

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РФ
ПЕРМСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов»

**Определение прокаливаемости и закаливаемости
машиностроительных сталей**

Методическое пособие к практическим занятиям
по дисциплине «Материаловедение»

Пермь 2015

Составители: Некрасова Т.В., Каменских А.П.

Рецензент: к.т.н., доцент Силина О.В.

Учебно-методическое пособие предназначено для выполнения практических занятий по дисциплине «Материаловедение».

Методическое пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Металловедение, термическая и лазерная обработка металлов» «22» октября 2014 года протокол № 7.

Методическое пособие согласовано с методической комиссией механико-технологического факультета «27» октября 2014 года протокол № 2.

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, 2015

Цель работы:

- ознакомиться с понятиями закаливаемость и прокаливаемость;
- изучить факторы, влияющие на закаливаемость и прокаливаемость;
- научиться оценивать закаливаемость и прокаливаемость сталей.

Краткие теоретические сведения

Закалка сталей – это термическая обработка, включающая нагрев до температуры выше критических точек (доэвтектоидных – выше A_{C3} , заэвтектоидных – выше A_{C1}), выдержку и охлаждение со скоростью выше критической. В результате закалки в сталях формируется структура "мартенсит" (при этом, в зависимости от содержания углерода, могут присутствовать и другие структурные составляющие – вторичный цементит и остаточный аустенит). Важнейшее явление, сопровождающее закалку на мартенсит – упрочнение, повышение твердости.

Установлено, что упрочнение при закалке сталей на мартенсит является результатом действия нескольких факторов, основными из которых можно назвать высокую плотность дислокаций и присутствие углерода в твердом растворе.

Мартенсит, в отличие от феррито-цементитной смеси, образуется по бездиффузионному сдвиговому механизму в условиях быстрого охлаждения. При этом образуется большое количество дефектов кристаллического строения, главным из которых являются дислокации. Плотность дислокаций в мартенсите достигает $10^{10} - 10^{12} \text{ см}^{-2}$. Большое количество дислокаций затрудняет пластическую деформацию, т.е. упрочняет мартенсит. Например, мартенситное превращение в чистом железе повышает прочность в 3 – 4 раза по сравнению с отожженным состоянием. Так твердость железа с ферритной структурой составляет 60 HV (примерно 30 HRB), а с мартенситной – 200 HV (92 – 94 HRB), при этом предел прочности (σ_B) повышается с 200 до 900 МПа.

Вторая причина упрочнения при закалке – наличие углерода. С увеличением содержания углерода в мартенсите его твердость непрерывно

повышается. Объясняется это прежде всего тем, что атомы углерода, внедренные в решетку α -железа, искажают кристаллическую решетку и затрудняют движение дислокаций в мартенсите.

Следует обратить внимание, что твердость закаленной стали и твердость мартенсита – это не одно и то же, так как в закаленной стали присутствует остаточный аустенит, у которого твердость низкая. Твердость стали после закалки увеличивается с увеличением содержания углерода, проходит через максимум, а затем снижается из-за увеличения объемной доли мягкого остаточного аустенита (рис. 1). Увеличение количества остаточного аустенита связано с понижением температуры мартенситного превращения (интервала $M_H - M_K$).

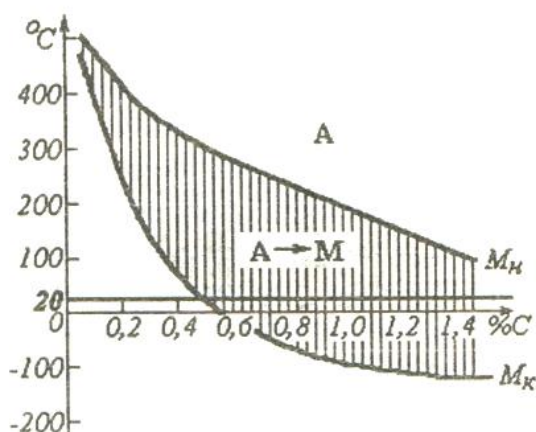


Рис. 1. Влияние содержания углерода на температуру начала и конца мартенситного превращения.

