**Энгельсский технологический институт (филиал)
федерального государственного бюджетного образовательного
учреждения высшего образования
«Саратовский государственный технический университет
имени Гагарина Ю. А.»**

ВЫБОР СТАЛЕЙ И РЕЖИМОВ ИХ ТЕРМООБРАБОТКИ

методические указания
к выполнению лабораторной работы
по курсу "Материаловедение"
для студентов всех направлений и форм обучения

Саратов 2026

Цель работы: освоить методику научно – обоснованного выбора стали и режима ее термической обработки для получения требуемых механических свойств детали.

1. Основные положения

От правильного выбора марок сталей и режимов их термической обработки зависит работоспособность деталей машин и приборов.

Рациональный выбор конструкционной стали, представляет собой сложную задачу, требующую глубоких знаний материаловедения, технологии металлов, сопротивления материалов, деталей машин, основ экономики и ряда других предметов.

Инженер – конструктор, проанализировав условия работы детали и выполнив расчет на прочность, предъявляет определенные требования к механическим свойствам стали при установленных размерах детали . Такие механические свойства обычно могут быть получены в нескольких марках сталей различной термической обработкой. Возникает инженерная задача выбора оптимального технико-экономического варианта.

Для изготовления малонагруженных деталей машин и приборов (валов, осей, зубчатых колес) можно использовать наиболее дешевые углеродистые стали обыкновенного качества (ГОСТ 380-88) в состоянии поставки. Однако эти стали имеют сравнительно низкую прочность. Так, сталь $Ст5_{сп}$ имеет $\sigma_в$ = 500 – 640 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 240 – 280 МПа. Значительно большую конструкционную прочность можно получить в качественных углеродистых сталях (ГОСТ 1050-74) после упрочняющей термической обработки - объемной закалки с отпуском. После улучшения стали 40, 45, 50 имеют $\sigma_в$ = 600 – 800 МПа, $\sigma_{0,2}$ = 400 – 600 МПа при высокой ударной вязкости.

Но углеродистые стали имеют низкую прокаливаемость. Детали из таких сталей при закалке в воде дают сквозную полумартенситную прокаливаемость в диаметрах (или толщинах) не более 20 мм.

Легированные стали обладают лучшей прокаливаемостью даже при закалке в масле. Поэтому для более крупных деталей, которые требуется прокалить насквозь, нужно выбирать легированную конструкционную сталь (ГОСТ 4543-71).

Для правильного, научно обоснованного выбора стали конструктор и технолог должны знать и учитывать распределение по сечению детали механических свойств и структуры, образующейся в результате термической обработки. О структуре в любой точке поперечного сечения детали после объемной закалки с достаточной для практики точностью

можно судить по значениям твердости. Следовательно, задача сводится к установлению распределения твердости по сечению детали, что можно осуществить по данным торцовой закалки, т.е с помощью полос прокаливаемости.

Имеются два метода выбора стали с учетом прокаливаемости: по критическому диаметру и по ее способности получать заданную твердость на определенной глубине. В основе первого метода, в отличие от второго, лежит универсальный структурный критерий - получение полумартенситной или мартенситной структуры в сердцевине изделия. Этот метод используется в данной работе. Полумартенситная структура при различном содержании углерода имеет различную твердость (табл.1), т.е. различные прочностные характеристики. То же относится и к мартенситной структуре (табл. 2).

Таблица 1

Твердость стали, имеющей в структуре после закалки 50% мартенсита и 50% троостита (ГОСТ 5667-69)

Содержание углерода, %	Твердость HRC полумартенситной зоны	
	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

Таблица 2

Твердость стали с мартенситной структурой

Содержание углерода, %	0,2	0,3	0,4	0,5
HRC	40-45	45-50	50-55	60

Оптимальное сочетание прочности и вязкости стали после отпуска обеспечивается при условии, когда в структуре после закалки не менее 90% мартенсита, а твердость не ниже минимально допустимых значений (рис. 1). Например, для изделий с твердостью после закалки и отпуска HRC 30 – 35 необходимо, чтобы твердость после закалки была не ниже HRC 45. При наличии в структуре 50% мартенсита и 50% троостита закалки предел

выносливости снижается примерно на 20% и значительно снижается ударная вязкость, особенно при пониженных температурах. Но с увеличением содержания мартенсита в структуре сердцевины уменьшается критический диаметр прокаливаемости сталей. Приблизительно можно принять, что критический диаметр прокаливаемости на 95% мартенсита составляет 3/4 от полумартенситной [1,3], т.е. $D_{95}=3/4D_{50}$.

