

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Кузбасский государственный технический университет  
имени Т. Ф. Горбачева»

Кафедра металлорежущих станков и инструментов

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ СТАЛИ**

Методические указания к лабораторной работе  
по курсу «**Материаловедение**» для обучающихся направления  
подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств»  
всех форм обучения

**Составитель      С. В. Лащина**

Утверждены на заседании кафедры  
Протокол № 21 от 12.02.2018

Рекомендованы к печати  
учебно-методической комиссией  
направления 15.03.05  
Протокол № 6 от 06.03.2018

Электронная копия находится  
в библиотеке КузГТУ

## КЕМЕРОВО 2018

### 1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Закрепить понятия об основных технологических характеристиках стали при термообработке – закаливаемости и прокаливаемости.

Экспериментальным способом проверить влияние химического состава стали на ее закаливаемость и прокаливаемость.

Освоить методику определения прокаливаемости торцевой закалкой по ГОСТ 5657.

### 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Важнейшими технологическими характеристиками стали, определяющими возможность и характер упрочнения деталей термообработкой, являются закаливаемость и прокаливаемость.

Под *закаливаемостью* понимают способность стали получать высокую твердость при закалке на мартенсит. Главный фактор, определяющий закаливаемость стали, – содержание в ней углерода. Изменение твердости стали в зависимости от содержания в ней углерода показано на рис. 1.

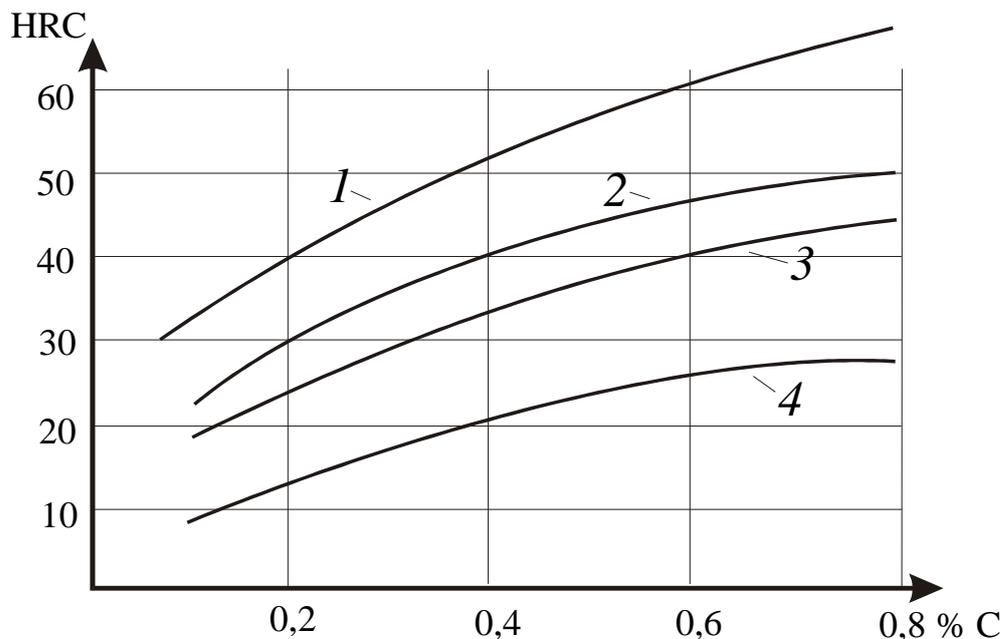


Рис. 1. Влияние содержания углерода в стали на твердость мартенсита 1, полумартенситной структуры 2, троостита 3 и сорбита 4

Легирующие элементы прямого влияния на закаливаемость не оказывают, а могут влиять лишь косвенно, увеличивая концентрацию углерода в мартенсите на 3–5 единиц. Но в малоуглеродистых легированных сталях (до 0,2 % С) они снижают критическую скорость закаливания  $V_{\text{охл}}$ , это позволяет реализовать закалку на мартенсит, что в нелегированных сталях, как правило, неосуществимо.

