

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования  
«Курганский государственный университет»

Кафедра «Цифровая энергетика»

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ  
НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по курсу «Материаловедение и ТКМ» для студентов направлений  
15.03.04, 13.03.02, 27.03.01, 27.03.04, 13.03.01,  
23.03.03, 23.03.01, 20.03.01, 23.05.01, 15.03.05, 15.03.01

Курган 2023

Кафедра: «Цифровая энергетика».

Дисциплина: «Материаловедение и ТКМ».

Составили: канд. техн. наук, доцент Т. А. Дудорова;  
канд. техн. наук, доцент Л. М. Савиных.

Печатается в соответствии с планом издания, утвержденным методическим советом университета «28» декабря 2022 г.

Утверждены на заседании кафедры «06» марта 2023 г.

## 1 ЦЕЛЬ РАБОТЫ

- 1.1 Определить влияние скорости охлаждения на микроструктуру стали, предварительно нагретой до аустенитного состояния.
- 1.2 Определить влияние микроструктуры на свойства стали.
- 1.3 Определить, какая среда охлаждения целесообразна для закалки данной марки на мартенсит.
- 1.4 Определить, какая среда охлаждения предпочтительна для получения феррито-перлитной структуры.

## 2 ЗАДАНИЕ

- 2.1 Ознакомиться с термокинетической диаграммой распада переохлажденного аустенита для исследуемой марки стали.
- 2.2 Произвести нагрев образцов до аустенитного состояния.
- 2.3 Произвести охлаждение образцов с различной скоростью (в воде, в масле, на воздухе и с печью).
- 2.4 Определить твердость образцов.
- 2.5 Составить отчет.

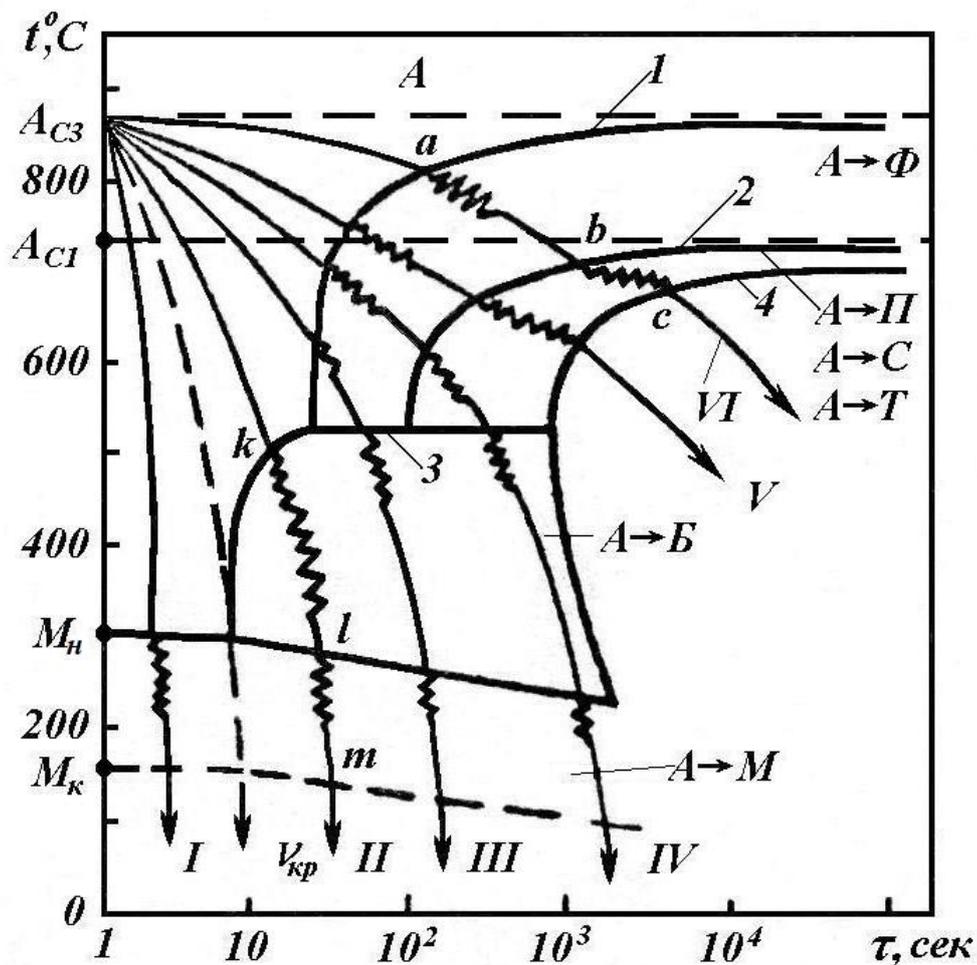
## 3 ПРИБОРЫ, МАТЕРИАЛЫ И ИНСТРУМЕНТ:

- а) трубчатая или муфельная печь;
- б) электронный потенциометр с термопарой;
- в) закалочный бак с водой;
- г) закалочный бак с маслом;
- д) клещи, крючки, совок, корзины;
- е) шлифовальный станок;
- ж) твердомер;
- и) полировальный станок;
- к) 5%-ный раствор  $\text{HNO}_3$  в спирте;
- л) фильтровальная бумага, вата, спирт;
- м) микроскоп металлографический;
- н) образцы исследуемой марки стали (по указанию преподавателя).