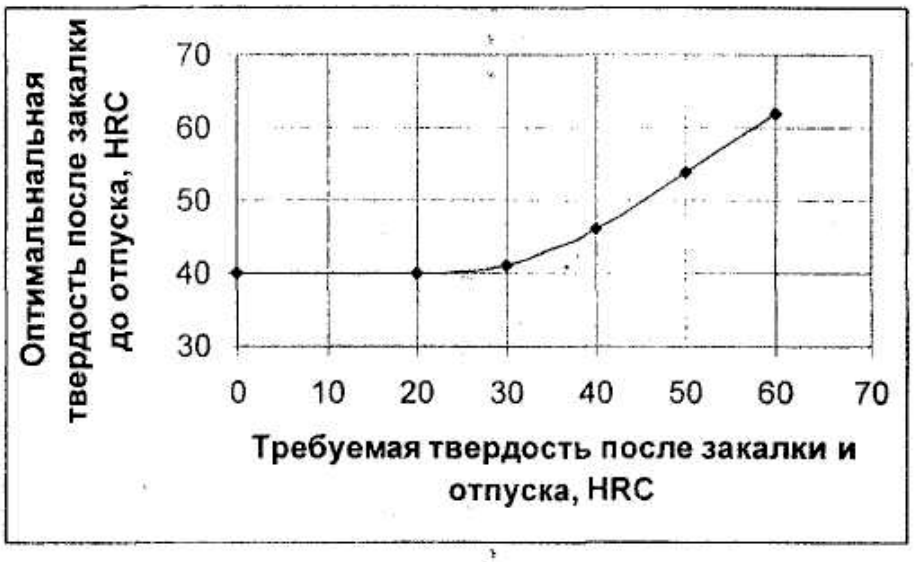


Рис. 1. Зависимость между оптимальной твёрдостью после закалки и твёрдостью после окончательной термообработки [3].

2. Порядок выполнения работы

Последовательность выполнения работы представлена в виде алгоритма (рис. 2). Диаметр детали принимаем за критический диаметр закалки D_{50}. По номограмме М.Е. Блантера (рис.3) для этого критического диаметра, выставленного на шкале с приближенным отношением размеров детали L/D находим расстояние от торца до полумартенситной зоны стандартного образца. Охлаждающей средой при объемной закалке легированных сталей служит минеральное масло. По графику (рис.1) находим оптимальную твердость в сердцевине детали после закалки HRC $\geq$ 40 в зависимости от твердости после отпуска и определяем наименьшее содержание углерода в стали по таблице 1. Далее по кривым прокаливаемости сталей с найденным или большим содержанием углерода делаем поиск подходящей марки стали по координатам: твердость полумартенситной зоны - расстояние от торца до полумартенситной зоны. Найденная точка должна находиться в поле полосы прокаливаемости, желательно ближе к нижней ее границе. Из выбранных марок стали по экономическим соображениям отдаем предпочтение наименее

легированной стали, с меньшим содержанием углерода. Ниже приведены пояснения к пользованию полосами прокаливаемости. Кривая прокаливаемости строится для одного образца стали. Нужная точка может не попасть на кривую прокаливаемости. Если она окажется правее, твердость на таком расстоянии будет ниже требуемой и сталь не годна для нашей детали. Если же эта точка окажется левее кривой прокаливаемости , твердость будет вьше полумартенситной, значит и мартенсита в центре сечения детали будет больше 50%. Такая сталь подходит для изготовления детали. Полоса прокаливаемости образуется из многих кривых прокаливаемости для серии плавок одной марки стали (например, для 100 плавок). Расстояние до полумартенситной зоны находится в пределах от нижней кривой (lmin) до верхней кривой (lmax) полосы прокаливаемости (по горизонтали) на уровне полумартенситной твердости. Если интересующая нас точка находится правее lmax, то сталь любой плавки будет иметь твердость меньше полумартенситной и не годится для детали. Если эта точка находится левее Wi, то любая плавка этой стали имеет твердость выше полумартенситной.

Такая сталь подходит для изготовления детали. Если же точка находится в поле прокаливаемости между lmax и lmin, то часть полосы от этой точки до lmin имеет твердость меньше полумартенситной. В таком случае не все плавки данной марки стали годятся для изготовления детали. На практике нужно проверять фактическую прокаливаемость имеющихся сталей.

Если при закалке в масле в сердцевине детали не достигается полумартенситная структура ни в одной из имеющихся сталей, нужно проверить такую возможность при закалке в воде, которая обеспечивает большую прокаливаемость, так как быстрее охлаждает деталь, чем масло. Детали простой формы из легированных сталей можно закаливать в воде, не опасаясь образования закалочных трещин.

В легированных сталях с содержанием углерода менее 0,3% полумартенситная структура имеет твердость HRC < 40. Для таких сталей определяется $Д_{кр}$ с мартенситной структурой ($D_м$).

Критический диаметр закалки Dм определяется по номограмме Блан-тора, имеющей вверху соответствующую шкалу (мартенсит). Например, при L/D = 4 и диаметре детали D = 15 мм находим для объемной закалки в воде на шкале "мартенсит" деление 10 мм. Это означает, что для детали подходит сталь (с выбранным содержанием углерода), у которой на кривой прокаливаемости расстояние до полумартенситной структуры составляет 10 мм. Тогда после закалки в воде деталь в сердцевине будет иметь мартенситную структуру.