Способность стали к повышению твердости при закалке называется **закаливаемость**. Закаливаемость характеризуется максимальной твердостью, которую можно получить при закалке данной стали на поверхности изделия. Углерод сильно влияет на закаливаемость. Увеличение содержания углерода в стали увеличивает закаливаемость. Легирующие элементы практически не влияют на твердость закаленной стали, но влияют

на устойчивость переохлажденного аустенита и, следовательно, на критическую скорость охлаждения (рис. 2).

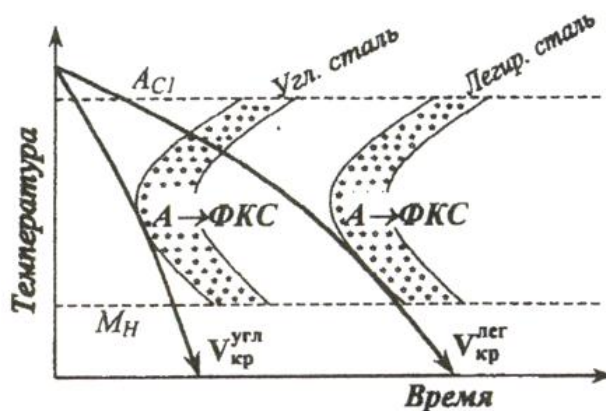


Рис. 2. Влияние легирующих элементов на положение критической скорости.

Критическая скорость охлаждения – это минимальная скорость, при охлаждении с которой образуется структура мартенсит. Большинство легирующих элементов (за исключением кобальта) повышают устойчивость переохлажденного аустенита, увеличивают инкубационный период перлитного превращения, сдвигают С-образную диаграмму вправо и уменьшают критическую скорость охлаждения. Таким образом, при охлаждении сталей разного химического состава в одной охлаждающей среде в них может получаться разная структура и свойства.

Критическая скорость $v_{кр}$ закалки определяет *прокаливаемость* сталей. Прокаливаемость является важной характеристикой физического состояния металла и, соответственно, показателем его качества. **Прокаливаемость** – это глубина закаленной зоны, полученная при данной скорости охлаждения. Глубиной прокаливаемости условно считают расстояние от охлаждаемой поверхности до слоя с полумартенситной структурой (50 % мартенсита и 50% троостита).

Прокаливаемость определяется критической скоростью охлаждения и зависит от химического состава стали. Прокаливаемость тем выше, чем

меньше критическая скорость закалки, т.е. чем выше устойчивость переохлаждённого аустенита (чем правее располагается С-кривая, см. рис. 2).

Легированные стали, вследствие более высокой устойчивости переохлаждённого аустенита и соответственно меньшей критической скорости охлаждения, прокаливаются на значительно большую глубину, чем углеродистые. Сильно повышают прокаливаемость марганец, хром, молибден. Прокаливаемость особенно возрастает при одновременном введении в сталь нескольких легирующих элементов. Кобальт и кремний, повышая критическую скорость закалки, одновременно уменьшают прокаливаемость стали.

Устойчивость переохлаждённого аустенита повышается, а критическая скорость закалки уменьшается только в том случае, если легирующие элементы растворены в аустените. Если легирующие не растворены в аустените и находятся в виде избыточных частиц (карбидов, карбонитридов, нитридов и других подобных фаз), то они не повышают устойчивость аустенита, а могут её уменьшить, так как карбиды служат готовыми зародышами, облегчающими распад аустенита. Карбиды (карбонитриды) титана, ниобия и ванадия при нагреве под закалку обычно не растворяются в аустените и понижают прокаливаемость.