## 4 ВВЕДЕНИЕ

Целью любой термической обработки является получение заданных свойств путем изменения структурного состояния стали. Для этого при закалке, нормализации, отжиге доэвтектоидную сталь нагревают до температуры выше  $A_{C3}$  на 30–50 °С, при которой образуется однородный мелкозернистый аустенит. Последующее охлаждение стали ниже точек  $A_3$  и  $A_1$  приводит к распаду аустенита. Это объясняется тем, что в новых условиях (при температурах ниже 727 °С) свободная энергия аустенита оказывается выше свободной энергии

продуктов его распада  $F_A > F_{\text{прод. превр.}}$ . В связи с этим аустенит становится неустойчивым и называется переохлажденным. Характер распада переохлажденного аустенита зависит от степени переохлаждения. Степенью переохлаждения называют разность между равновесной и фактической температурами превращения. Известно, что чем интенсивнее охлаждается сталь, тем до более низкой температуры переохлаждается аустенит. Распад аустенита при непрерывном охлаждении описывается термокинетической диаграммой (рисунок 1).



1 – начало выделения феррита; 2 – начало перлитного превращения;  
 3 – начало бейнитного превращения; 4 – окончание перлитного превращения;  
 $M_n, M_k$  – начало и окончание мартенситного превращения

Рисунок 1 – Термокинетическая диаграмма

Например, при малой скорости охлаждения (кривая VI) превращение начинается в точке *a* при температуре 800 °C и заканчивается в точке *c* при температуре 680 °C. При большей скорости охлаждения (кривая II) превращение начинается при температуре 500 °C (точка *k*) и заканчивается при температуре 130 °C (точка *m*). В зависимости от температуры превращения образуются различные продукты распада переохлажденного аустенита: феррит, перлит, сорбит, троостит, бейнит или мартенсит. Превращения протекают преимуще-

ственно в верхней части области (смотрите зигзагообразный участок кривой охлаждения).

#### 4.1 Полиморфное превращение

Превращение аустенита в феррит называется полиморфным. При этом сначала на границах зерен аустенита появляются зародыши феррита, а затем железо «атом за атомом» переходит из решетки ГЦК к решетке ОЦК, т. е. происходит рост зерен феррита. Одновременно атом углерода из зоны превращения уходит в аустенит, обогащая его. Например, в стали 40:  $A_{0,4} \rightarrow \Phi_{0,02} + A_{0,8}$ .

#### 4.2 Перлитная область превращения

Перлит, сорбит и троостит являются продуктами распада переохлажденного аустенита при температурах 720–500 °С. При этих температурах скорость диффузии углерода довольно высока, вследствие этого распад переохлажденного аустенита происходит по диффузионному механизму (рисунок 2, кривая  $D_c$ ).

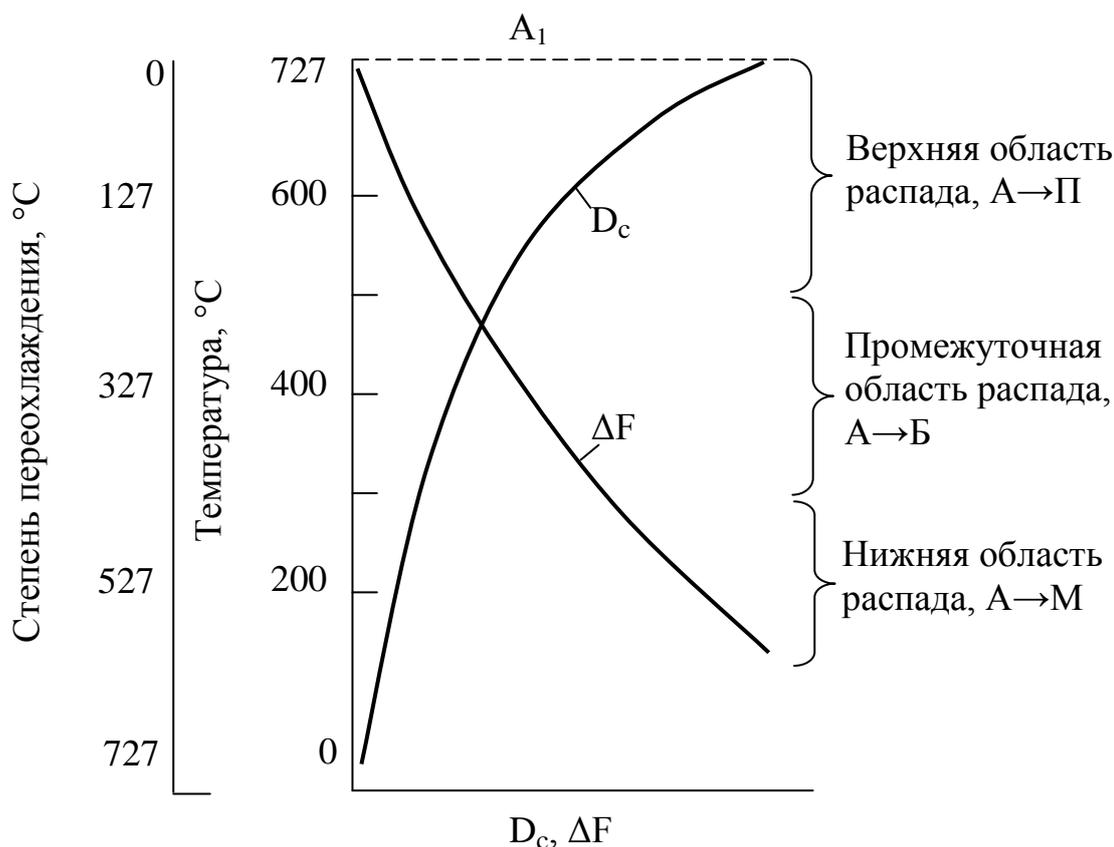


Рисунок 2 – Коэффициент диффузии углерода ( $D_c$ ) и разность свободных энергий переохлажденного аустенита и продуктов его распада ( $\Delta F = F_A - F_{\text{прод.распада}}$ ) в зависимости от степени переохлаждения (температуры превращения)