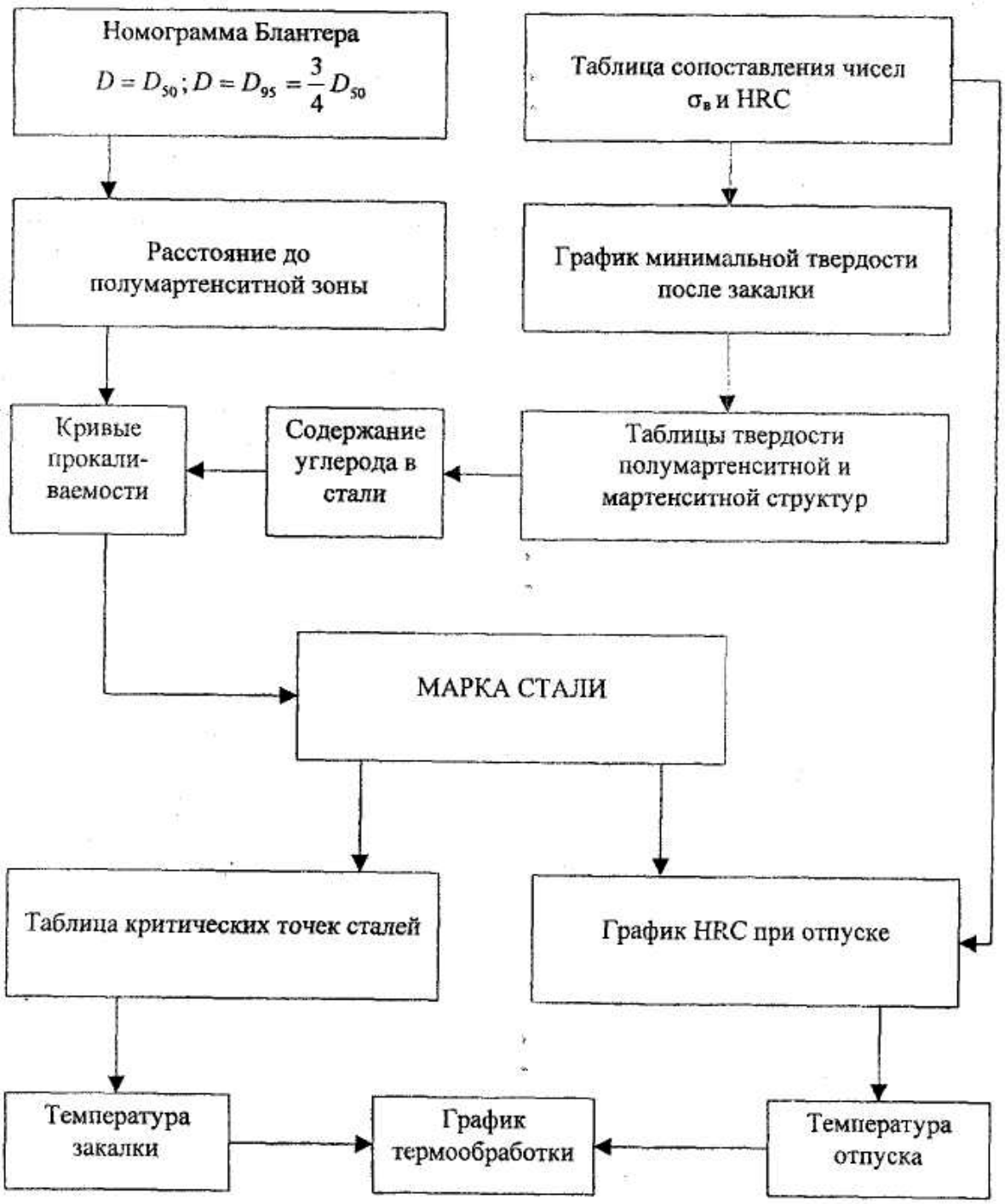
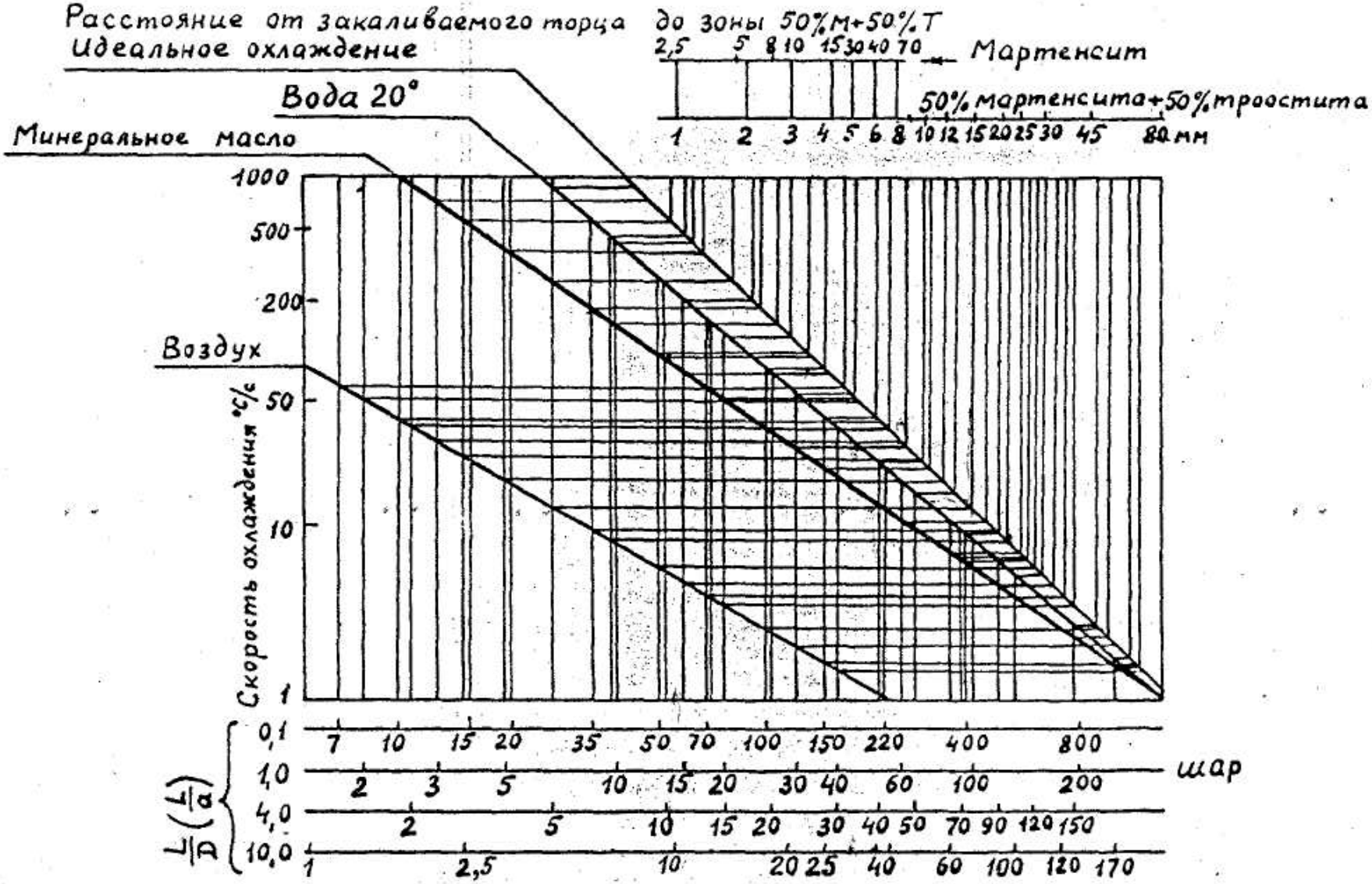