На практике может возникнуть несквозная прокаливаемость, которая объясняется тем, что при закалке деталь охлаждается быстрее с поверхности и медленнее – в сердцевине. При закалке скорость охлаждения распределяется по сечению так, как это показано на рис. 3 а U-образной пунктирной линией; у поверхности скорость охлаждения максимальная, в центре – минимальная. Если критическая скорость закалки равна величине, показанной на этой схеме горизонтальной пунктирной линией, то деталь не прокаливается насквозь, и глубина закалки будет равна заштрихованному слою (рис. 3 а).

С уменьшением критической скорости закалки увеличивается глубина закаленного слоя, и если $v_{кр}$ будет меньше скорости охлаждения в центре, то

это сечение закалится насквозь. Если же сечение велико и скорость охлаждения на поверхности меньше критической, то при данном способе охлаждения сталь не закалится даже на поверхности.

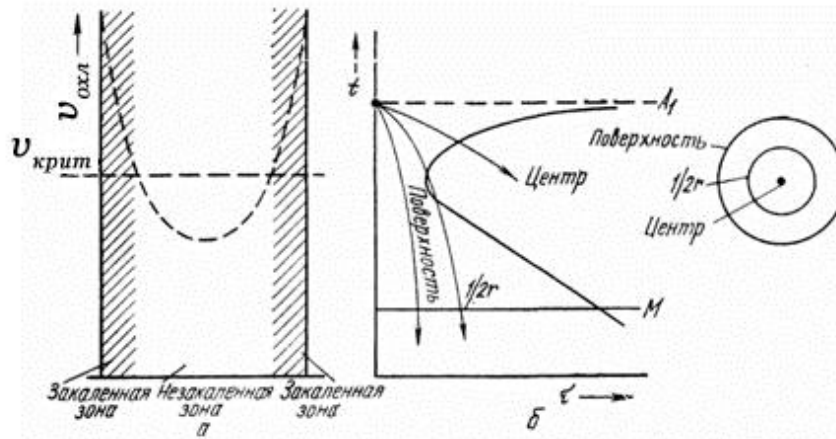


Рис. 3. Влияние скорости охлаждения на прокаливаемость стали.

Скорость охлаждения на поверхности детали всегда будет выше скорости охлаждения в ее центре. Например, кривые охлаждения центра, поверхности и сечения, расположенного на половине радиуса от поверхности, наложенные на С-диаграмму, показаны на рис. 3, б. Для данной стали при данных условиях охлаждения на поверхности получится мартенситная структура, на расстоянии половины радиуса получится мартенсит + троостит, в центре – троостит или сорбит.

Существует несколько способов определения прокаливаемости, один из которых – метод пробных закалок. В основе метода лежит пробная закалка прутков различного диаметра определенной стали в данных условиях, как показано на рис. 4.

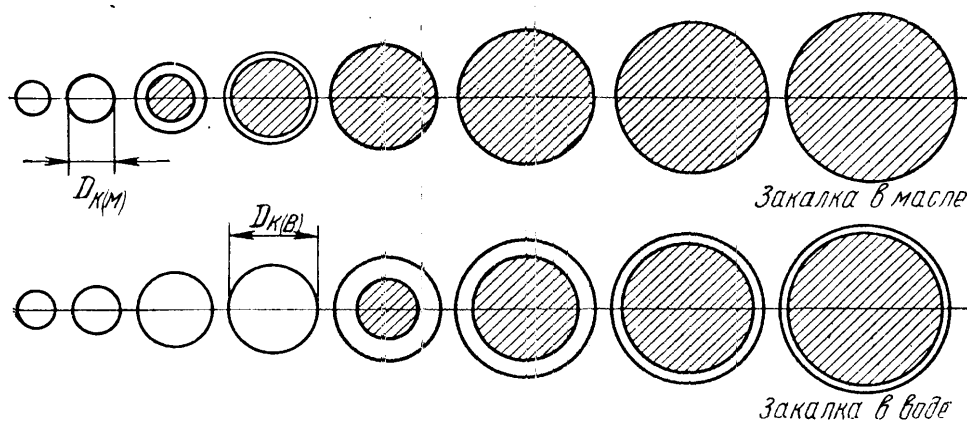


Рис. 4. Прокаливаемость прутков различного диаметра при закалке в воде и масле (заштрихована незакаленная сердцевина), определяемая методом пробных закалок.