Под *прокаливаемостью* понимают способность стали получать закаленный слой определенной глубины с мартенситной (или трооститно-мартенситной) структурой. Чем больше глубина закаленного слоя, тем выше прокаливаемость.

На рис. 2 показана схема изменения скорости охлаждения по сечению цилиндра при закалке и образования закаленного слоя соответствующей глубины.

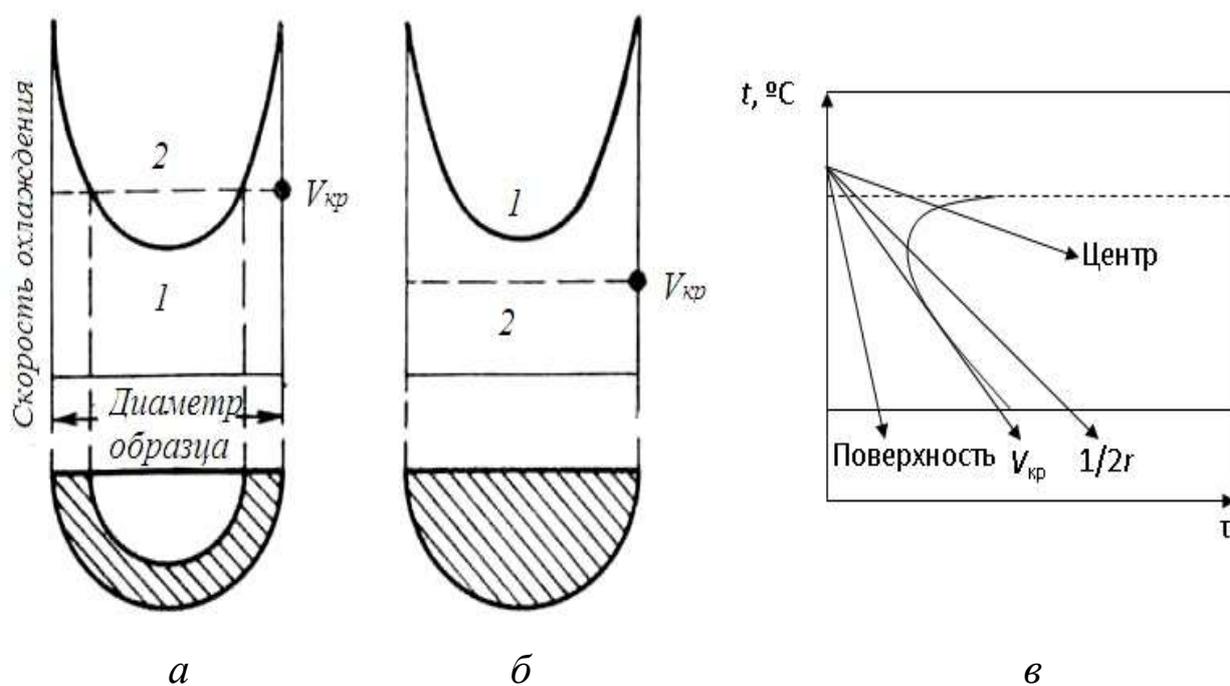


Рис. 2. Схема образования закаленного слоя при неполной и полной прокаливаемости:

*а* – несквозная прокаливаемость; *б* – сквозная прокаливаемость; *в* – схема зависимости прокаливаемости деталей от скорости закаливания; *1* – кривая распределения скоростей охлаждения по диаметру цилиндра; *2* – критическая скорость охлаждения (заштрихован слой, закаленный на мартенсит)

Прокаливаемость стали зависит от устойчивости переохлажденного аустенита, а следовательно, от критической скорости охлаждения. Прокаливаемость тем выше, чем меньше критическая скорость охлаждения.