Рис. 2. Схема выбора стали и режима термообработки



Размер (L – длина, D – диаметр, a – сторона квадрата) в мм.

Рис. 3. Номограмма М.Е. Блантера .

Если для заданного диаметра детали нет подходящей стали для получения в сердцевине мартенситной структуры, можно проверить возможность получения структуры с 95% мартенсита, пользуясь соотношениями: $D = D_{95} = 3/4D_{50}$; $D_{50} = 1{,}3D$.

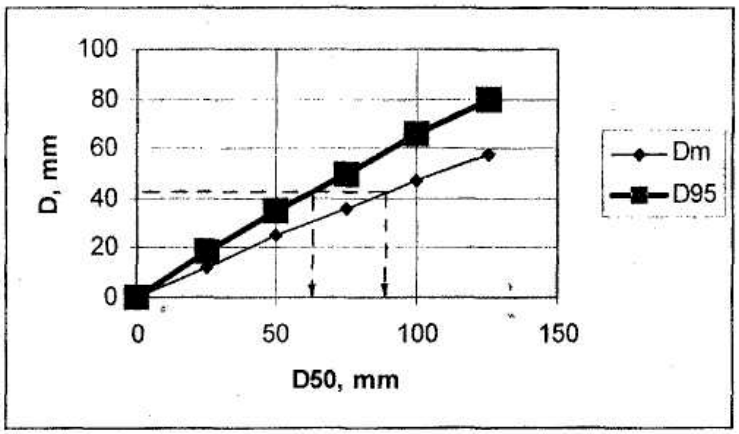


Рис. 4. График для определения прокаливаемости D_{95} и D_m по данным для полумартенситной прокаливаемости [1].

D - диаметр детали, в которой нужно получить 95% мартенсита всердцевине, а D_{50} – соответствующий размер, отмеряемый на шкале номограммы для нахождения расстояния до полумартенситной зоны. Более точные результаты можно получить, пользуясь графиком для определения D_{95} и $D_м$ (рис. 4).

По вертикальной оси откладываем значение диаметра детали, в сердцевине которой после закалки в масле или в воде хотим получить мартенсит ($D_м$) или 95% мартенсита (D_{95}). Тогда на горизонтальной оси находим соответствующие значения Dso, для которых по номограмме Блантера находим расстояние до полумартенситной зоны по шкале 50% мартенсита + 50% троостита. Выбранная по полосам прокаливаемости сталь для D_{50} даст мартенсит или 95% мартенсита в сердцевине детали, но уже для меньших диаметров $D_м$ или D_{95}.