Важным технологическим параметром прокаливаемости служит критический диаметр $D_{\text{крит}}$. **Критический диаметр** – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который при данной скорости охлаждения закаливается на мартенсит насквозь.

На практике критический диаметр определяют по полумартенситной зоне (в структуре которой присутствует 50% мартенсита и 50% феррито-карбидной смеси) или зоне, в структуре которой содержится 90% мартенсита.

Другой способ определения критического диаметра предполагает использование номограммы Блантера (см. приложение 1). Предположим, что известно расстояние от поверхности до полумартенситной зоны, тогда реальный критический диаметр можно найти, опустив перпендикуляр с верхней шкалы абсцисс (шкала "Расстояние от закаливаемого торца до полумартенситной зоны") до линии, характеризующей идеальное охлаждение, и на уровне пересечения перпендикуляра с этой линией проведя горизонтальную прямую. Точки пересечения этой горизонтали с наклонными линиями, характеризующими охлаждение в воде, масле и на воздухе, определяют реальные критические диаметры при охлаждении в этих средах (см. приложение 1 и рис. 5).

Задание:

1. Построить график зависимости твердости от содержания углерода $HRC = f(\% C)$.
2. Определить марку стали с минимальным содержанием углерода, обеспечивающую твердость после закалки не менее 60 HRC.
3. Определить температуру закалки для сталей 20, 40, 70, У10 (критические точки см. в приложениях 2 и 3).
4. Определить наличие остаточного аустенита после закалки в данных сталях.
5. Сделать выводы о влиянии содержания углерода и структуры на твердость сталей после закалки. Объяснить полученный характер изменения твердости.

Задача № 2.

Изучить влияние скорости охлаждения на твердость стали и определить значение критической скорости охлаждения для различных сталей. Исходные данные приведены в таблице 2.

При определении типа структуры можно ориентироваться на следующее соотношение:

П – 16 – 24 HRC;

С – 25 – 35 HRC;

Т – 36 – 48 HRC;

М – ≥ 50 HRC.

Задание:

1. Выписать критические точки для исследуемых сталей (приложения 2, 3).

2. Построить зависимость твердости от скорости охлаждения для всех сталей (графики строить в одной системе координат).
3. Определить тип структуры в каждом варианте термообработки.
4. Определить положение критической скорости охлаждения каждой стали.
5. Сделать вывод о влиянии легирующих элементов и содержания углерода на критическую скорость и критические точки изучаемых сталей.

Таблица 2

Твердость (HRC) сталей после различных способов охлаждения

Марка стали	Способ охлаждения и соответствующая скорость охлаждения									
	с печью 0,2 °/с		на воздухе 30 °/с		в масле 150 °/с		в воде 600 °/с		в растворе NaCl 1100 °/с	
40	18		25		46		55		56	
40ХНМА	25		40		56		56		55	
40Х13	38		54		55		55		54	
У10	20		31		43		64		65	

Задача № 3.

Определить прокаливаемость и критический диаметр заданной стали. Исходные данные приведены в таблице 3. Твердость полумартенситной зоны углеродистых и легированных сталей приведена в табл. 4.