Рост кристаллов феррита и цементита совершается путем перемещения атомов железа и углерода (рисунок 3) примерно в соответствии с формулой:

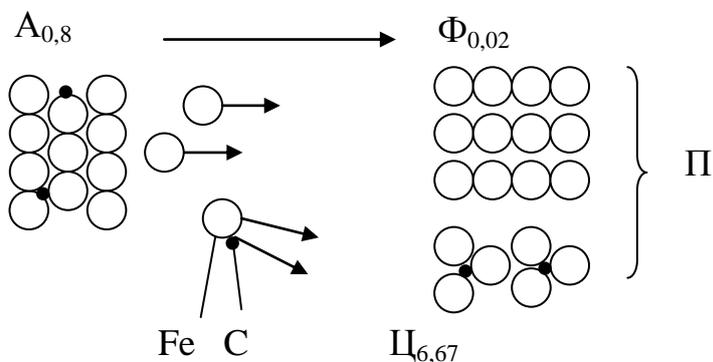
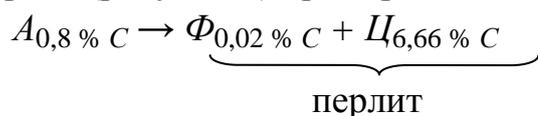
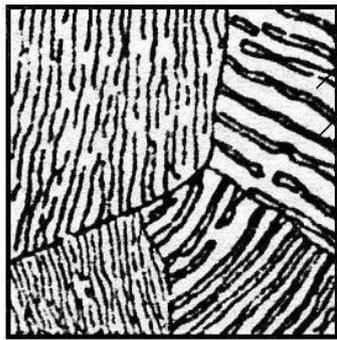


Рисунок 3 – Схема перлитного превращения

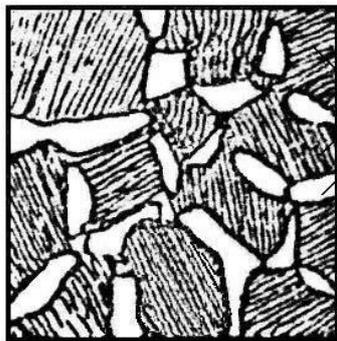
Продукты распада аустенита (перлит, сорбит, троостит) отличаются между собой тем, что по мере снижения температуры превращения толщина пластинок феррита и цементита уменьшается (рисунок 4). Самые тонкие пластинки в троостите.

#### 4.3 Мартенситная область превращения

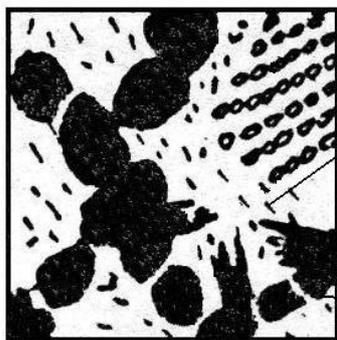
При температуре ниже  $M_H$  – менее  $350\text{ }^\circ\text{C}$  (нижняя область распада) величина  $\Delta F = F_A - F_{\text{прод. превр.}}$  достигает наибольших значений, а диффузионная подвижность углерода близка к нулю (рисунок 2). Вследствие этого распад переохлажденного аустенита происходит по бездиффузионному механизму с образованием сильно пересыщенного твердого раствора углерода в  $Fe_\alpha$ , т.е. мартенсита. Концентрация углерода в мартенсите равна концентрации углерода в аустените, в связи с чем решетка мартенсита тетрагональная, т. е. искаженная. Превращение называется сдвиговым. Под действием внутренних напряжений  $\tau$  в решетке  $\alpha$ -железа совершаются сдвиги, превращающие гранецентрированную решетку в объемноцентрированную (рисунок 5). Микроструктура мартенсита представляет собой иглы, размеры которых пропорциональны размерам зерна исходного аустенита. Мартенсит характеризуется высокой прочностью (твердостью) и большими внутренними напряжениями.



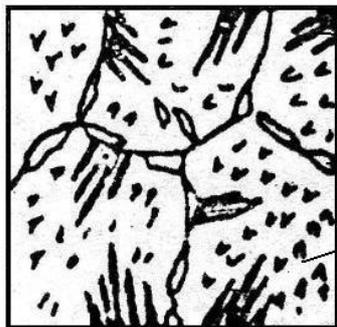
Перлит грубопластинчатый  
(перлит), x2000



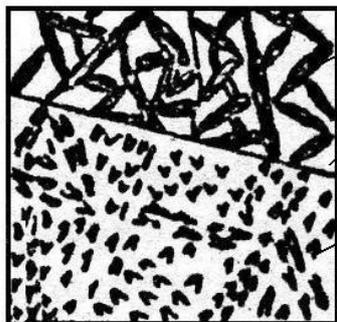
Перлит тонкопластинчатый  
(сорбит) и феррит, x2000



Перлит сверхтонкопластинчатый  
(троостит), мартенсит,  
бейнит верхний (зернистый),  
бейнит нижний (игольчатый), x500



Феррит, бейнит нижний и  
мартенсит, x500



Мартенсит игольчатый  
(высокоуглеродистая сталь)  
Мартенсит пакетный  
(малоуглеродистая сталь), x500

Рисунок 4 – Продукты распада аустенита

С увеличением кристаллов мартенсита вероятность появления закалочных трещин повышается.