Для получения заданной прочности стали назначаем режим термической обработки детали: температуру закалки, продолжительность нагрева детали, закалочную среду, температуру отпуска, продолжительность нагрева при отпуске, охлаждающую, среду. Низкоуглеродистые (цементуемые) стали после закалки подвергают низкому отпуску, т.к. ударная вязкость и пластичность у них достаточно высокие. Продолжительность выдержки детали в печи зависит от диаметра (толщины) детали и условий нагрева.

Общее время нагрева детали: $\tau_{общ} = \tau_н + \tau_в$,

где $\tau_н$ - продолжительность нагрева до заданной температуры;

$\tau_в$- выдержка при этой температуре.

Практически $\tau_в$ = 1 мин для углеродистых и 2 мин для легированных сталей. Поэтому при нагреве крупных деталей этой величиной можно пренебречь (когда $\tau_н$ » $\tau_в$).

При нагреве до 800 – 900 °С время нагрева можно приближенно подсчитать по формуле [1]:

$\tau_н$=0,1 $DK_1K_2K_3$,

где D - минимальный размер максимального сечения детали;

K_1 – коэффициент среды (для газа 2, расплавленных солей 1, для расплавленного металла 0,5); ,

K_2 – коэффициент формы (для шара 1, цилиндра 2, параллелепипеда 2,5, пластины 4);

K_3 – коэффициент равномерности нагрева (всесторонний нагрев 1, односторонний нагрев 4).

Расчет времени по приведенному способу действителен, если нагревающий агрегат (печь, ванна) достаточно мощный и внесенные в него холодные детали заметным образом не снижают температуры рабочего пространства. Иначе время нагрева может увеличиться в 2 – 3 раза.

Нагрев под отпуск протекает значительно медленнее, так как при низких температурах нагрев осуществляется главным образом конвекцией, а не лучеиспусканием. Можно принять продолжительность нагрева и выдержки при отпуске на 30 минут больше, чем при закалке.

После отпуска охлаждение производят на воздухе, в масле или в воде. Это зависит от размеров сечения деталей и химического состава стали. Некоторые стали склонны к обратимой отпускной хрупкости при медленном охлаждении в районе 500 – 600°С. Детали из таких сталей нужно охлаждать ускоренно, часто в воде, что предотвращает охрупчивание. Склонность к обратимой хрупкости возникает у хромистых, хромоникелевых, марганцовистых сталей. Крупные детали невозможно быстро охладить даже в воде. Поэтому для таких деталей следует использовать стали с добавками молибдена (менее 0,4%) или вольфрама (менее 0,8%), которые устраняют отпускную хрупкость. Если сталь не склонна к отпускной хрупкости, деталь после отпуска можно охладить на воздухе.

3. Индивидуальные занятия

Для ответственной детали диаметром D и определенным отношением длины к диаметру L/D (задаются преподавателем) выбрать марку стали и назначить режим термообработки, обеспечивающий наилучшее сочетание прочности и вязкости. Сделать вывод по работе и оформить ее в виде отчета.

№ вари-анта	D мм	L/D	$\sigma_в$МПа не менее	№ вари-анта	D мм	L/D	$\sigma_в$МПа не менее
1	20	4	900	14	45	10	1000
2	20	10	1000	15	45	4	1100
3	20	4	1250	16	50	10	900
4	20	4	1350	17	50	4	1000
5	30	10	800	18	50	0,1	1100
6	30	10	900	19	50	4	1300
7	30	4	1000	20	70	10	900
8	30	1	1100	21	70	4	1000
9	40	10	900	22	70	1	1100
10	40	0,1	1000	23	70	0,1	900
11	40	4	1100	24	90	10	900
12	40	4	1300	25	90	0,1	1100
13	45	1	900				

ЛИТЕРАТУРА

1. Гуляев А.П. Металловедение.-М: Металлургия, 1986.-544 с.
2. Лахтин Ю.М., Леонтьева В.П.,Материаловедение.-М.: Машино строение, 1990-528 с
3. Журавлев В.Н., Николаева О.И. Машиностроительные стали: Справочник -4-е изд., перераб. и доп. -М: Машиностроение. 1992. -480 с.
4. Материалы в машиностроении. Справочник: в 5-ти т.,под ред. И.В. Кудрявцева. М-Машиностроение, т.2. 1967. -496с.
5. Металловедение и термическая обработка. Справочник под ред. Н.Т. Гудцова, М.Л. Бернштейна, А.Г. Рахштадта. -М.: Металлургия. -1956. -1204 с.