Таблица 3

Распределение твердости HRC по глубине заготовки

№ вар.	Марка стали	Среда охл-я	Расстояние от поверхности заготовки вглубь, мм								
			1,5	3	5	10	15	20	25	30	40
1	35ХМ	вода	52	51	49	45	38	33	31	29	29
2	35ХМ	масло	52	50	46	37	30	30	28	28	27

3	20XH	вода	44	42	39	35	29	26	26	24	23
4	20XH	масло	43	41	37	30	25	22	20	20	20
5	40XH	вода	56	54	54	48	38	34	29	28	26
6	40XH	масло	55	53	52	45	34	30	26	25	25
7	45XH	вода	58	58	58	57	56	55	52	51	46
8	45XH	масло	58	56	56	55	53	52	50	48	44
9	30	вода	46	43	37	26	21	21	20	20	20
10	30	масло	42	37	28	24	18	18	15	15	15
11	40	вода	54	52	45	32	25	22	21	20	20
12	40	масло	52	50	40	27	23	20	18	18	18
13	45	вода	56	54	36	26	25	25	24	23	23
14	45	масло	52	48	37	28	23	21	18	18	18
15	50	вода	56	54	49	37	30	28	27	27	27
16	50	масло	54	50	40	32	25	23	20	20	20
17	55	вода	59	55	52	35	30	29	27	27	27
18	55	масло	57	52	48	30	28	27	25	25	25
19	60	вода	60	59	56	50	42	38	34	32	30
20	60	масло	58	57	50	48	40	35	30	30	30
21	60Г	вода	63	63	62	57	47	36	36	35	35
22	60Г	масло	63	62	58	50	45	34	33	33	33
23	65Г	вода	63	62	59	56	48	42	41	38	37
24	65Г	масло	63	62	59	52	45	34	34	33	33
25	60С2А	вода	64	63	61	57	48	42	38	34	33
26	60С2А	масло	63	63	58	54	46	35	33	33	33
27	55ХГР	вода	60	60	60	60	60	60	60	60	59
28	55ХГР	масло	60	60	60	58	58	57	57	55	54
29	50ХФА	вода	59	58	58	57	52	45	41	38	38
30	50ХФА	масло	59	58	57	54	50	43	40	37	37
31	40ХФА	вода	56	56	55	55	52	43	40	38	36
32	40ХФА	масло	55	54	49	48	42	38	35	34	33
33	33ХС	вода	54	54	53	49	47	36	29	26	23
34	33ХС	масло	54	53	52	47	37	35	26	22	20

Таблица 4

Твердость стали со структурой после закалки

50 % мартенсита и 50 % троостита

Содержание углерода, %	Твердость полумартенситной зоны HRC	
	углеродистой стали	легированной стали
0,08 – 0,17	–	25
0,18 – 0,22	25	30
0,23 – 0,27	30	35
0,28 – 0,32	35	40

0,33 – 0,42	40	45
0,43 – 0,52	45	50
0,53 – 0,62	50	55

Задание 1:

1. Выписать из таблицы 3 значение твердости HRC по глубине для заданной марки стали и условий охлаждения (согласно своему варианту).
2. Построить распределение твердости по сечению заготовки диаметром 80 мм.
3. Нанести на сечение твердость полумартенситной зоны (табл. 4).
4. Определить глубину прокаливаемости и критический диаметр для заданной стали (приложение 1).

Задание 2:

1. Выписать из таблицы 3 значение твердости HRC по глубине для заданной марки стали для двух охлаждающих сред – воды и масла (марка стали задается преподавателем).
2. Построить распределение твердости по сечению заготовки диаметром 80 мм для воды и масла (оба распределения строить на одном сечении заготовки).
3. Нанести на сечение твердость полумартенситной зоны для заданной марки стали (табл. 4).
4. Определить глубину прокаливаемости в воде и в масле.
5. Определить критический диаметр для воды и масла, пользуясь номограммой Блантера (приложение 1).
6. Сделать вывод о влиянии охлаждающей среды на прокаливаемость сталей.

Задание 3:

1. Выписать из таблицы 5 значение твердости HRC по глубине для двух марок стали с одинаковым содержанием углерода: углеродистой и легированной, охлажденных в одной закалочной среде (вариант задается преподавателем).

2. Построить распределение твердости по сечению заготовки диаметром 80 мм для обеих марок (для каждой марки – на своем сечении заготовки).

3. Нанести на сечения твердость полумартенситной зоны соответствующих сталей (табл. 4).