Если центр изделия охлаждается со скоростью больше критической, то деталь закаливается на мартенсит насквозь (рис. 2, б). Для увеличения прокаливаемости детали данного сечения необходимо или повышать скорость охлаждения (кривая 1, см. рис. 2, а, б, сдвигается вверх), или понижать критическую скорость закалки: и в том, и в другом случае затрихованное сечение закаленной зоны будет возрастать.

Несквозная прокаливаемость обусловлена тем, что при закалке деталь охлаждается быстрее с поверхности и медленнее в сердцевине. Распределение скорости охлаждения по сечению детали показывает, что у поверхности скорость охлаждения максимальна, а в центре – минимальна (рис. 2, в). Векторы  $V_{\text{охл}}$ , лежащие левее  $V_{\text{кр}}$ , показывают, на какую глубину (менее  $1/2r$ ) произойдет закалка на мартенсит, глубже на смесь мартенсита + троостит, троостит.

Основные факторы, влияющие на прокаливаемость:

- *состав аустенита*. Все легирующие элементы (кроме кобальта) замедляют распад аустенита, повышают прокаливаемость (особенно сильно Mn, Ni, Cr, Mo, V и др.);

- *нерастворенные частицы* (карбиды, например, TiC, VC и др., оксиды, интерметаллические соединения). Эти частицы ускоряют превращение, так как являются дополнительными центрами кристаллизации и увеличивают число зарождающихся в единицу времени кристаллов (ч. ц.) при превращении аустенита → перлит;

- *неоднородный аустенит*. Он быстрее превращается в перлит, так как скорость превращения определяется в этом случае менее насыщенной частью твердого раствора;

- *размер зерна аустенита*. Чем он меньше, тем меньше прокаливаемость стали, т. к. критическая скорость закалки мелкозернистых сталей выше, чем у крупнозернистых. Увеличение размера зерна замедляет превращение, так как центры кристаллизации образуются преимущественно по границам зерна, а чем крупнее зерно, тем, следовательно, меньше суммарная протяженность границ, тем меньше значение ч. ц.

Увеличение содержания углерода в стали (до 0,8 %) слабо повышает прокаливаемость стали. Стали даже одной марки, но разных плавок, вследствие допускаемых ГОСТом колебаний в химическом составе, разной величины зерна аустенита, могут иметь различную прокаливаемость. Прокаливаемость стали данной марки принято характеризовать марочной полосой прокаливаемости, которая получается из набора кривых прокаливаемости образцов различных плавок этой марки стали. Полосы прокаливаемости приводятся в справочной литературе, в ГОСТ 4543, ГОСТ 1050, ГОСТ 14959.

Количественной оценкой прокаливаемости стали принята величина критического диаметра  $D_{кр}$ . *Критический диаметр* – это максимальный диаметр цилиндрического прутка, который прокаливается насквозь в данном охладителе.

*За глубину закаленного слоя* условно принимают так называемый полумартенситный слой со структурой 50 % мартенсита и 50 % троостита. Твердость полумартенситной структуры зависит от содержания углерода в стали (кривая 2, см. рис. 1). Критический диаметр при этом обозначают  $D_{50}$  (полумартенситная структура в сердцевине). В изделиях, толщина которых  $D_{изд} < D_{кр}$ , при закалке получится сквозная прокаливаемость, в изделиях с  $D_{изд} > D_{кр}$  – несквозная закалка с определенной глубиной закаленной зоны.

На рис. 3 показана схема изменения механических свойств по сечению цилиндра после закалки и высокого отпуска при неполной и полной прокаливаемости.

Как видно на схеме, в случае неполной прокаливаемости после термической обработки (закалка + отпуск) в поперечном сечении цилиндрического образца наблюдается неравномерность механических свойств. Особенно эта неравномерность проявляется в таких характеристиках, как предел текучести  $\sigma_{0,2}$ , предел выносливости  $\sigma_{-1}$ , ударная вязкость КСУ.