Приложение

КРИТИЧЕСКИЕ ТОЧКИ ЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ

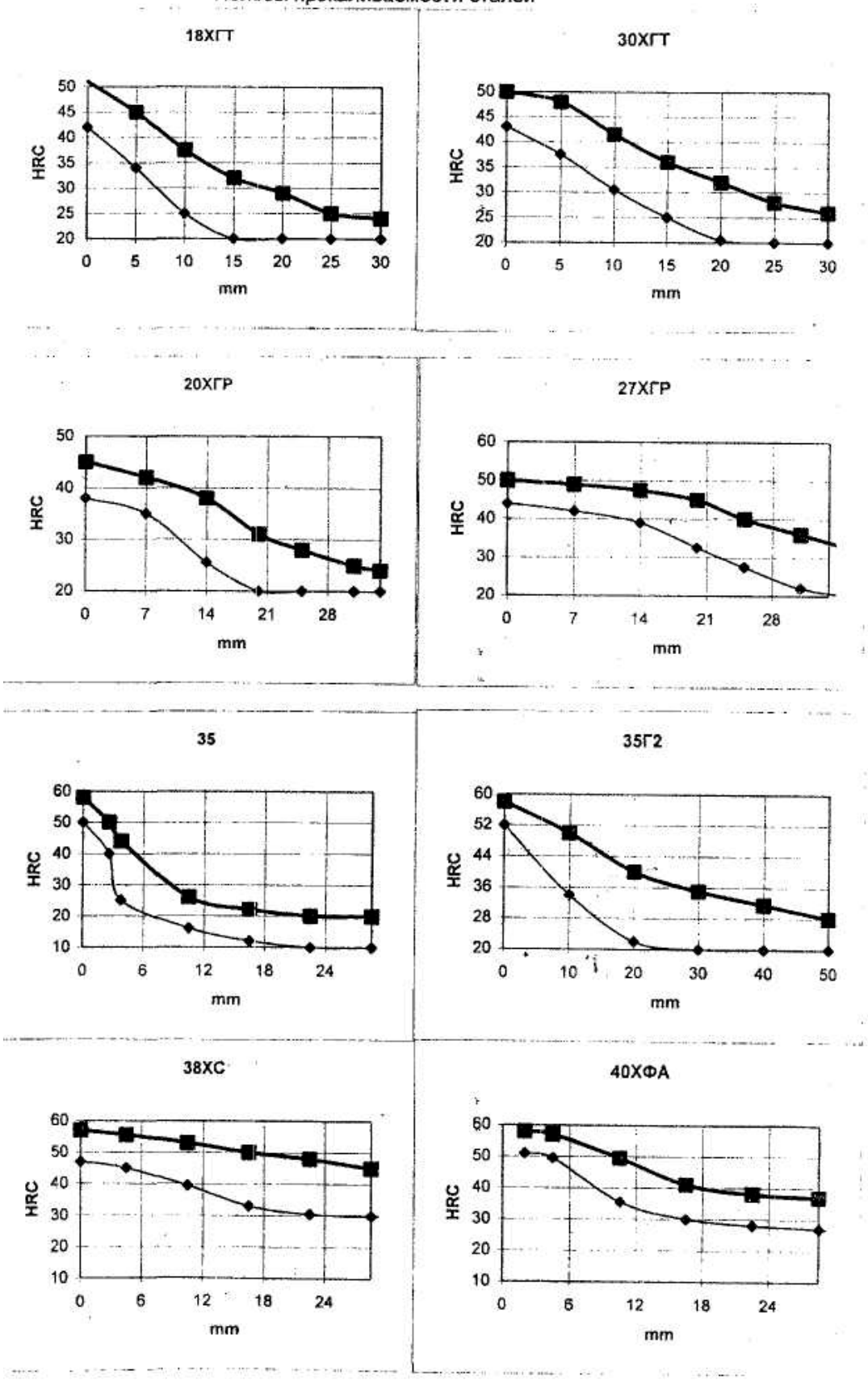
Марка стали	Критические точки, °С	
	A_{c1}	A_{c3}
18ХГТ	725	810
20ХГР	735	835
20ХН3А	715	770
25Х2ГНТА	710	760
27ХГР	715	760
30Х	740	815
30ХГТ	735	790
30ХМ	755	807
30ХГС	750	830
35Г2	718	804
35ХМА	755	800
38ХА	735	780
38ХС	763	810
40ХН	725	780
40НМ	735	768
40ХФА	754	790
40ХНМА	730	820
45Г2	711	765
45ХФА	760	800
50Х	720	770

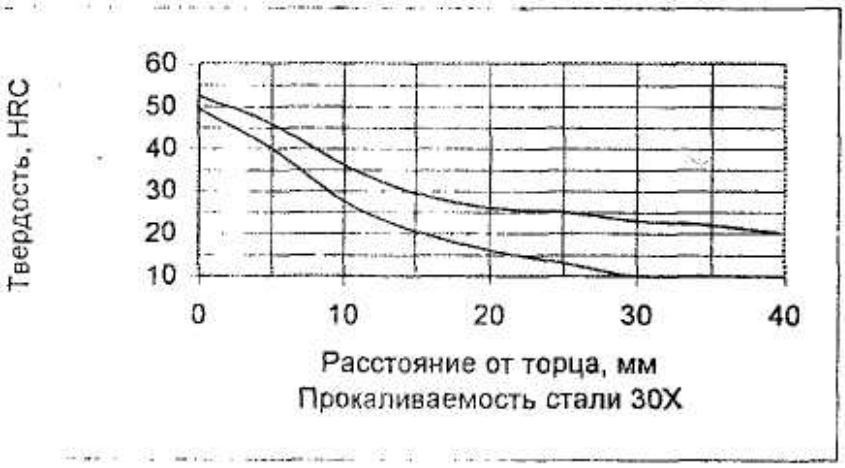
ТАБЛИЦА СОПОСТАВЛЕНИЯ ЧИСЕЛ ТВЕРДОСТИ HRC И ПРОЧНОСТИ $\sigma_в$