4. Определить глубину прокаливаемости сталей.

5. Определить критический диаметр для сталей заданных марок, пользуясь номограммой Блантера (приложение 1).

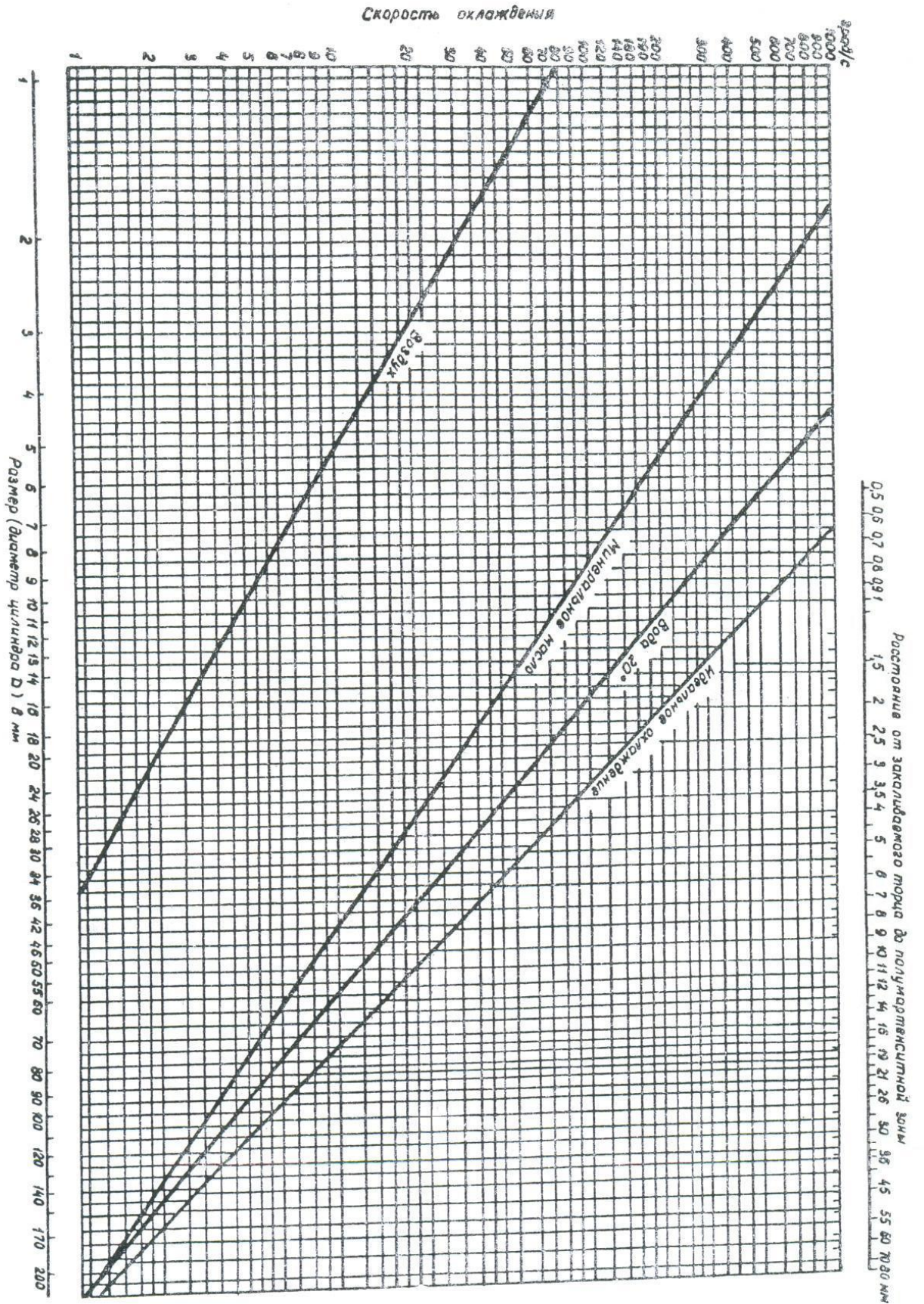
6. Сделать вывод о влиянии химического состава и критической скорости на прокаливаемость сталей.