Величину прокаливаемости стали ( $D_{кр}$ ) нужно обязательно учитывать при выборе материала для деталей, подвергаемых упрочняющей термообработке. При одинаковых показателях механических характеристик ( $\sigma_{в}$ ,  $\sigma_{0,2}$ , НВ, КСУ) сталей разного химического состава, удовлетворяющих заданным расчетам на

прочность, следует выбирать сталь, критический диаметр которой равен или больше диаметра (толщины стенки) детали.

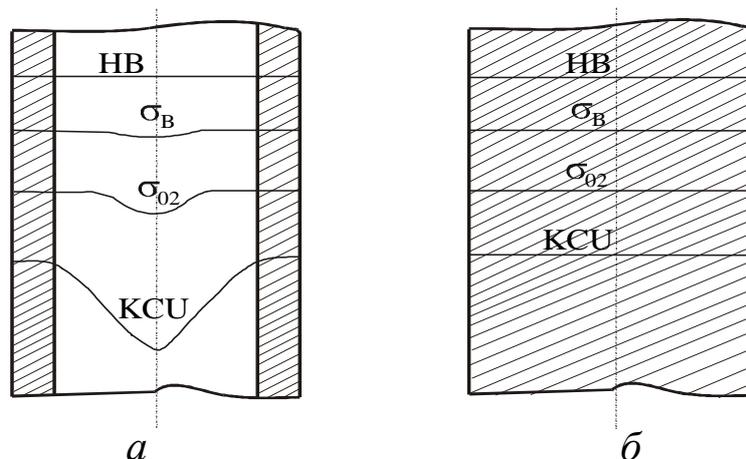


Рис. 3. Схема изменения свойств по сечению цилиндра после закалки и отпуска: *а* – неполная прокаливаемость; *б* – полная прокаливаемость (закаленная зона заштрихована)

Для машиностроительных деталей ответственного назначения, работающих в жестких условиях нагружения (растягивающие нагрузки, ударные, циклические нагрузки и др.), а также для пружин, рессор, подшипников, многих инструментов нужно обеспечить однородные структуры и свойства после отпуска, для чего требуется получить максимум мартенсита в структуре после закалки по всему сечению. В этих случаях для характеристики прокаливаемости пользуются критическими диаметрами  $D_{95}$  или  $D_{99}$  (соответственно 95 и 99,9 % мартенсита в структуре сердцевины). Приблизительно можно принять, что критический диаметр почти полной прокаливаемости  $D_{95} = 0,75D_{50}$ , а  $D_{99} = 0,5D_{50}$ .

Наиболее простым и быстрым способом определения прокаливаемости (критического диаметра  $D_{50}$ ) по ГОСТ 5657 является метод торцевой закалки. Цилиндрический образец диаметром 25 мм, длиной 100 мм после нагрева до заданной температуры закалки охлаждается струей воды с торца в специальной установке, как показано на рис. 4. При этом скорость охлаждения торца будет максимальной, по мере удаления от торца скорость охлаждения убывает. После охлаждения образца измеряют твердость по образующей цилиндра и в координатах «твердость – расстояние от торца» строят экспериментальную кривую прокаливаемости.

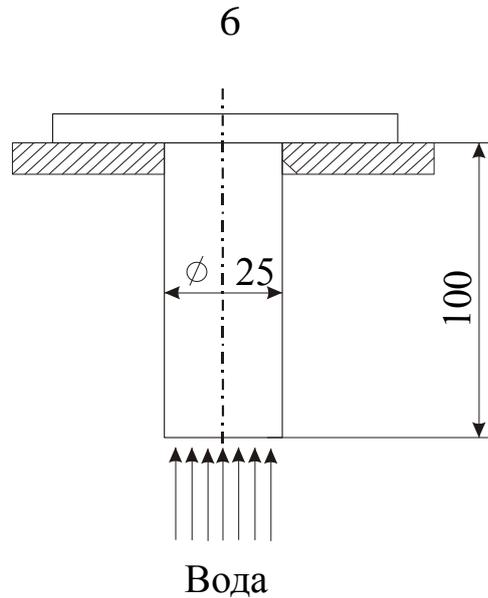


Рис. 4. Схема охлаждения стали при торцевой закалке

По кривой прокаливаемости определяют расстояние от торца до полумартенситной зоны.