$\sigma_в$, МПа	810	850	880	900	950	990	1020	1040	1080	1110	1140
HRC	20	22	24	25	27	29	30	31	33	34	35

$\sigma_в$, МПа	1170	1200	1220	1250	1280	1330	1360	1390	1430	1460	1480	1510
HRC	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47

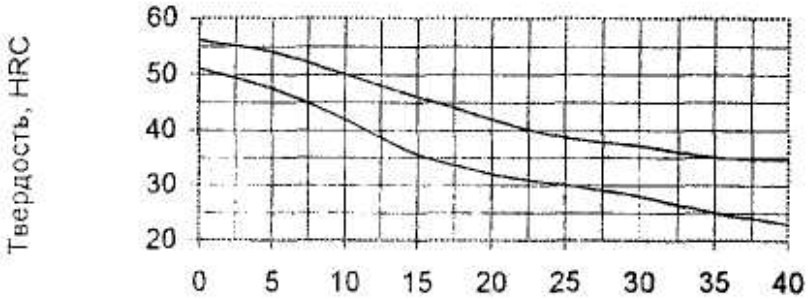
Полосы прокаливаемости сталей



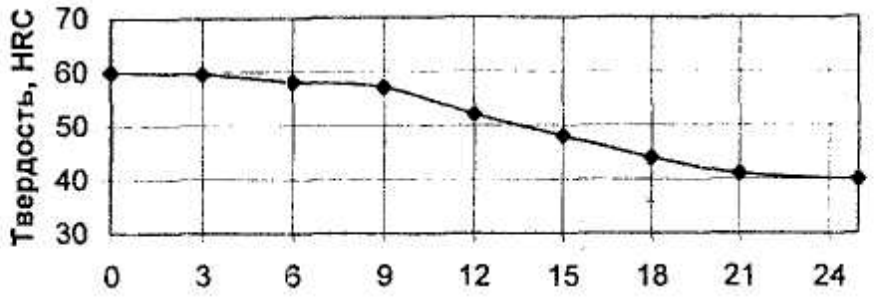


Прокаливаемость стали 30Х

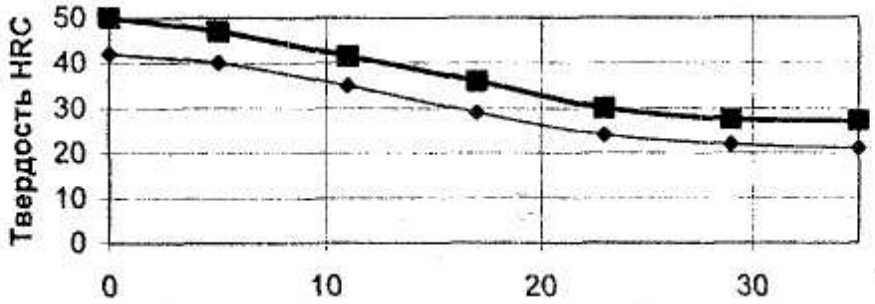
Прокаливаемость стали 25Х2ГНТА



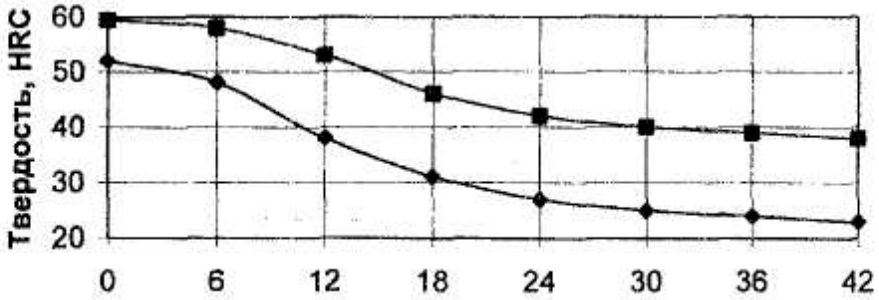
Прокаливаемость стали 35ХМА



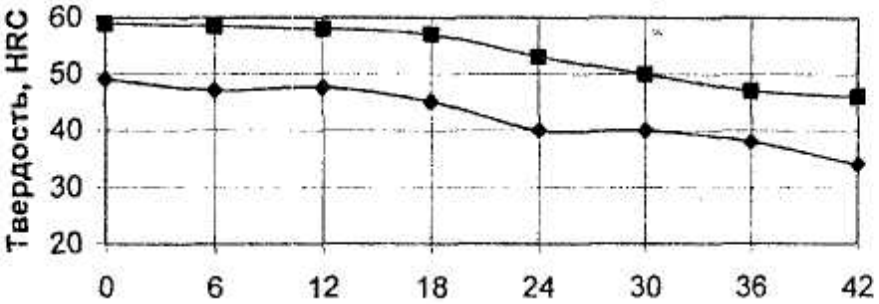
Расстояние от охлаждаемого торца, мм
Прокаливаемость стали 45ХФА