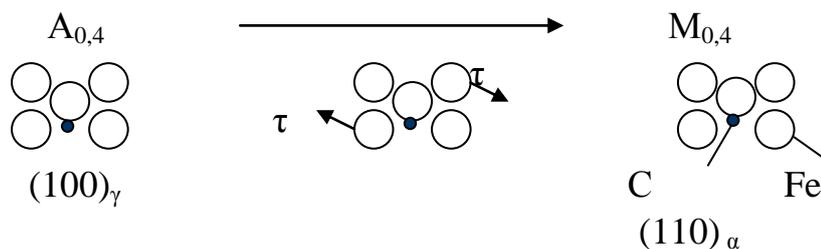


Рисунок 5 – Схема мартенситного (сдвигового) превращения

#### 4.4 Бейнитная область превращения

В интервале 500–300 °С (промежуточная область), когда скорость диффузии углерода невысока, распад переохлажденного аустенита происходит по диффузионному и частично по бездиффузионному механизму. В результате превращения образуется бейнит – смесь цементита и частично пересыщенного углеродом феррита. Различают нижний и верхний бейнит. Под микроскопом пакеты кристаллов нижнего бейнита имеют игольчатый вид с голубоватым оттенком. Верхний бейнит имеет зернистое строение.

Таким образом, конечная структура стали, предварительно нагретой до аустенитного состояния, определяется скоростью охлаждения (рисунок 1, кривые I, II, III, IV, V, VI). Если скорость охлаждения выше критической (рисунок 1, кривая  $V_{кр}$ ), то сталь приобретает мартенситную структуру. Если скорость меньше критической, то получается смешанная структура. Так, при охлаждении по кривой II на участке  $kl$  образуется бейнит, а на участке  $lm$  – мартенсит. Следует отметить, что мартенситное и бейнитное превращения, как правило, полностью не заканчиваются – часть переохлажденного аустенита сохраняется и называется остаточным аустенитом ( $A_{ост.}$ ). Присутствие остаточного аустенита в структуре закаленной стали нежелательно, так как при этом снижается ее твердость.

С увеличением легированности стали повышается устойчивость переохлажденного аустенита (кривые начала и окончания распада смещаются вправо). В результате уменьшается критическая скорость закалки и увеличивается прокаливаемость.

Изменение структурного состояния стали обеспечивает ей различные механические свойства (рисунок 6).

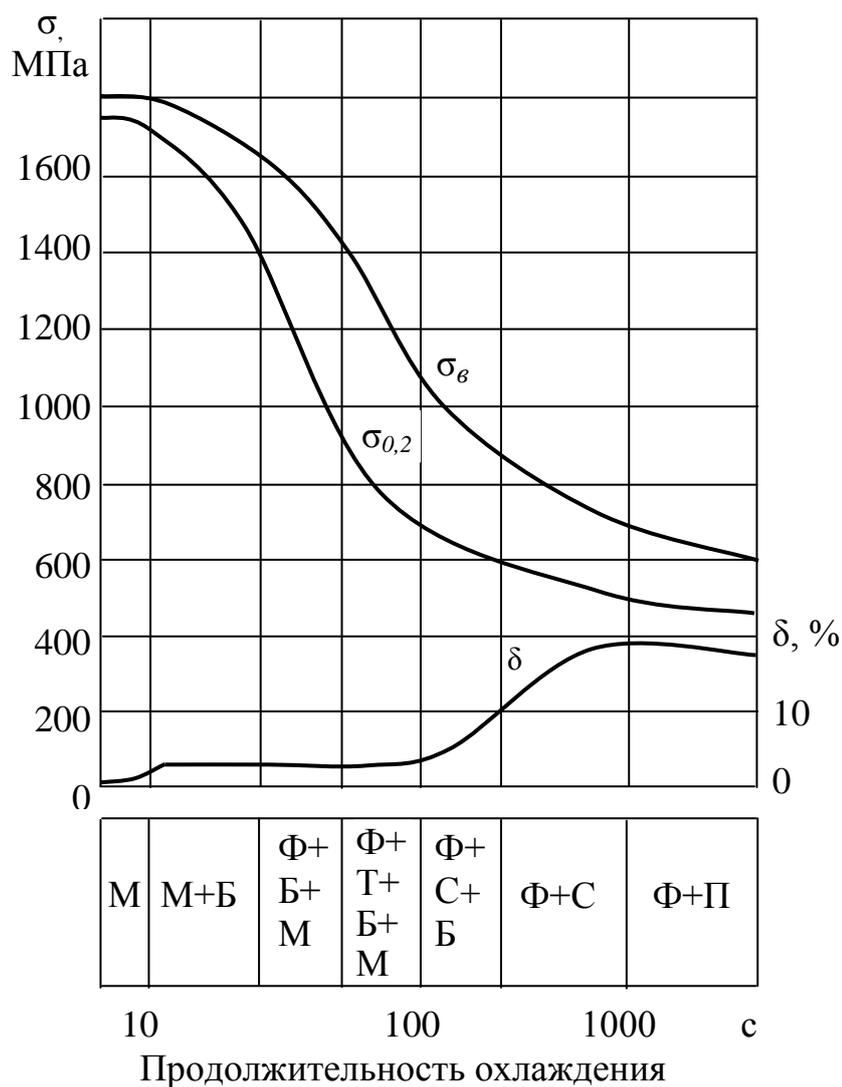


Рисунок 6 – Свойства стали 40 в зависимости от структуры, полученной при распаде аустенита

## 5 ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

### 5.1 Термическая обработка образцов

5.1.1 Ознакомиться с термокинетической диаграммой превращения аустенита для исследуемой марки стали (см. приложение Б).

5.1.2 Загрузить образцы в печь. Все образцы размещать в наиболее нагретой зоне печи.