Для этого из графика (см. рис. 1) определяют твердость HRC полумартенситной структуры при данном содержании углерода и, взяв полученное значение твердости на оси координат «твердость», по кривой прокаливаемости находят расстояние  $l_{50}$  от торца до полумартенситной структуры. Затем по диаграмме (рис. 5) определяют критический диаметр  $D_{50}$ .

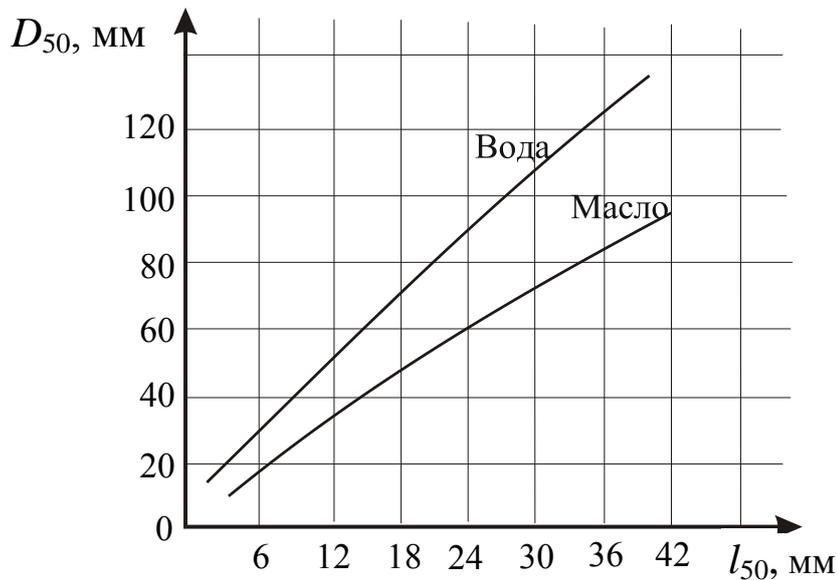


Рис. 5. Диаграмма для определения критического диаметра

## ОБОРУДОВАНИЕ, ИНСТРУМЕНТ, МАТЕРИАЛЫ

Для выполнения работы необходимо иметь:

- твердомер типа ТК;
- муфельную термическую печь МП-2У;
- установку для торцевой закалки;
- клещи для захвата образцов;
- два стандартных образца разных марок стали (например, сталь 40 и 40Х, сталь 50 и 50Г или др.).

### 3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Выбрать режим нагрева образцов под закалку по методическим указаниям к лабораторной работе «Термическая обработка стали».

2. Загрузить образцы в нагретую термическую печь и выполнить режим нагрева по п. 1.

3. Нагретый образец перенести из печи в установку для торцевой закалки и выполнить охлаждение струей воды.

4. После полного охлаждения образца зачистить по образующей цилиндра лыску шириной 2 мм и измерить твердость HRC на расстоянии 2, 4, 6, 10, 20, 30, 50 мм от торца (расстояния указаны приближенно). Результаты измерений занести в таблицу.

5. Построить кривую прокаливаемости по результатам эксперимента в координатах «твердость – расстояние от торца».

6. По кривой 2 (см. рис. 1) определить твердость полумартенситной зоны для марки стали образца (если сталь легированная, к результату, полученному из графика, нужно прибавить 3–5 единиц HRC). По экспериментальной кривой прокаливаемости найти расстояние от торца образца до полумартенситной зоны.

7. По диаграмме рис. 5, перенесенной в отчет, определить критический диаметр  $D_{50}$  для охлаждения в воде и в масле, затем рассчитать критические диаметры  $D_{95}$  и  $D_{99}$ .

