали для мартенситной точки одни и те же температуры, очень близкие к результатам Френча и Вефера, производившим свои исследования при скоростях охлаждения от 6000 до $60\,000^\circ/\text{мин.}$ Они дали также возможность детального изучения мартенситного превращения при медленном охлаждении.