5.1.3 Нагреть образцы до состояния однородного аустенита (температура 950 °С намного превышает критические точки, вследствие чего происходит рост зерен аустенита и облегчается определение структуры стали после ее охлаждения).

Выдержать образцы в печи из расчета 1-2 минуты на 1 мм диаметра образца.

Режим нагрева записать в протокол.

5.1.4 Вынуть образцы по одному из печи и охладить в различных средах, соблюдая следующую последовательность:

- а) взять корзину с отверстиями;
- б) выдержать корзину над баком для стекания жидкости;
- в) выключить печь и открыть ее;
- г) поднести корзину к разгрузочному окну печи;
- д) выкатить образец из печи в корзину;
- е) быстро перенести корзину с образцом в закалочный бак (охлаждение производить при полном погружении образца в закалочную жидкость);
- ж) извлечь образец из жидкости после полного охлаждения.

Протереть образец бумагой или тряпкой, записать номер образца.

**Первый образец** охлаждается в воде (закалка).

Время пребывания образца на воздухе при перемещении в бак должно быть минимальным. Для ускорения охлаждения производится плавное перемещение вверх и вниз образца в закалочном баке.

**Второй образец** охлаждается в масле (закалка) при соблюдении тех же условий, что и для первого образца.

**Третий образец** охлаждается на воздухе (нормализация).

Образец кладется на лист асбеста.

**Четвертый образец** охлаждается в выключенной печи (полный отжиг) до температуры 500–550 °С, а затем на воздухе.

5.1.5 Проверить номера охлажденных образцов и записать в протокол условия охлаждения каждого образца.

5.1.6 Замерить на приборе Роквелла твердость образцов, охлажденных в воде, в масле и на воздухе алмазным конусом. На образце из углеродистой стали, охлажденном с печью, твердость замеряется при вдавливании шарика. По таблице пересчитать полученные значения твердости на твердость по Бринелю.

Результаты занести в протокол.

5.1.7 На диаграмму нанести кривые охлаждения, обеспечивающие получение микроструктур, наблюдаемых на образцах. Описать условия распада переохлажденного аустенита для каждого образца, используя термокинетическую диаграмму для данной марки стали. Указать, в каком температурном интервале образовалась каждая структурная составляющая (феррит, перлит и т. п.).

5.1.9 По полученным данным твердости и микроструктуры выбрать среду охлаждения при закалке, обеспечивающую получение мартенситной структуры

при возможно меньших внутренних напряжениях. Допускается мартенситно-бейнитная структура с твердостью на 3-5 единиц ниже, чем при мартенситной структуре.

5.1.10 Предложить среду охлаждения, обеспечивающую получение феррито-перлитной структуры с хорошей обрабатываемостью резанием. Вариант должен быть экономичным.

## **6 СОСТАВЛЕНИЕ ОТЧЕТА**

6.1 Отчет должен содержать:

- 1) краткое содержание работы;
- 2) заполненный протокол;
- 3) эскиз термокинетической диаграммы с кривыми охлаждения для каждого образца;
- 4) анализ распада аустенита для каждого образца;
- 5) предложение по выбору среды охлаждения при закалке с обоснованием;
- 6) краткое описание свойств стали после закалки, нормализации и отжига (использовать рисунок б).

## **СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ**

1 Гуляев А. П. *Металловедение* / А. П. Гуляев. – Москва : *Металлургия*, 1986. – 544 с.

2 Лахтин Ю. М. *Материаловедение* / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва : *Машиностроение*, 1990. – 528 с.