8. Проанализировать полученные результаты и сформулировать выводы.

9. При отсутствии образцов разных марок стали с различной прокаливаемостью можно экспериментальную часть выполнить с одним образцом. Вместо второго образца следует использовать графики «полосы прокаливаемости» из сборника стандартов

(ГОСТ 4543, ГОСТ 14959).

#### 4. ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА

Отчет должен содержать краткие сведения о закаливании и прокаливаемости как технологических характеристиках стали, описание порядка проведения работы со схемой торцевой закалки.

В отчете должны быть представлены графики рис. 1 и рис. 5, экспериментальный график измерения твердости по длине образца (кривая прокаливаемости), на котором вспомогательными линиями нужно показать расстояние  $l_{50}$  от торца до полумартенситной зоны.

Результаты наблюдений, измерений и расчетов поместить в таблицу.

#### 5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется закаливаемостью стали?
2. Какие факторы влияют на закаливаемость?
3. Что такое прокаливаемость стали?
4. Какие факторы влияют на прокаливаемость?
5. Как выбрать температуру закалки доэвтектоидной стали?
6. Какой характеристикой оценивается прокаливаемость?
7. Что такое  $D_{50}$ ,  $D_{95}$ ,  $D_{99}$ ?
8. В какой зависимости находится устойчивость переохлажденного ниже температуры  $A_1$  аустенита и критическая скорость закалки стали?
9. У какой из сталей – 20ХНМ и сталь 60 больше прокаливаемость, а у какой закаливаемость? Объясните ваш выбор.
10. Какую сталь следует использовать для изготовления высоконагруженного вала диаметром 40мм: сталь с  $D_{кр} = 46$  мм, или сталь с  $D_{кр} = 12$  мм? Объясните ваш выбор.

Таблица

Показатели		Обр. № 1	Обр. № 2
Марка стали			
Критические точки	Ac <sub>1</sub>		
	Ac <sub>3</sub>		
Режим нагрева	t, °C		
	τ, мин		
Твердость закаленных образцов	HRC		
	l, мм		
Твердость полумартенситной зоны (из рис. 1)			
Расстояние от торца до полумартенситной зоны l <sub>50</sub>			
Критический диаметр, D <sub>50</sub> (по рис.5)	вода		
	масло		
Расчетный критический диаметр D <sub>95</sub>	вода		
	масло		
Расчетный критический диаметр D <sub>99</sub>	вода		
	масло		

## 6. СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лахтин, Ю. М. Материаловедение : учебник для вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. – Москва : Альянс, 2009. – 528 с
2. Материаловедение: учеб. для вузов / под общ. ред. Б. Н. Арзамасова, Г. Г. Мухина. – Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. – 648 с
3. ГОСТ 1050–88. Прокат сортовой, калиброванный со специальной отделкой поверхности из углеродистой качественной конструкционной стали. – Введ. 1991–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 406 с.
4. ГОСТ 4543–71. Сталь легированная конструкционная. – Введ. 1973–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1978. – 59 с.
5. ГОСТ 14959–79. Прокат из рессорно-пружинной углеродистой и легированной стали. – Введ. 1981–01–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1990. – 406 с.
6. ГОСТ 5657–69. Сталь. – Введ. 1970–07–01. – Москва : Изд-во стандартов, 1972. – 8 с.

Составитель  
**Лащнина Светлана Викторовна**

## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОКАЛИВАЕМОСТИ СТАЛИ**

Методические указания к лабораторной работе  
по курсу «**Материаловедение**» для обучающихся направления  
подготовки 15.03.05 «Конструкторско-технологическое  
обеспечение машиностроительных производств»  
всех форм обучения

Рецензент Л. П. Короткова

Печатается в авторской редакции

Подписано в печать 16.04.2018. Формат 60×84/16.

Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Уч.-изд. л. 0,5. Тираж 14 экз. Заказ

КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Весенняя, 28.

Издательский центр УИП КузГТУ. 650000, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4А