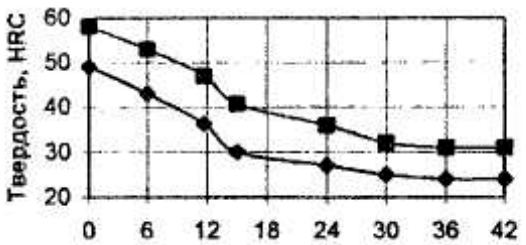
Расстояние от торца, мм
Прокаливаемость стали 20ХН3А



Расстояние от охлаждаемого торца, мм
Прокаливаемость стали 40НМ

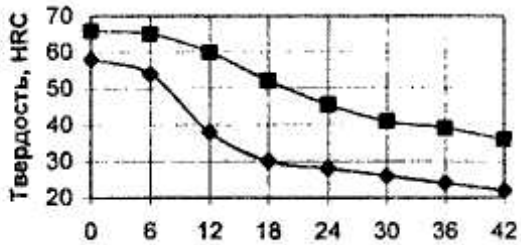


Расстояние от охлаждаемого торца, мм
Прокаливаемость стали 40 ХНМА



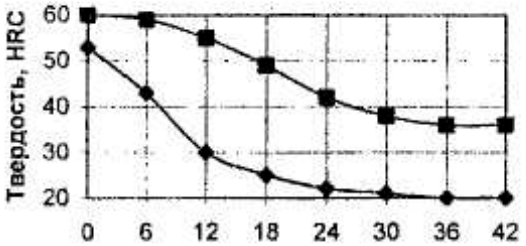
Расстояние от охлаждаемого торца, мм

Прокаливаемость стали 38ХА



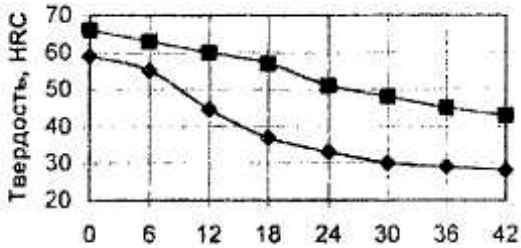
Расстояние от охлаждаемого торца, мм

Прокаливаемость стали 50Х



Расстояние от охлаждаемого торца, мм

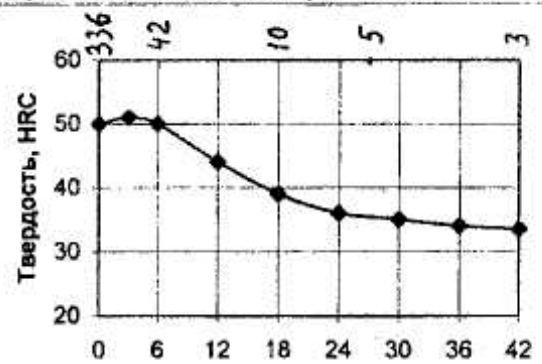
Прокаливаемость стали 45Г2



Расстояние от охлаждаемого торца, мм

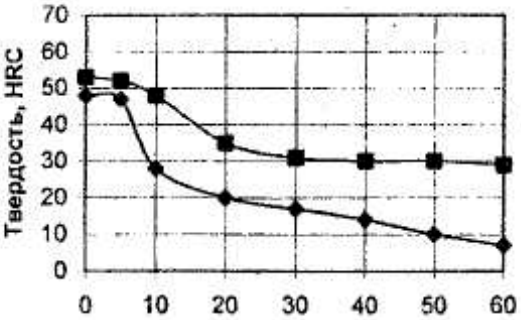
Прокаливаемость стали 40ХН

Скорость охлаждения при 700 ^{0}, ^{0}C/c



Расстояние от охлаждаемого торца, мм

Прокаливаемость стали 30ХГС



Расстояние от охлаждаемого торца, мм

Прокаливаемость стали 30ХМ

ВЫБОР СТАЛЕЙ И РЕЖИМОВ ИХ ТЕРМООБРАБОТКИ

Методические указания
к выполнению лабораторной работы
по курсу "Материаловедение"
для студентов механических специальностей

Составили: ЗЕМЧЕНКОВ Владимир Степанович
АРТЕМЕНКО Александр Александрович
КОНОПЛЯНКИН Сергей Владимирович

Рецензент В.Н. Сопляченко

Редактор Л.А. Мишина

Лицензия ЛР № 020271 от 15.11.96

Подписано в печать 27.12.00 Формат 60x84 1/16
Бум. тип. Усл.-печл. 0,93 (1,0) Уч.-изд.л 1,0
Тираж 100экз. Заказ 576 Бесплатно.
Саратовский государственный технический университет
410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77
Копипринтер СГТУ, 410054 г. Саратов, ул. Политехническая, 77