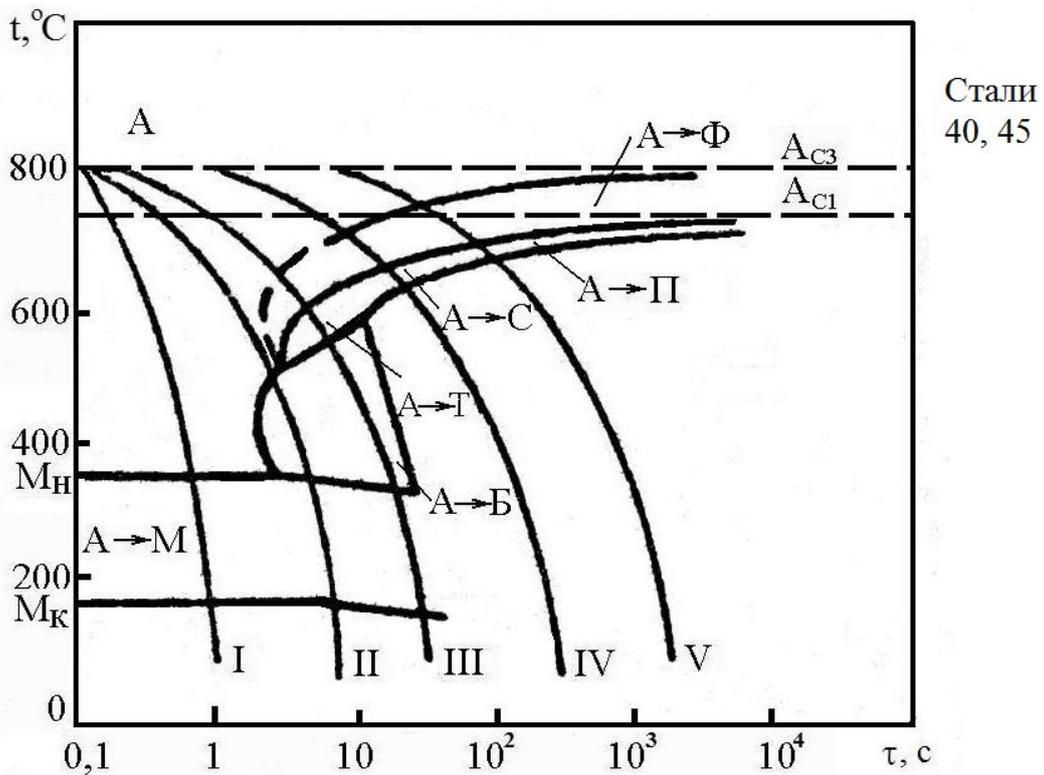
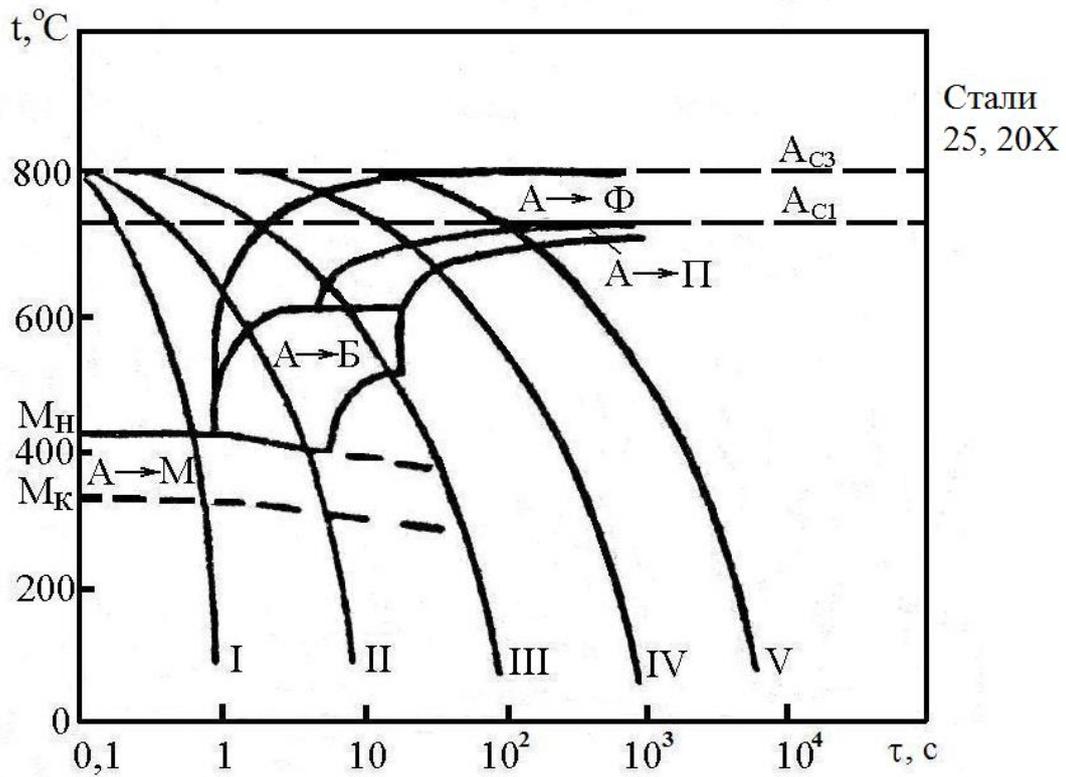
3 Попова Л. Е. *Диаграммы превращения аустенита в сталях и бета-раствора в сплавах титана* / Л. Е. Попова, А. А. Попов. – Москва : *Металлургия*, 1991. – 502 с.