Таблица 5

Распределение твердости HRC по глубине заготовки

№ вар.	Марка стали	Среда охл-я	Расстояние от поверхности заготовки вглубь, мм								
			1,5	3	5	10	15	20	25	30	40
1	30	вода	46	43	37	26	21	21	20	20	20
	33XC		54	54	53	49	47	36	29	26	23
2	30	масло	42	37	28	24	18	18	15	15	15
	33XC		54	53	52	47	37	35	26	22	20
3	40	вода	54	52	45	32	25	22	21	20	20
	40XH		56	54	54	48	38	34	29	28	26
4	40	масло	52	50	40	27	23	20	18	18	18
	40XH		55	53	52	45	34	30	26	25	25
5	40	вода	54	52	45	32	25	22	21	20	20
	40XФА		56	56	55	55	52	43	40	38	36
6	40	масло	52	50	40	27	23	20	18	18	18
	40XФА		55	54	49	48	42	38	35	34	33
7	45	вода	56	54	36	26	25	25	24	23	23
	45XH		58	58	58	57	56	55	52	51	46
8	45	масло	52	48	37	28	23	21	18	18	18
	45XH		58	56	56	55	53	52	50	48	44
9	50	вода	56	54	49	37	30	28	27	27	27

	50ХФА		59	58	58	57	52	45	41	38	38
10	50	масло	54	50	40	32	25	23	20	20	20
	50ХФА		59	58	57	54	50	43	40	37	37
11	55	вода	59	55	52	35	30	29	27	27	27
	55ХГР		60	60	60	60	60	60	60	60	59
12	55	масло	57	52	48	30	28	27	25	25	25
	55ХГР		60	60	60	58	58	57	57	55	54
13	60	вода	60	59	56	50	42	38	34	32	30
	60С2А		64	63	61	57	48	42	38	34	33
14	60	масло	58	57	50	48	40	35	30	30	30
	60С2А		63	63	58	54	46	35	33	33	33
15	60	вода	60	59	56	50	42	38	34	32	30
	60Г		63	63	62	57	47	36	36	35	35
16	60	масло	58	57	50	48	40	35	30	30	30
	60Г		63	62	58	50	45	34	33	33	33



Критические точки сталей

Марка стали	A_{c1}	A_{c3} (A_{cm})	A_{r3} (A_{rcm})	A_{r1}
20	735	850	835	680
40	730	790	780	690
70	730	743	727	693
У10	730	800	–	700
40ХНМА	730	820	550	380
40Х13	820	870	–	780

Контрольные вопросы

1. Что такое закаливаемость?
2. В каких единицах измеряется закаливаемость? Сравните закаливаемость доэвтектоидных, эвтектоидных и заэвтектоидных сталей.
3. Как влияет на закаливаемость химический состав стали (содержание углерода и легирующих элементов)?
4. Какие факторы влияют на твердость мартенсита?
5. Что такое остаточный аустенит? От чего зависит количество остаточного аустенита в закаленной стали? Как остаточный аустенит влияет на свойства закаленной стали?
6. Что такое критическая скорость? Как влияет химический состав стали на критическую скорость?
7. Что такое прокаливаемость?
8. Что такое критический диаметр? Как определяют критический диаметр?
9. Как влияет критическая скорость охлаждения на прокаливаемость стали?
10. Как влияет закалочная среда (вода, масло) на прокаливаемость стали?

Список используемой литературы

1. Материаловедение: учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. - 5-е изд., стер. - Москва: Альянс, 2009, 2011
2. Материаловедение: учебник / В.Б. Арзамасов, А.А. Черепяхин. - Москва: Экзамен, 2004, 2005, 2008, 2009, 2013.