Приложение А

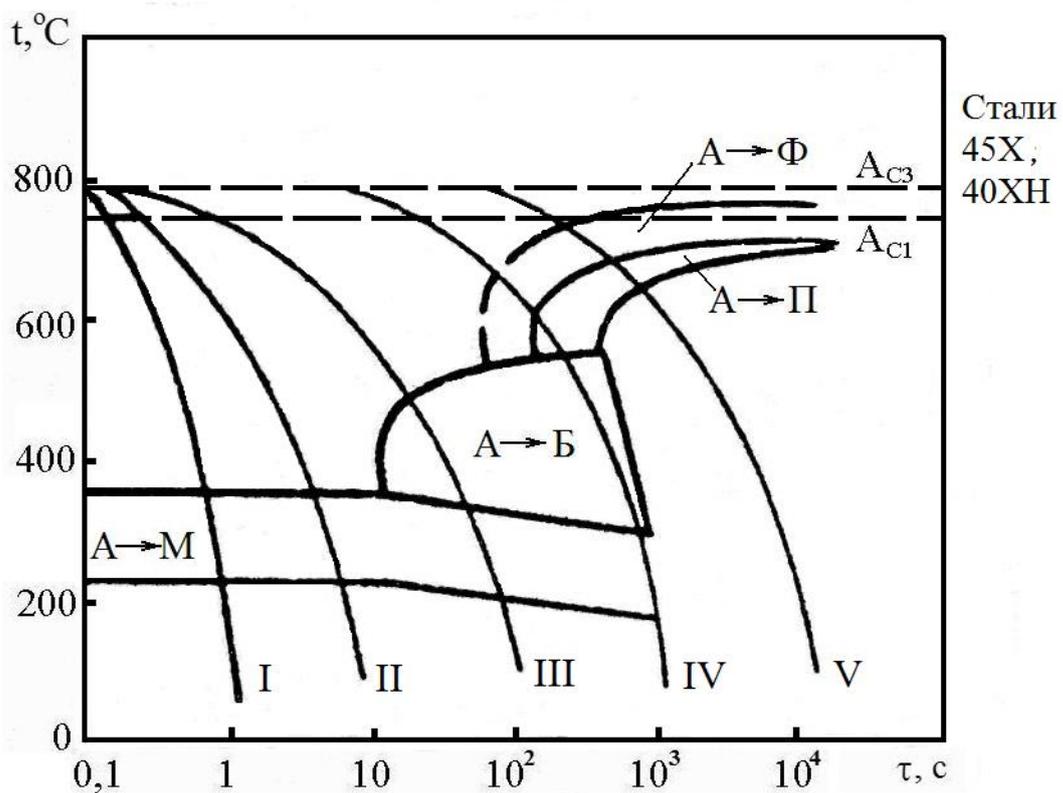
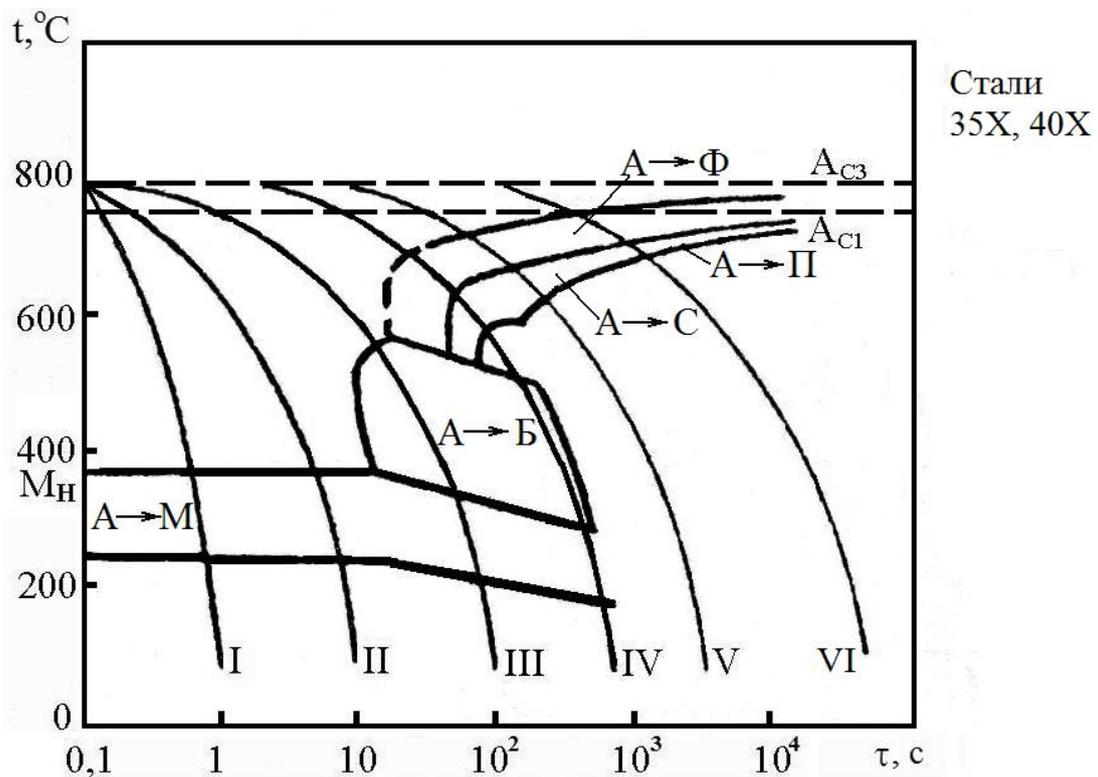
Таблица А1 – Протокол. РЕЖИМЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ, ТВЕРДОСТЬ И МИКРОСТРУКТУРА ОБРАЗЦОВ

№№ образцов	Марка стали	Диаметр образцов, мм	Критические точки стали		Температура нагрева, °С	Продолжительность нагрева, мин.	Среда охлаждения	Наименование операции	Твердость образцов			Предел прочности, σ <sub>B</sub> , МПа	Микроструктура
			А <sub>с1</sub>	А <sub>с3</sub>					НRC <sub>ε</sub>	HRB	HB		
Пример													
1	Ст. 50	15	730	780	830	30	масло	закалка	58	-	578	1920	Троостит + мартенсит
2													
3													
4													

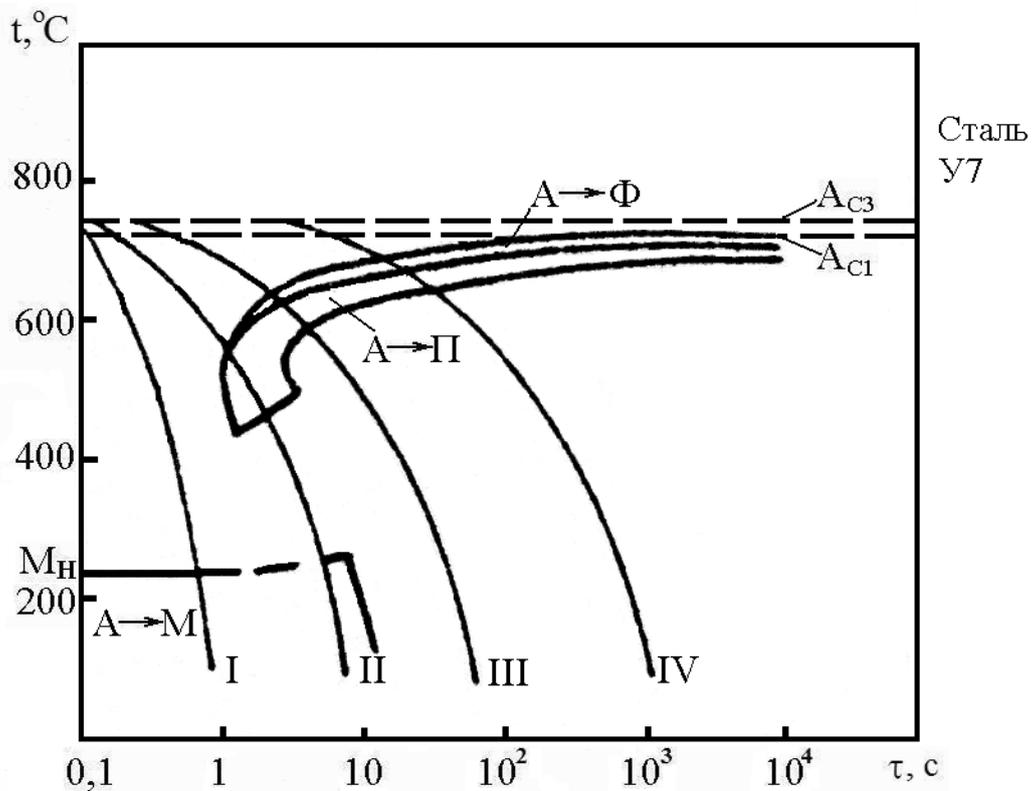
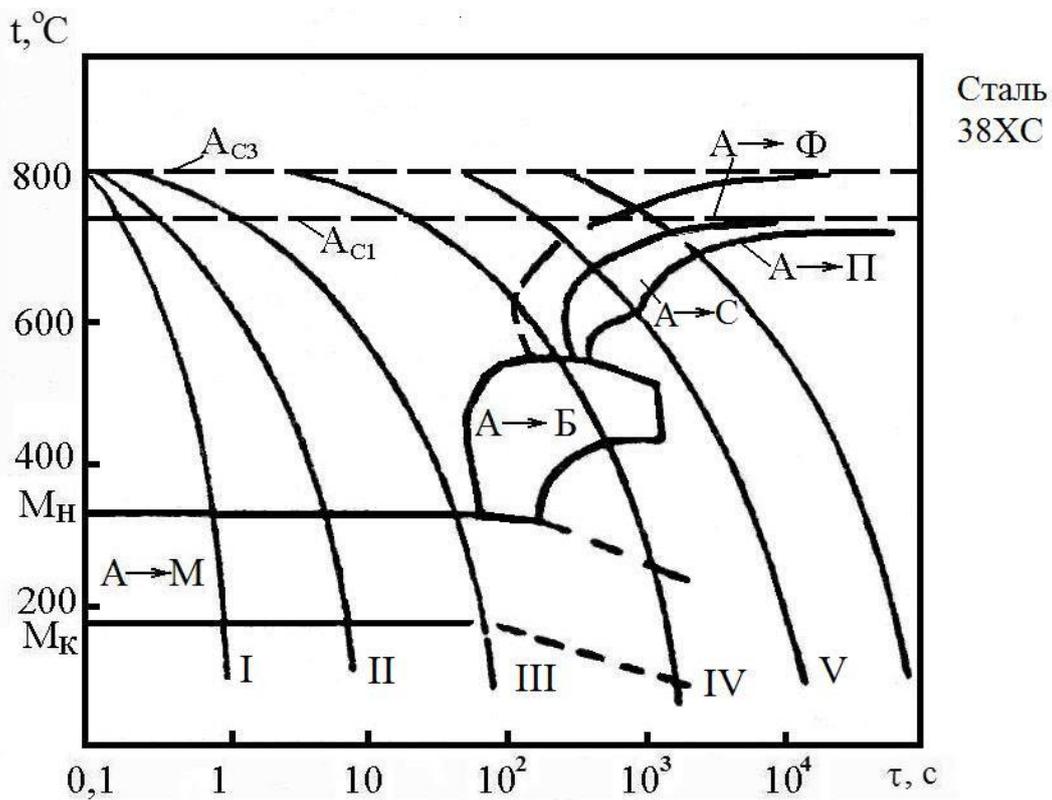
Приложение Б



Кривые охлаждения центра образцов диаметром 12 мм:  
 I – в воде, II – в масле, III – на воздухе, IV – в печи  
 Рисунок Б1 – Термокинетические диаграммы распада  
 переохлажденного аустенита углеродистых сталей



Кривые охлаждения центра образцов диаметром 15 мм:  
 I – в воде, II – в масле, III – на воздухе, IV – в печи  
 Рисунок Б2 – Термокинетические диаграммы распада  
 переохлажденного аустенита хромистых конструкционных сталей



Кривые охлаждения образцов диаметром 10 мм:  
 I – в воде, II – в масле, III – на воздухе, IV – в печи  
 Рисунок Б3 – Термокинетические диаграммы распада  
 переохлажденного аустенита сталей 38ХС и У7

Дудорова Татьяна Александровна  
Савиных Леонид Михайлович

## **ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА СТАЛИ**

Методические указания  
к выполнению лабораторной работы  
по курсу «Материаловедение и ТКМ» для студентов направлений  
15.03.04, 13.03.02, 27.03.01, 27.03.04, 13.03.01,  
23.03.03, 23.03.01, 20.03.01, 23.05.01, 15.03.05, 15.03.01

Редактор В. С. Никифорова

---

Подписано в печать 03.07.2023	Формат 60×84 1/16	Бумага 80 г/м <sup>2</sup>
Печать цифровая	Усл. печ. л. 1,0	Уч.-изд. л. 1,0
Заказ 38	Тираж 25	

---

Библиотечно-издательский центр КГУ.  
640020, г. Курган, ул. Советская, 63/4.  
Курганский государственный университет.